

Посвящается профессору В.П. Федину по случаю его 70-летия

УДК 542.06; 546.24; 546.266; 546.719; 546.65

## СЛОИСТЫЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРЫ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$ ( $\text{Q} = \text{S}$ ИЛИ $\text{Se}$ ) И ДИМЕРНЫХ КАТИОНОВ $\{(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})\}^{2+}$

© 2024 г. Ю. М. Литвинова<sup>1</sup>, Я. М. Гайфулин<sup>1</sup>, Т. С. Сухих<sup>1</sup>,  
К. А. Брылев<sup>1</sup>, Ю. В. Миронов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

\*e-mail: yuri@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 21.03.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принята к публикации 21.04.2024 г.

Изучено взаимодействие солей кластерных анионов  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  с дицианоаргентат-анионом  $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$  в присутствии 1,2-бис(дифенилфосфино)этана. В условиях сольвотермального синтеза были получены два новых координационных полимера  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})]_2[\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6]\} \cdot \text{H}_2\text{O}$  (I) и  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})]_2[\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6]\}_{0,85}\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))(\text{Ag}(\text{DppeSe}))(\mu\text{-Dppe})]_2[\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6]\}_{0,15}$  (II). Исследование монокристаллов соединений методом РСА (CCDC № 2341356 (I) и 2341355 (II)) показало, что они имеют слоистую структуру. Изучение кристаллических порошков соединений методом порошковой дифракции показало, что синтез соединения II приводит к образованию двух кристаллических фаз, одна из которых изоструктурна соединению I. Параметры люминесценции соединений в твердом теле (квантовые выходы, времена жизни эмиссии) схожи с параметрами других координационных полимеров на основе ионов  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$ .

**Ключевые слова:** рений, кластер, серебро, кристаллическая структура, координационные полимеры, люминесценция

**DOI:** 10.31857/S0132344X24100072, **EDN:** LPNGRC

Синтез и исследование октаэдрических кластерных соединений тяжелых переходных металлов активно ведутся, начиная с 1960-х гг. [1–4]. Интерес к этим соединениям не исчез и по сей день благодаря разнообразию структурных характеристик и практически значимых физико-химическим свойств [5–10]. В частности, октаэдрические халькогенидные кластерные комплексы рения обладают яркой флуоресценцией в красной области спектра и стабильностью в двух зарядовых состояниях, переход между которыми сопровождается изменением спектральных и магнитных свойств [11–13]. Такое сочетание делает гексарениевые кластеры хорошими кандидатами для получения сенсоров с люминесцентным откликом и люминесцентных материалов. Кроме того, высокая термическая и гидролитическая стабильность, а также устойчивость в широком диапазоне pH позволяют проводить реакции с участием таких кластер-

ных комплексов не только в мягких условиях растворного синтеза, но и в сольвотермальных условиях [14] и в расплавах реагентов [15].

Халькоцианидные кластерные комплексы рения  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  ( $\text{Q} = \text{S}$ ,  $\text{Se}$  или  $\text{Te}$ ) имеют шесть апикальных циано-лигандов и представляют собой объемные жесткие высоко симметричные металлолинкеры. Было показано, что эти кластерные анионы могут быть использованы для синтеза координационных полимеров различной размерности на основе катионов  $3d$ - [16, 17] и  $4f$ - [14, 18] металлов. Благодаря сочетанию свойств, присущих кластерным анионам и катионным координационным узлам, такие полимеры могут демонстрировать multifunctional свойства, повышая их потенциальную применимость в качестве компонентов различных материалов.

В последние годы активно исследуются координационные комплексы на основе катионов  $\text{Ag}^+$ . Было показано, что они могут обладать электропроводностью [19], биологической активностью [20] и проявлять интересные люминесцентные свойства [21–23]. Способность к образованию аргентофильных взаимодействий, способных радикально влиять на люминесцентные свойства [24–26], механохромизм [27], а также возможность получать соединения, проявляющие термоактивируемую замедленную флуоресценцию (thermally activated delayed fluorescence, TADF) [28–30], делает комплексы серебра идеальными координационными узлами для получения полимеров с «улучшенными» фотofизическими свойствами.

Ранее нами было показано [31], что присутствие катионных комплексов серебра с люминесцентными N-донорными ароматическими лигандами в структурах координационных полимеров на основе кластерных комплексов  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  ( $\text{Q} = \text{S}$  или  $\text{Se}$ ) приводит к увеличению значений характеристик квантового выхода и времени жизни люминесценции в сравнении с исходными солями кластерных комплексов. В данной работе получены и исследованы люминесцентные свойства двух новых слоистых координационных полимеров  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe}))_2\{\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6\}]\cdot\text{H}_2\text{O}$  (I) и  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe}))_2\{\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6\}]\}_{0,85}\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))(\text{Ag}(\text{DppeSe}))(\mu\text{-Dppe}))_2\{\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6\}]\}_{0,15}$  (II) на основе кластерных комплексов и катионов  $\text{Ag}^+$  с бидентатным P-донорным лигандом 1,2-бис(дифенилфосфино)этаном (Dppe).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соли  $\text{Cs}_3\text{K}[\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{K}_4[\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6]\cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$  получали по описанным методикам [32, 33]. Коммерчески доступные реагенты и растворители использовали без дополнительной очистки.

Соотношение элементов C, H, N определялось на анализаторе EuroVector EA3000.

Соотношение тяжелых элементов в полученных комплексах определяли методом энергодисперсионного рентгеновского анализа на электронном микроскопе HitachiTM-3000 с ЭДС анализатором BrukerNano.

Спектры возбуждения, фотолюминесценции и времена жизни возбужденных состояний

поликристаллических образцов I и II записывали на спектрофлуориметре Horiba Fluorolog 3 (Horiba Jobin Yvon). Значения абсолютного квантового выхода были определены при 298 К с использованием интегрирующей сферы Fluorolog 3 Quanta-phi.

**Синтез  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe}))_2\{\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6\}]\cdot\text{H}_2\text{O}$  (I).** В ампулу с закручивающейся крышкой помещали растворы: Dppe (40 мг, 0,101 ммоль) в 1 мл EtOH и 1 мл  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{K}[\text{Ag}(\text{CN})_2]$  (10 мг, 0,051 ммоль) в 1 мл  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Cs}_3\text{K}[\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (28 мг, 0,014 ммоль) в 1 мл  $\text{H}_2\text{O}$ . Ампулу помещали в сушильный шкаф, нагретый до 120 °С, и выдерживали 96 ч. По истечении этого времени ампулу извлекали из сушильного шкафа и переворачивали, чтобы образовавшиеся оранжевые игольчатые кристаллы оставались на дне ампулы, а горячий маточный раствор перемещался в противоположный ее конец. После остывания ампулы из маточного раствора выпадал бесцветный аморфный осадок. Крышку откручивали, затем маточный раствор с бесцветным порошком декантировали. Кристаллический продукт извлекали из ампулы на фильтр Шотта и промывали смесью воды и ацетонитрила (1 : 1 об.), затем водой. Полученные кристаллы соединения I высушивали на воздухе. Выход 34 мг (55,5%). ЭДС:  $\text{Re} : \text{S} : \text{Ag} = 6,0 : 8,1 : 4,1$ .

Найдено, %: C 44,7; H 3,5; N 1,9; S 5,9.

Для  $\text{C}_{162}\text{H}_{146}\text{N}_6\text{O}_6\text{P}_{12}\text{S}_8\text{Ag}_4\text{Re}_6$

Вычислено, %: C 44,5; H 3,4; N 1,9; S 5,9.

**Синтез  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe}))_2\{\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6\}]\}_{0,85}\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))(\text{Ag}(\text{DppeSe}))(\mu\text{-Dppe}))_2\{\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6\}]\}_{0,15}$  (II)** выполняли по методике, аналогичной методике получения соединения I. Вместо  $\text{Cs}_3\text{K}[\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  взяли  $\text{K}_4[\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6]\cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$  (30 мг, 0,014 ммоль). Выход 35 мг (52,8%). ЭДС:  $\text{Re} : \text{Se} : \text{Ag} = 6,0 : 8,2 : 4,1$ .

Найдено, %: C 41,0; H 3,3; N 1,8.

Для  $\text{C}_{324}\text{H}_{290}\text{N}_{12}\text{O}_{24}\text{Se}_{16,3}\text{Ag}_8\text{Re}_{12}$

вычислено, %: C 41,0; H 3,1; N 1,8 (рассчитано для соотношения фаз 1 : 1).

**РСА** для монокристаллов I и II проведен в ЦКП ИНХ СО РАН на дифрактометре Bruker D8 Venture с детектором CMOS PHOTON III и микрофокусным источником  $\text{I}\mu\text{S } 3,0$  ( $\text{MoK}_\alpha$ -излучение,  $\lambda = 0,71073 \text{ \AA}$ , фокусирующие зеркала Монтея) при 150 К. Кристаллические структуры решены с помощью SHELXT [34] и уточнены с помощью программ SHELXL [35] с графическим интерфейсом OLEX2 [36]. Параметры атомного смещения для неводородных атомов

уточнены анизотропно за исключением минорной части разупорядоченных лигандов Dppe в II. Атомы Н локализованы геометрически и уточнены в модели «наездника». Кристаллографические характеристики соединений I и II приведены в табл. 1.

Кристаллографические параметры комплексов I и II депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2341356 и 2341355 соответственно) и могут быть получены у авторов или по адресу <https://www.ccdc.cam.ac.uk>).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Соединение I кристаллизуется в пространственной группе  $P2_1/n$ . Независимый фрагмент включает шесть атомов рения, восемь атомов серы, по шесть атомов С и N шести цианолигандов, четыре атома Ag и атомы шести молекул Dppe (12 атомов Р, 162 атома С, 144 атома Н) (рис. 1). Также независимый фрагмент включает в себя атом кислорода сольватной молекулы  $H_2O$ . Кластерный фрагмент в структуре соединения имеет геометрию, типичную для координационных полимеров на его основе [31]. Длины

**Таблица 1.** Кристаллографические характеристики, детали эксперимента и уточнения структур I и II

| Параметр                                                                                          | Значение                                                          |                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                   | I                                                                 | II                                                                |
| Брутто-формула                                                                                    | $C_{162}H_{145}N_6O_{0,5}P_{12}S_8Ag_4Re_6$                       | $C_{81}H_{72,5}N_3O_{0,25}P_6Se_{4,14}Ag_2Re_3$                   |
| <i>M</i>                                                                                          | 4360,63                                                           | 2379,36                                                           |
| Температура, <i>K</i>                                                                             | 150(2)                                                            | 150(2)                                                            |
| Пр. группа                                                                                        | $P2_1/n$                                                          | $P2_1/c$                                                          |
| <i>a</i> , Å                                                                                      | 28,6620(7)                                                        | 16,5603(4)                                                        |
| <i>b</i> , Å                                                                                      | 16,5801(4)                                                        | 17,5968(3)                                                        |
| <i>c</i> , Å                                                                                      | 33,4322(8)                                                        | 28,8534(6)                                                        |
| $\beta$ , град                                                                                    | 95,2930(10)                                                       | 101,2840(10)                                                      |
| <i>V</i> , Å <sup>3</sup>                                                                         | 15819,9(7)                                                        | 8245,6(3)                                                         |
| <i>Z</i>                                                                                          | 4                                                                 | 4                                                                 |
| $\rho$ (выч.), г/см <sup>3</sup>                                                                  | 1,831                                                             | 1,917                                                             |
| $\mu$ , мм <sup>-1</sup>                                                                          | 5,333                                                             | 6,844                                                             |
| <i>F</i> (000)                                                                                    | 8436,0                                                            | 4526,0                                                            |
| Размер кристалла                                                                                  | 0,12 × 0,04 × 0,02                                                | 0,18 × 0,18 × 0,07                                                |
| Диапазон сбора данных по 2 $\theta$ , град                                                        | 3,144–61,016                                                      | 3,412–61,056                                                      |
| Диапазоны <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i>                                                          | $-40 \leq h \leq 40, -23 \leq k \leq 23,$<br>$-42 \leq l \leq 47$ | $-23 \leq h \leq 23, -25 \leq k \leq 25,$<br>$-36 \leq l \leq 41$ |
| Число измеренных рефлексов                                                                        | 213171                                                            | 101524                                                            |
| Число независимых рефлексов ( <i>R</i> <sub>int</sub> , <i>R</i> <sub><math>\sigma</math></sub> ) | 48287 (0,0625, 0,0592)                                            | 25192 (0,0502, 0,0513)                                            |
| Число данных/ограничений/уточняемых параметров                                                    | 48287/700/2074                                                    | 25192/140/916                                                     |
| GOOF по <i>F</i> <sup>2</sup>                                                                     | 1,014                                                             | 1,021                                                             |
| <i>R</i> <sub>1</sub> , <i>wR</i> <sub>2</sub> ( <i>I</i> > 2 $\sigma$ ( <i>I</i> ))              | 0,0364, 0,0665                                                    | 0,0478, 0,0929                                                    |
| <i>R</i> <sub>1</sub> , <i>wR</i> <sub>2</sub> (все данные)                                       | 0,0640, 0,0754                                                    | 0,0743, 0,1033                                                    |
| $\Delta\rho_{\max}/\Delta\rho_{\min}$ , е/Å <sup>3</sup>                                          | 1,39/–1,22                                                        | 2,47/–1,46                                                        |

связей Re–Re, Re–S и Re–C приведены в табл. 2. Каждый атом серебра включает в свою координационную сферу один атом N цианогруппы кластерного комплекса и три атома Р двух молекул лиганда. Таким образом, координационное число (**КЧ**) атома катиона  $\text{Ag}^+$  равно 4. Координационный полиэдр — искаженный тетраэдр (рис. 2). Для атомов серебра Ag(1) и Ag(2) хелатные молекулы Dppe разупорядочены по двум позициям с заселенностью 0,56 и 0,44, 0,64 и 0,36 соответственно. Два атома серебра образуют димерный катионный фрагмент  $\{(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})\}^{2+}$  (рис. 3). Каждый атом серебра димерного катионного комплекса связан с одним атомом азота цианогруппы кластера. Каждый кластер, в свою очередь, предоставляет четыре цианоли-

ганда в экваториальном положении для связи с атомами серебра. Таким образом образуется слой (рис. 4). В упаковке слои располагаются параллельно друг другу, образуя многочисленные  $\pi$ – $\pi$ - взаимодействия между фенильными кольцами соседних слоев.

Соединение II кристаллизуется в пространственной группе  $P2_1/c$ . Характерной особенностью структуры соединения является наличие частично заселенной позиции атома Se на расстоянии ковалентной связи как от ближайшего атома Ag (2,534 Å), так и от атома фосфора (2,039 Å). Расстояния между атомами фосфора и селена является типичным для селенофосфинов [37–39], что отвечает частичному превра-

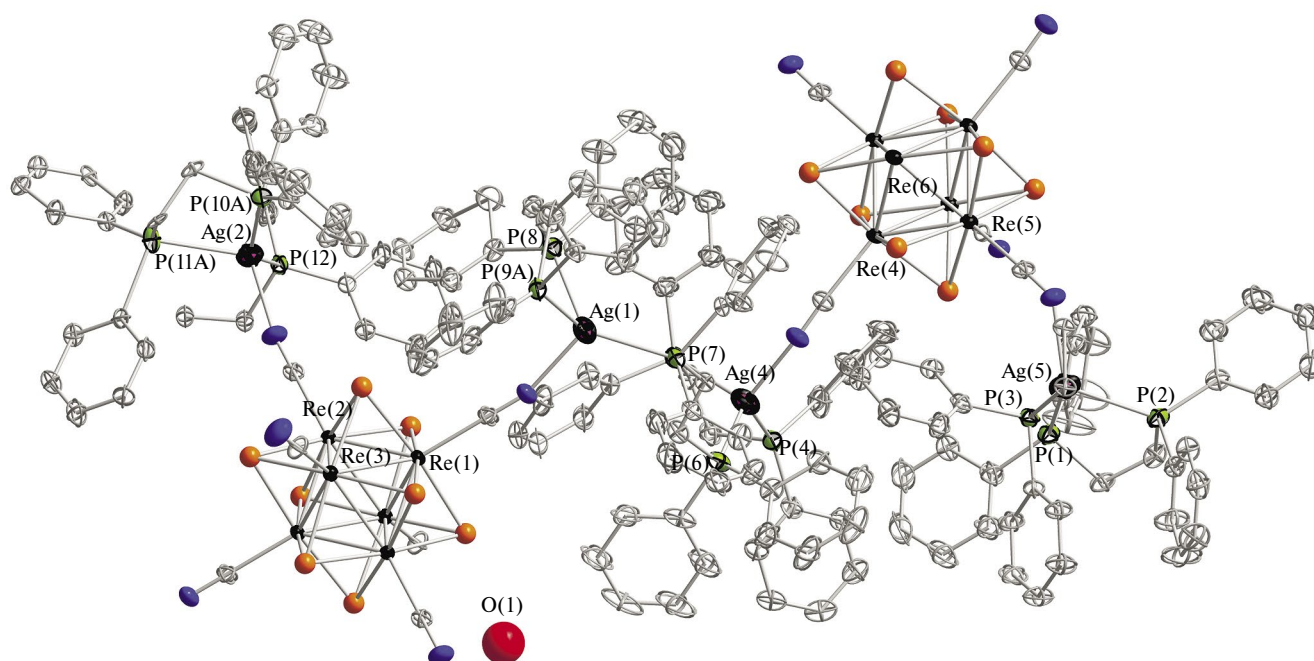


Рис. 1. Фрагмент структуры соединения I с нумерацией симметрически независимых атомов (приведены тепловые эллипсоиды 75%-ной вероятности, атомы водорода не показаны).

Таблица 2. Основные длины связей в соединениях I и II

| Связь | I                    |          | II                   |          |
|-------|----------------------|----------|----------------------|----------|
|       | Интервал             | Среднее  | Интервал             | Среднее  |
| Re–Re | 2,5927(2)–2,6100(2)  | 2,603(5) | 2,26316(3)–2,6393(3) | 2,59(4)  |
| Re–Q  | 2,3989(9)–2,4167(11) | 2,408(4) | 2,5147(7)–2,536(7)   | 2,524(5) |
| Re–C  | 2,104(4)–2,122(4)    | 2,113(5) | 2,097(6)–2,105(7)    | 2,100(3) |
| Ag–P  | 2,360(4)–2,656(2)    | 2,50(7)  | 2,31(2)–2,568(2)     | 2,48(8)  |
| Ag–N  | 2,264(4)–2,289(4)    | 2,27(1)  | 2,021(7)–2,296(6)    | 2,1(2,1) |
| Ag–Se |                      |          | 2,05(2)              |          |

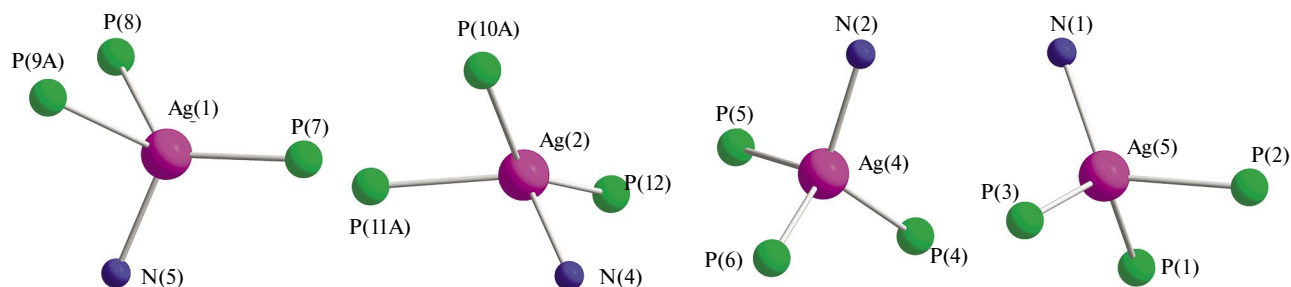


Рис. 2. Координационное окружение атомов Ag(1), Ag(2), Ag(4) и Ag(5).

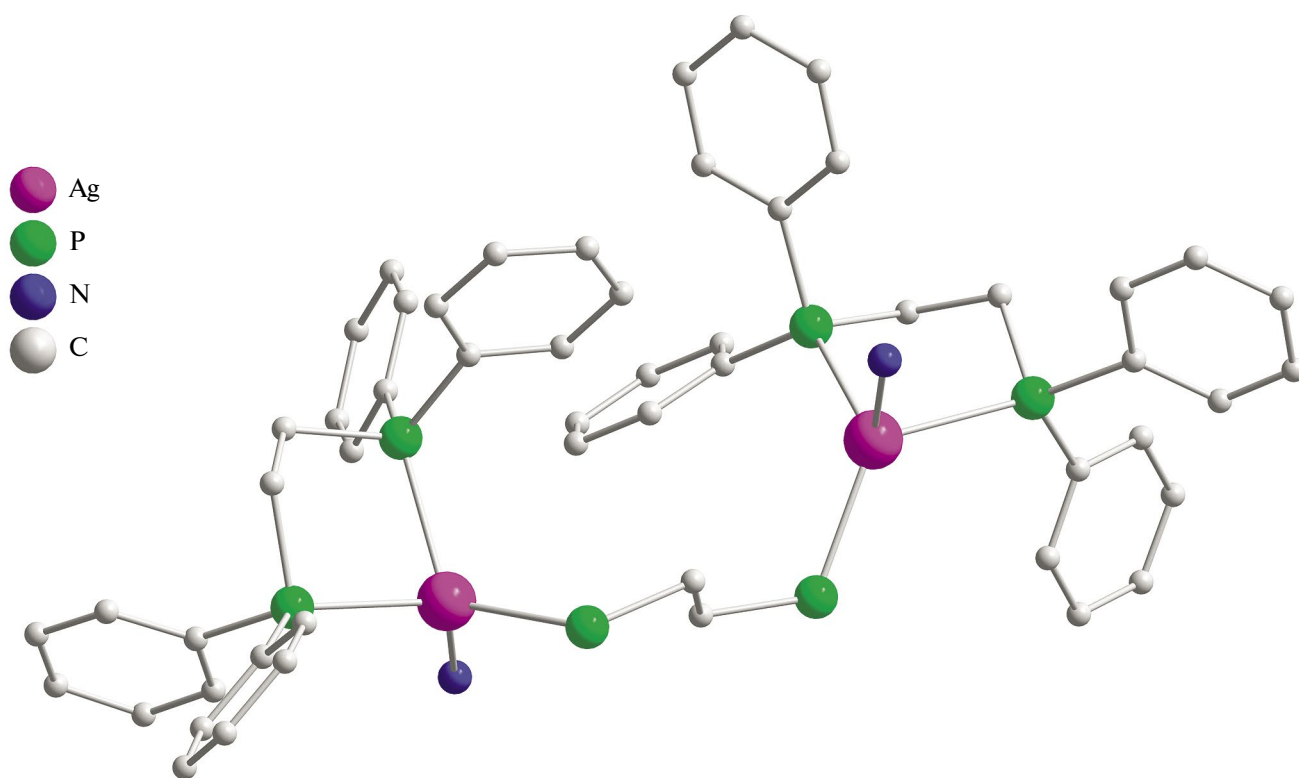
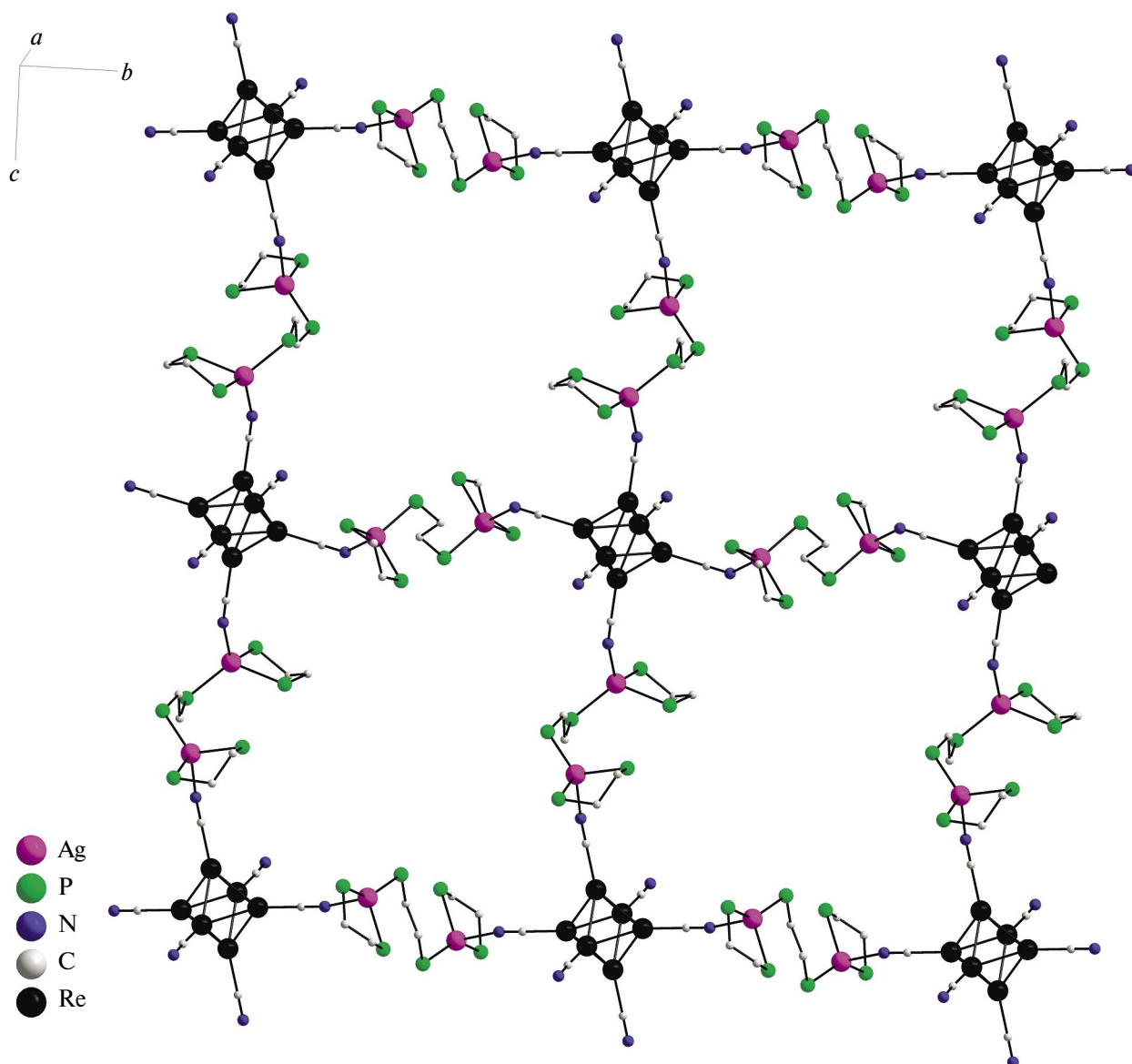


Рис. 3. Строение димерного фрагмента  $[\{Ag(Dppe)\}_2\mu-Dppe]^{2+}$  в соединении I. Атомы водорода, а также фенильные кольца мостиковой молекулы Dppe не показаны.

щению одного из хелатирующих лигандов Dppe в DppeSe в процессе сольвотермального синтеза. Таким образом, независимый фрагмент соединения включает в себя половину кластерного комплекса (три атома Re, четыре атома Se и по три атома N и C трех цианолигандов), два атома Ag и атомы трех молекул Dppe (6 атомов P, 78 атомов C, 72 атома H), а также позицию атома селена с заселенностью 0,15 (рис. 5). Координационная сфера атома Ag(1) включает в себя три атома P двух молекул Dppe и один атом N цианолиганда кластерного комплекса (рис. 6). Второй атом Ag разупорядочен по двум позициям Ag(2A)

и Ag(2B) с заселенностями 0,85 и 0,15 соответственно. Молекулы Dppe, связанные со вторым атомом серебра, также демонстрируют разупорядочение. Молекула, связанная с атомом Ag(2B), представляет собой 1,2-бис(дифенилфосфин)этан селенид. Заселенность позиций, соответствующих этому лиганду, составляет 0,15. При этом в данном случае атом серебра координирован только атомом селена молекулы DppeSe, в то время как атом фосфора остается свободным (рис. 5б). Таким образом, КЧ атома Ag(2B) равно 3 (рис. 6). Атом Ag(2A) имеет КЧ, равное 4, и включает в свою координационную сферу

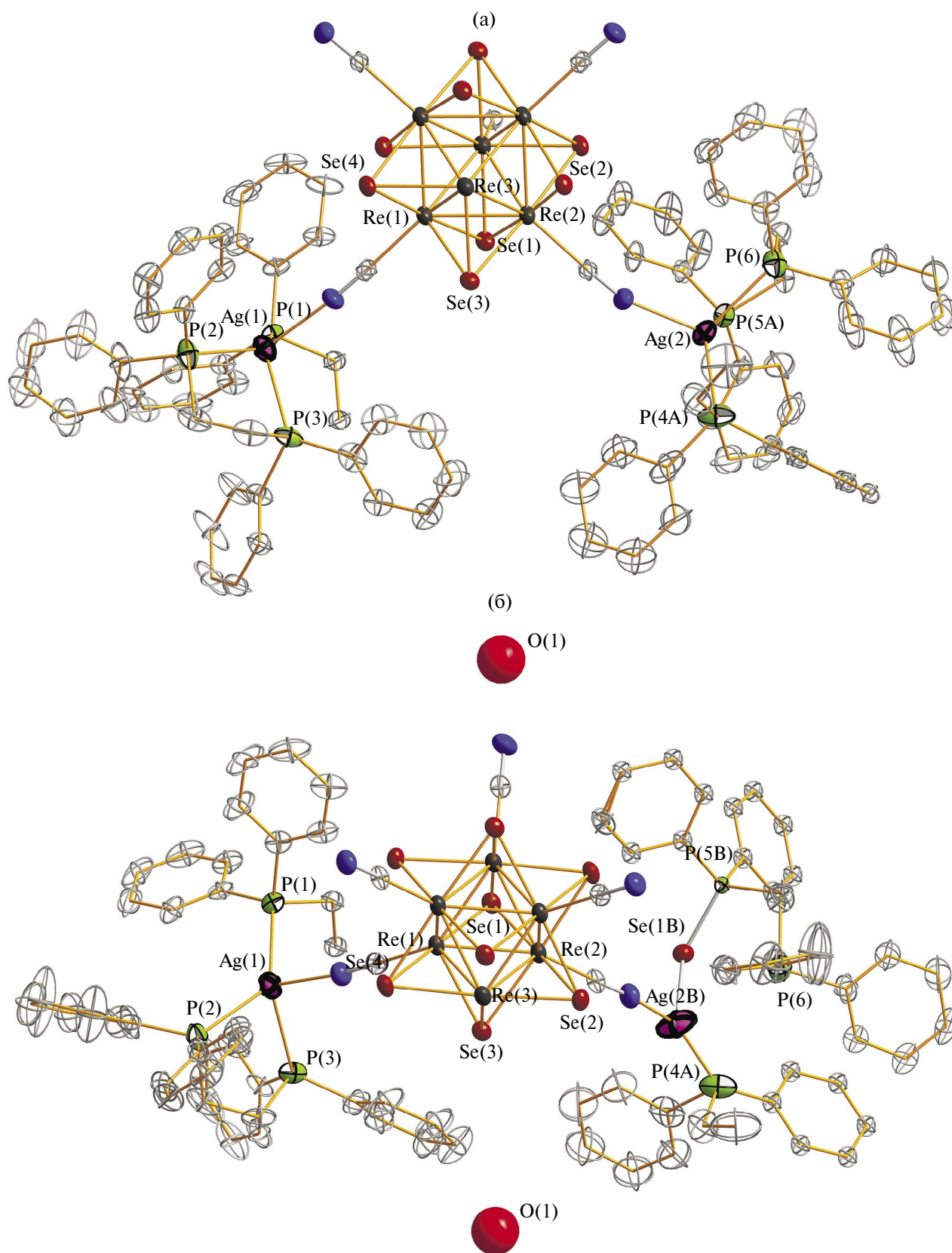


**Рис. 4.** Фрагмент слоистой структуры соединения I. Атомы S, молекулы фенильных колец Dppe и сольватные молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  не показаны.

два атома Р хелатной молекулы Dppe, один атом Р мостиковой молекулы Dppe и атом N цианогруппы (рис. 6). В структуре соединения II присутствуют димерные фрагменты  $\{(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})\}^{2+}$ , однако его геометрия отличается от геометрии аналогичного фрагмента структуры соединения I из-за присутствия лиганда DppeSe в позиции одной из хелатирующих молекул Dppe (рис. 7). Изменение геометрии катионной части не приводит к изменению типа структуры: как и в структуре I, каждый кластерный комплекс в структуре II связывает по четыре катионных димера посредством цианолигандов, образуя слой (рис. 8). В обеих структурах центры кла-

стерных анионов расположены в узлах квадратных ячеек сетки со сторонами  $16,5 \times 17,5 \text{ \AA}$ , а димерные комплексы зигзагообразно пересекают ребра сетки. Однако расположение хелатных молекул Dppe в димерном комплексе относительно плоскости слоя для структур I и II неодинаково.

В литературе для синтеза соединений на основе серебра и фосфиновых лигандов в качестве источника  $\text{Ag}^+$  в большинстве случаев используют различные ионные неорганические соли серебра. В ряде работ описано влияние противоиона на структуру полученных соединений, что может быть критичным при образовании поля-



**Рис. 5.** Независимый фрагмент структуры соединения II с нумерацией тяжелых симметрически независимых атомов с отображением лигандов Dpre (а) и DpreSe (б), координированных к разупорядоченному атому Ag(2) (а) или Ag(2B) (б) соответственно. Приведены тепловые эллипсоиды 75%-ной вероятности. Атомы водорода не показаны.

дерных комплексов серебра, демонстрирующих аргентофильные взаимодействия [40]. В данной работе в качестве источника серебра был использован  $K[Ag(CN)_2]$ . В литературе описаны синтетические подходы с применением дицианоаргентата и цианида серебра для получения люминесцентных комплексов серебра с органическими лигандами, но число таких работ отно-

сительно невелико. В случае соединений I и II выбор растворимого в воде дицианоаргентата является критичным для получения кристаллического продукта. Взаимодействие кластерных комплексов с водными растворами солей серебра, диссоциирующими с образованием  $Ag^+$ , приводит к мгновенному образованию аморфного осадка.

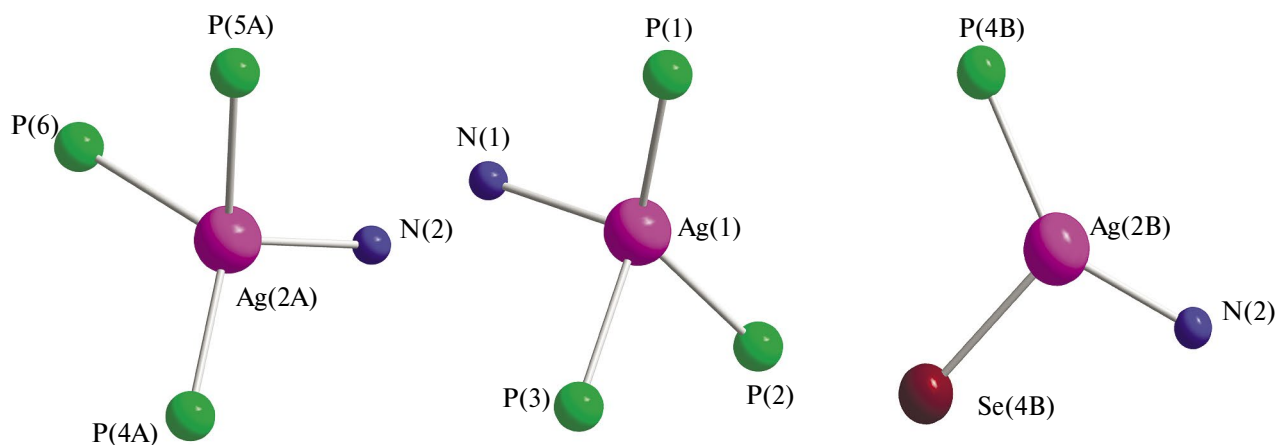


Рис. 6. Координационное окружение атомов Ag(1), Ag(2A) и Ag(2B) в соединении II.

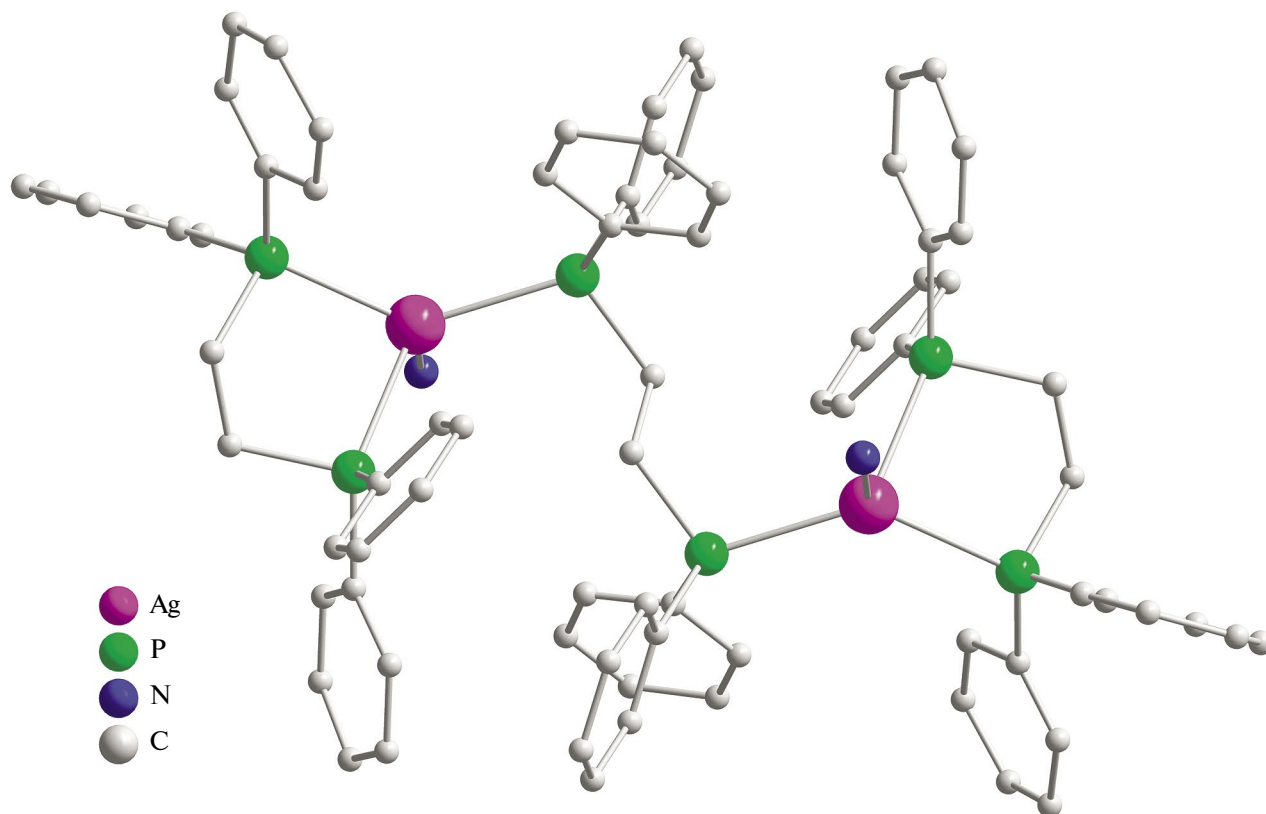
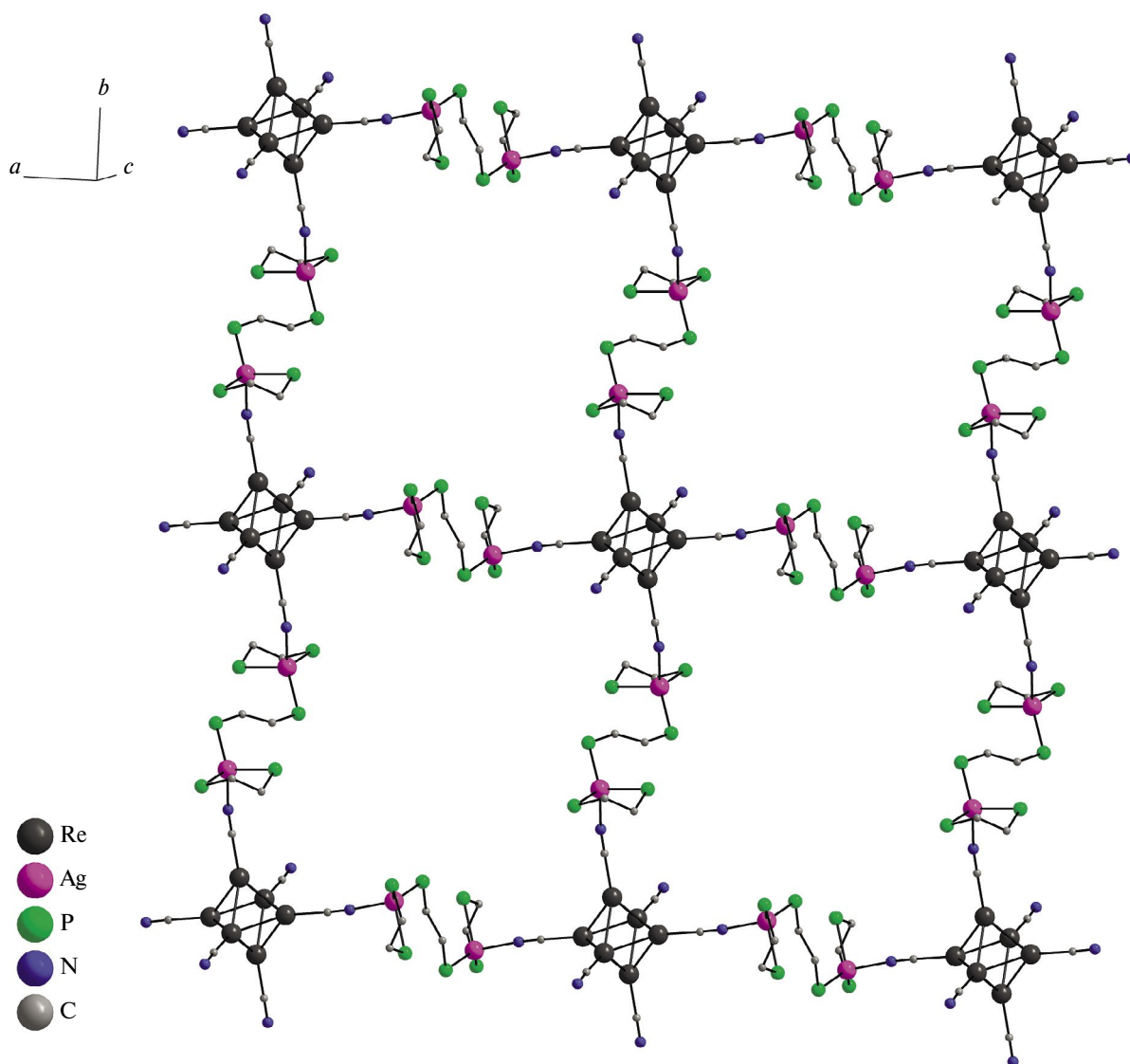


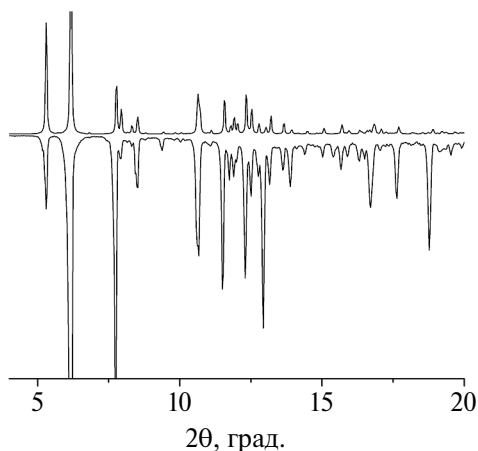
Рис. 7. Строение димерного фрагмента  $\{(Ag(Dppe))_2(\mu-Dppe)\}^{2+}$  в соединении II. Атомы водорода не показаны.



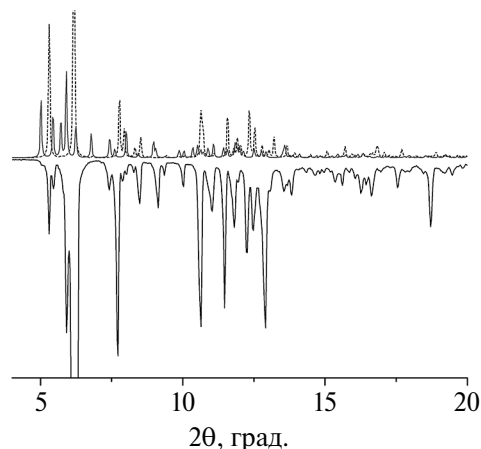
**Рис. 8.** Фрагмент слоистой структуры соединения II. Атомы Se, фенильные кольца молекул Dppe и атомы водорода не показаны.

Длительный сольвотермальный синтез соединений I и II в смеси растворителей приводит к медленному образованию кристаллической фазы. Соединения I и II кристаллизуются в разных пространственных группах, однако имеют похожую структуру полимерных слоев, обладают схожей геометрией узлов и демонстрируют аналогичные упаковки. Фазовая чистота соединения I была подтверждена методом рентгенофазового анализа (рис. 9). Дифрактограмма массы вещества (поликристаллического порошка), выделенного из синтеза соединения II, демонстрирует, что в результате синтеза было получено две кристаллические фазы, одна из которых соответствует соединению II, а вторая изоструктурна

соединению I (рис. 10). Эти данные указывают на то, что в процессе синтеза соединения II параллельно протекают несколько процессов: кристаллизация неохарактеризованного соединения, изоструктурного соединению I, частичное разложение кластерных анионов  $[\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  с высвобождением в раствор селенид-аниона, взаимодействие селенид-аниона с растворенным Dppe с образованием DppeSe и, наконец, кристаллизация соединения II. Варьирование условий синтеза не позволило селективно получить одну из фаз, однако изменение температуры в диапазоне 100–120 °С приводит к изменению соотношения этих фаз по данным рентгенофазового анализа.



**Рис. 9.** Экспериментальная порошковая дифрактограмма соединения I в поликристаллическом образце (снизу) в сравнении с расчетной по структуре монокристалла (сверху).



**Рис. 10.** Экспериментальная порошковая дифрактограмма соединения II в поликристаллическом образце (снизу) в сравнении с расчетными по структурам монокристаллов соединений I (сверху, сплошная линия) и II (сверху, пунктирная линия).

Атомы серебра обладают высокой аффинностью к атому фосфора и, как следствие, производные трифенилфосфина являются распространенными лигандами для синтеза координационных соединений на основе катионов серебра. Исключением не являются и *бис*(дифенил)фосфины и, в частности, 1,2-*бис*(дифенилфосфин)этан. В литературе таких соединений представлено более ста. Однако для большей части соединений молекула Dppe выступает в качестве линкера, не образуя хелатный комплекс с катионом серебра. В структуре соединений I и II в качестве катионной части выступает димерный фрагмент  $\{(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})\}^{2+}$ . Интересно, что в литературе был найден всего один подобный фрагмент в структуре дискретного соединения  $[\text{Ag}(\text{Dppe})(\mu\text{-Dppe})_2]^{2+}$  [41], где по две молекулы Dppe выступают в качестве мостиковых и хелатных лигандов. Также анализ литературы показал, что Dppe достаточно редко выступает в качестве хелатирующего лиганда в подобных соединениях. На данный момент в Кембриджском банке структурных данных нашлось всего 11 таких соединений [41–52]. Также в структурах соединений, представленных в литературе, можно найти димерные катионные фрагменты  $\{\text{Ag}_2(\mu\text{-Dppe})\}^{2+}$  и  $\{\text{Ag}(\mu\text{-Dppe})_2\}^{2+}$ , где два атома серебра связаны одной или двумя молекулами Dppe, координированными бидентатно. Среди опубликованных структур есть дискретные соединения, где атомы серебра имеют в своем координационном окружении дополнительные терминальные лиганды [53–55], и ряд цепочечных соединений, где лигандом-линкером выступает Dppe [56–59]. В большинстве же

случаев атомы серебра связываются в цепочки через Dppe. В таких цепочках атомы серебра могут быть дополнительно координированы различными терминальными лигандами [56, 60–65]. Добавление полидентатных лигандов в ряде случаев приводит к образованию двумерных полимерных структур за счет связывания цепочек  $\{\text{Ag}(\mu\text{-Dppe})\}$  молекулами-линкерами в слое [66–68]. В случае соединений I и II кластерные комплексы выступают в качестве тетрадентатных металлолинкеров, соединяющих димерные катионные фрагменты серебра, образуя димерную структуру.

Халькоцианидные кластерные комплексы  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  (Q = S или Se) обладают яркой фосфоресценцией в красной области спектра [11]. Ранее было показано, что координационные полимеры на основе таких анионных кластерных комплексов и катионов серебра с N-донорными лигандами демонстрируют люминесцентные характеристики, превосходящие характеристики исходных солей кластерных комплексов с катионами щелочных металлов [30]. Спектры эмиссии соединений I и II демонстрируют полосы, характерные для кластеров  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$ , без заметного вклада комплекса  $\text{Ag}^+$  с лигандом (рис. 11). Квантовые выходы и времена жизни эмиссии сопоставимы с характеристиками твердотельных образцов соответствующих солей  $(\text{Bu}_4\text{N})_4[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]$  (Q = S или Se) [69] (табл. 3).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

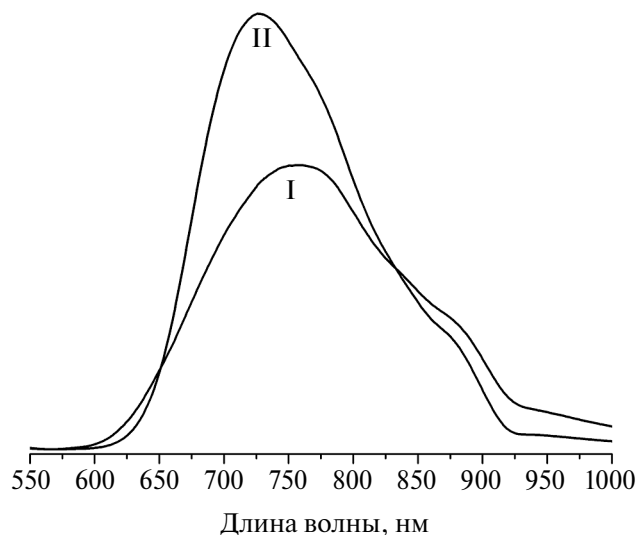


Рис. 11. Спектры фотолюминесценции соединений I и II.

Таблица 3. Основные люминесцентные характеристики твердотельных образцов соединений I и II и солей кластерных комплексов ( $\lambda_{эм}$  — длина волны, соответствующая максимуму спектра люминесценции,  $\tau_{эм}$  — время жизни эмиссии,  $\Phi_{эм}$  — квантовый выход эмиссии)

| Соединение                                                         | Эмиссия порошка  |                   |             |
|--------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------|-------------|
|                                                                    | $\tau_{эм}$ , нм | $\tau_{эм}$ , мкс | $\Phi_{эм}$ |
| I                                                                  | 760              | 13                | 0,02        |
| II                                                                 | 726              | 15                | 0,03        |
| $(\text{Bu}_4\text{N})_4[\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6][69]$  | 746              | 5,8               | 0,021       |
| $(\text{Bu}_4\text{N})_4[\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6][69]$ | 737              | 14,1              | 0,049       |

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Министерство науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку Центр коллективного пользования Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-13-00081). Люминесцентные свойства были изучены в ресурсном центре «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-73-20196-П).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheldon J.C. // J. Chem. Soc. (Resumed). 1962. P. 410.
2. McCarley R.E. // Brown T.M., Inorg. Chem. 1964. Vol. 3. № 9. P. 1232.
3. Kuhn P.J., McCarley R.E. // Inorg. Chem. 1965. Vol. 4. № 10. P. 1482.
4. Spangenberg M., Bronger W. // Angew. Chem. Int. Ed. 1978. Vol. 17. № 5. P. 368.
5. Robin M., Dumait N., Amela-Cortes M., et al. // Chem. Eur. J. 2018. Vol. 24. № 19. P. 4825.
6. Sokolov M.N., Brylev K.A., Abramov P.A., et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. Vol. 2017. № 35. P. 4131.
7. Muravieva V.K., Gayfulin Y.M., Ryzhikov M.R., et al. // Dalton Trans. 2018. Vol. 47. № 10. P. 3366.
8. Vorotnikova N.A., Vorotnikov Y.A., Shestopalov M.A. // Coord. Chem. Rev. 2024. Vol. 500. №, P. 215543.
9. Kirakci K., Shestopalov M.A., Lang K. // Coord. Chem. Rev. 2023. Vol. 481. P. 215048.
10. Nguyen N.T.K., Lebastard C., Wilmet M., et al. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2022. Vol. 23. № 1. P. 547.
11. Yoshimura T., Ishizaka S., Sasaki Y., et al. // Chem. Lett. 1999. Vol. 28. № 10. P. 1121.
12. Ларина Т.В., Икорский В.Н., Васенин Н.Т. и др. // Коорд. химия. 2002. Т. 28. № 8. С. 591.
13. Litvinova Y.M., Gayfulin Y.M., Kovalenko K.A., et al. // Inorg. Chem. 2018. Vol. 57. № 4. P. 2072.
14. Litvinova Y.M., Gayfulin Y.M., Van Leusen J., et al. // Inorg. Chem. Front. 2019. Vol. 6. № 6. P. 1518.
15. Ulantikov A.A., Gayfulin Y.M., Sukhikh T.S., et al. // J. Struct. Chem. Engl. Tr. 2021. Vol. 62. № 7. P. 1009.
16. Naumov N.G., Virovets A.V., Sokolov M.N., et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 1998. Vol. 37. № 13-14. P. 1943.
17. Naumov N.G., Virovets A.V., Artemkina S.B., et al. // J. Solid State Chem. 2004. Vol. 177. № 6. P. 1896.
18. Artemkina S.B., Naumov N.G., Virovets A.V., et al. // Inorg. Chem. Commun. 2001. Vol. 4. № 8. P. 423.
19. Niu G.-H., Wentz H.C., Zheng S.-L., Campbell M.G. // Inorg. Chem. Commun. 2019. Vol. 101. P. 142.
20. Medici S., Peana M., Crisponi G., et al. // Coord. Chem. Rev. 2016. Vol. 327-328. P. 349.
21. Hamze R., Shi S., Kapper S.C., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2019. Vol. 141. № 21. P. 8616.
22. Kakizoe D., Nishikawa M., Degawa T., Tsubomura T. // Inorg. Chem. Front. 2016. Vol. 3. № 11. P. 1381.
23. Romanov A.S., Jones S.T.E., Yang L., et al. // Adv. Opt. Mater. 2018. Vol. 6. № 24. P. 1801347.
24. Lin Y.-Y., Lai S.-W., Che C.-M., et al. // Inorg. Chem. 2005. Vol. 44. № 5. P. 1511.
25. Schmidbaur H., Schier A. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. Vol. 54. № 3. P. 746.
26. Wing-Wah Yam V., Kam-Wing Lo. K., et al. // Coord. Chem. Rev. 1998. Vol. 171. P. 17.

27. Tsukuda T., Kawase M., Dairiki A., et al. // Chem. Commun. 2010. Vol. 46. № 11. P. 1905.
28. Chen J., Teng T., Kang L., et al. // Inorg. Chem. 2016. Vol. 55. № 19. P. 9528.
29. Osawa M., Hashimoto M., Kawata I., Hoshino M. // Dalton Trans. 2017. Vol. 46. № 37. P. 12446.
30. Artem'ev A.V., Shafikov M.Z., Schinabeck A., et al. // Inorg. Chem. Front. 2019. Vol. 6. № 11. P. 3168-3176.
31. Litvinova Y.M., Gayfulin Y.M., Sukhikh T.S., et al. // Molecules. 2022. Vol. 27. № 22. P. 7684.
32. Наумов Н.Г., Вировец А.В., Подберезская Н.В., Федоров В.Е. // Журн. структур. химии. 1997. Vol. 38. № 5. P. 1018.
33. Mironov Y.V., Virovets A.V., Fedorov V.E., et al. // Polyhedron. 1995. Vol. 14. № 20. P. 3171.
34. Sheldrick G.M. et al. // Acta Crystallogr. A. 2015. Vol. 71. P. 3.
35. Sheldrick G. et al. // Acta Crystallogr. C. 2015. Vol. 71. № 1. P. 3.
36. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J., et al. // Appl. Crystallogr. 2009. Vol. 42. № 2. P. 339.
37. Zhao Q., Freeman J.L., Wang J., et al. // Inorg. Chem. 2012. Vol. 51. № 4. P. 2016.
38. Canales S., Villacampa M.D., Laguna A., Gimeno M.C. // J. Organomet. Chem. 2014. Vol. 760. P. 84.
39. Sekar P., Ibers J.A., et al. // Inorg. Chim. Acta. 2001. Vol. 319. № 1. P. 117.
40. Effendy, Di Nicola C., Nitiatmodjo M., et al. // Inorg. Chim. Acta. 2005. Vol. 358. № 3. P. 73547.
41. Huahui Y., Lansun Z., Yunjie X., Qianer Z. // Chin. J. Inorg. Chem. 1992. Vol. 8. №, P. 65.
42. Fournier E., Sicard S., Decken A., Harvey. P.D. // Inorg. Chem. 2004. Vol. 43. № 4. P. 1491.
43. Wang Y.-F., Cui Y.-Z., Li Z.-F., et al. // Chin. J. Struct. Chem. 2017. Vol. 36. P. 812.
44. Zhang Y.-R., Wang M.-Q., Cui Y.-Z., et al. // Chin. J. Inorg. Chem. 2015. Vol. 31. P. 2089.
45. Wei X., Xu C., Li H., et al. // Chem. Sci. 2022. Vol. 13. № 19. P. 5531.
46. Gao S., Li Z.-F., Liu M., et al. // Polyhedron. 2014. Vol. 83. P. 10.
47. Harker C.S.W., Tiekink E.R.T. // J. Coord. Chem. 1990. Vol. 21. № 4. P. 287.
48. Healy P.C., Loughrey B.T., Williams M.L. // Aust. J. Chem. 2012. Vol. 65. P. 811.
49. Lin S., Li Y., Cui Y.-Z., et al. // Chin. J. Inorg. Chem. 2016. Vol. 32. P. 2165.
50. Chee C.F., Lo K.M., Ng S.W. // Acta Crystallogr. E. 2003. Vol. 59. № 5. P. m273.
51. Teo Y.Y., Lo K., Ng S. // Acta Crystallogr. E. 2008. Vol. 64. P. m819.
52. Teo Y.Y., Lo K., Ng S. // Acta Crystallogr. E. 2007. Vol. 63. №, P. M1365-M1367.
53. Shafaei-Fallah M., Anson C.E., Fenske D., Rothenberger A. // Dalton Trans. 2005. Vol., № 13. P. 2300.
54. Kühnert J., Hahn H., Rüffer T., et al. // J. Organomet. Chem. 2013. Vol. 725. P. 60.
55. Li L.-L., Ren Z.-G., Wang J., et al. // J. Mol. Struct. 2008. Vol. 886. № 1. P. 121.
56. Wang X.-J., Langetepe T., Fenske D., Kang. B.-S. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2002. Vol. 628. № 5. P. 1158.
57. Effendy, di Nicola C., Pettinari C., Pizzabiocca A., et al. // Inorg. Chim. Acta. 2006. Vol. 359. № 1. P. 64.
58. Teo P., Koh L.L., Hor T.S.A. // Chem. Commun. 2007. Vol., № 41. P. 4221.
59. Deng L.-R., Wang X.-J., Xiao W., et al. // Chem. Res. Chin. Univ. 2000. № 4. P. 375.
60. Aslanidis P., Cox P.J., Divanidis S., Karagiannidis P. // Inorg. Chim. Acta. 2004. Vol. 357. № 9. P. 2677.
61. Jin Q.-H., Yuan Y., Yang Y.-P., et al. // Polyhedron. 2015. Vol. 101. P. 56.
62. Crespo O., Gimeno M.C., Laguna A., et al. // Dalton Trans. 2014. Vol. 43. № 32. P. 12214.
63. Fenske D., Rothenberger A., Shafaei Fallah M. // Eur. J. Inorg. Chem. 2005. Vol. 2005. № 1. P. 59.
64. Zhang L., Lü X.-Q., Zhang Q., et al. // Trans. Met. Chem. 2005. Vol. 30. № 1. P. 76.
65. Dennehy M., Quinzani O.V., Mandolesi S.D., Burrow R.A. // J. Mol. Struct. 2011. Vol. 998. № 1. P. 119.
66. Yang X., Isaac I., Persau C., et al. // Inorg. Chim. Acta. 2014. Vol. 421. P. 233.
67. Mingsheng H., Peng Z., Ying Z., et al. // Acta Phys. Chim. Sin. 1991. Vol. 7. P. 694.
68. Shawkataly O.B., Sani N.F.A., Rosli M.M., Razali M.R. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2016. Vol. 642. № 5. P. 419.
69. Gray T.G., Rudzinski C.M., Meyer E.E., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2003. Vol. 125. № 16. P. 4755.

# Layered Coordination Polymers Based on the Cluster Complexes $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$ (Q = S or Se) and Dimeric Cations $\{(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})\}^{2+}$

Yu. M. Litvinova<sup>a</sup>, Ya. M. Gaifulin<sup>a</sup>, T. S. Sukhikh<sup>a</sup>, K. A. Brylev<sup>a</sup>, and Yu. V. Mironov<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

\*e-mail: yuri@niic.nsc.ru

The reactions of salts of cluster anions  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  with the  $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$  dicyanoargentate anion in the presence of 1,2-bis(diphenylphosphino)ethane are studied. Two new coordination polymers,  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})]\{\text{Re}_6\text{S}_8(\text{CN})_6\}\cdot\text{H}_2\text{O}\}$  (I) and  $\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))_2(\mu\text{-Dppe})]\{\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6\}\}_{0.85}\{[(\text{Ag}(\text{Dppe}))(\text{Ag}(\text{DppeSe}))(\mu\text{-Dppe})]\{\text{Re}_6\text{Se}_8(\text{CN})_6\}\}_{0.15}\}$  (II), are prepared by the solvothermal synthesis. The XRD study of single crystals of the compounds (CIF files CCDC nos. 2341356 (I) and 2341355 (II)) shows their layered structures. The XRD study of crystalline powders of the compounds shows that the synthesis of compound II leads to the formation of two crystalline phases, one of which is isostructural to compound I. The luminescence parameters of the solid-state compounds (quantum yields, emission lifetimes) resemble the parameters of other coordination polymers based on the  $[\text{Re}_6\text{Q}_8(\text{CN})_6]^{4-}$  ions.

**Keywords:** rhenium, cluster, silver, crystal structure, coordination polymers, luminescence

## REFERENCES

- Sheldon J.C. // J. Chem. Soc. (Resumed). 1962. P. 410.
- McCarley R.E. // Brown T.M., Inorg. Chem. 1964. Vol. 3. № 9. P. 1232.
- Kuhn P.J., McCarley R.E. // Inorg. Chem. 1965. Vol. 4. № 10. P. 1482.
- Spangenberg M., Bronger W. // Angew. Chem. Int. Ed. 1978. Vol. 17. № 5. P. 368.
- Robin M., Dumait N., Amela-Cortes M., et al. // Chem. Eur. J. 2018. Vol. 24. № 19. P. 4825.
- Sokolov M.N., Brylev K.A., Abramov P.A., et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. Vol. 2017. № 35. P. 4131.
- Muravieva V.K., Gayfulin Y.M., Ryzhikov M.R., et al. // Dalton Trans. 2018. Vol. 47. № 10. P. 3366.
- Vorotnikova N.A., Vorotnikov Y.A., Shestopalov M.A. // Coord. Chem. Rev. 2024. Vol. 500. №, P. 215543.
- Kirakci K., Shestopalov M.A., Lang K. // Coord. Chem. Rev. 2023. Vol. 481. P. 215048.
- Nguyen N.T.K., Lebastard C., Wilmet M., et al. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2022. Vol. 23. № 1. P. 547.
- Yoshimura T., Ishizaka S., Sasaki Y., et al. // Chem. Lett. 1999. Vol. 28. № 10. P. 1121.
- Ларина Т.В., Икорский В.Н., Васенин Н.Т. и др. // Коорд. химия. 2002. Т. 28. № 8. С. 591.
- Litvinova Y.M., Gayfulin Y.M., Kovalenko K.A., et al. // Inorg. Chem. 2018. Vol. 57. № 4. P. 2072.
- Litvinova Y.M., Gayfulin Y.M., Van Leusen J., et al. // Inorg. Chem. Front. 2019. Vol. 6. № 6. P. 1518.
- Ulantikov A.A., Gayfulin Y.M., Sukhikh T.S., et al. // J. Struct. Chem. Engl. Tr. 2021. Vol. 62. № 7. P. 1009.
- Naumov N.G., Virovets A.V., Sokolov M.N., et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 1998. Vol. 37. № 13-14. P. 1943.
- Naumov N.G., Virovets A.V., Artemkina S.B., et al. // J. Solid State Chem. 2004. Vol. 177. № 6. P. 1896.
- Artemkina S.B., Naumov N.G., Virovets A.V., et al. // Inorg. Chem. Commun. 2001. Vol. 4. № 8. P. 423.
- Niu G.-H., Wentz H.C., Zheng S.-L., Campbell M.G. // Inorg. Chem. Commun. 2019. Vol. 101. P. 142.
- Medici S., Peana M., Crisponi G., et al. // Coord. Chem. Rev. 2016. Vol. 327-328. P. 349.
- Hamze R., Shi S., Kapper S.C., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2019. Vol. 141. № 21. P. 8616.
- Kakizoe D., Nishikawa M., Degawa T., Tsubomura T. // Inorg. Chem. Front. 2016. Vol. 3. № 11. P. 1381.
- Romanov A.S., Jones S.T.E., Yang L., et al. // Adv. Opt. Mate. 2018. Vol. 6. № 24. P. 1801347.
- Lin Y.-Y., Lai S.-W., Che C.-M., et al. // Inorg. Chem. 2005. Vol. 44. № 5. P. 1511.
- Schmidbaur H., Schier A. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. Vol. 54. № 3. P. 746.
- Wing-Wah Yam V., Kam-Wing Lo K., et al. // Coord. Chem. Rev. 1998. Vol. 171. P. 17.
- Tsukuda T., Kawase M., Dairiki A., et al. // Chem. Commun. 2010. Vol. 46. № 11. P. 1905.
- Chen J., Teng T., Kang L., et al. // Inorg. Chem. 2016. Vol. 55. № 19. P. 9528.
- Osawa M., Hashimoto M., Kawata I., Hoshino M. // Dalton Trans. 2017. Vol. 46. № 37. P. 12446.
- Artem'ev A.V., Shafikov M.Z., Schinabeck A., et al. // Inorg. Chem. Front. 2019. Vol. 6. № 11. P. 3168-3176.
- Litvinova Y.M., Gayfulin Y.M., Sukhikh T.S., et al. // Molecules. 2022. Vol. 27. № 22. P. 7684.
- Naumov N.G., Virovets A.V., Podberezskaya N.V., Federov V.E. // Zh. Strukt. Khim. 1997. № 5. P. 1018.
- Mironov Y.V., Virovets A.V., Fedorov V.E., et al. // Polyhedron. 1995. Vol. 14. № 20. P. 3171.
- Sheldrick G.M. et al. // Acta Crystallogr. A. 2015. Vol. 71. P. 3.

35. *Sheldrick G. et al.* // *Acta Crystallogr. C.* 2015. Vol. 71. № 1. P. 3.
36. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J., et al.* // *Appl. Crystallogr.* 2009. Vol. 42. № 2. P. 339.
37. *Zhao Q., Freeman J.L., Wang J., et al.* // *Inorg. Chem.* 2012. Vol. 51. № 4. P. 2016.
38. *Canales S., Villacampa M.D., Laguna A., Gimeno M.C.* // *J. Organomet. Chem.* 2014. Vol. 760. P. 84.
39. *Sekar P., Ibers J.A., et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2001. Vol. 319. № 1. P. 117.
40. *Effendy, Di Nicola C., Nitiatmodjo M., et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2005. Vol. 358. № 3. P. 73547.
41. *Huahui Y., Lansun Z., Yunjie X., Qianer Z.* // *Chin. J. Inorg. Chem.* 1992. Vol. 8. №, P. 65.
42. *Fournier E., Sicard S., Decken A., Harvey. P.D.* // *Inorg. Chem.* 2004. Vol. 43. № 4. P. 1491.
43. *Wang Y.-F., Cui Y.-Z., Li Z.-F., et al.* // *Chin. J. Struct. Chem.* 2017. Vol. 36. P. 812.
44. *Zhang Y.-R., Wang M.-Q., Cui Y.-Z., et al.* // *Chin. J. Inorg. Chem.* 2015. Vol. 31. P. 2089.
45. *Wei X., Xu C., Li H., et al.* // *Chem. Sci.* 2022. Vol. 13. № 19. P. 5531.
46. *Gao S., Li Z.-F., Liu M., et al.* // *Polyhedron.* 2014. Vol. 83. P. 10.
47. *Harker C.S.W., Tiekink E.R.T.* // *J. Coord. Chem.* 1990. Vol. 21. № 4. P. 287.
48. *Healy P.C., Loughrey B.T., Williams M.L.* // *Aust. J. Chem.* 2012. Vol. 65. P. 811.
49. *Lin S., Li. Y., Cui Y.-Z., et al.* // *Chin. J. Inorg. Chem.* 2016. Vol. 32. P. 2165.
50. *Chee C.F., Lo K.M., Ng S.W.* // *Acta Crystallogr. E.* 2003. Vol. 59. № 5. P. m273.
51. *Teo Y.Y., Lo. K., Ng S.* // *Acta Crystallogr. E.* 2008. Vol. 64. P. m819.
52. *Teo Y.Y., Lo K., Ng. S.* // *Acta Crystallogr. E.* 2007. Vol. 63. №, P. M1365-M1367.
53. *Shafaei-Fallah M., Anson C.E., Fenske D., Rothenberger A.* // *Dalton Trans.* 2005. Vol., № 13. P. 2300.
54. *Kühnert J., Hahn H., Ruffer T., et al.* // *J. Organomet. Chem.* 2013. Vol. 725. P. 60.
55. *Li L.-L., Ren Z.-G., Wang J., et al.* // *J. Mol. Struct.* 2008. Vol. 886. № 1. P. 121.
56. *Wang X.-J., Langetepe T., Fenske D., Kang. B.-S.* // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2002. Vol. 628. № 5. P. 1158.
57. *Effendy, di Nicola C., Pettinari C., Pizzabiocca A., et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2006. Vol. 359. № 1. P. 64.
58. *Teo P., Koh L.L., Hor T.S.A.* // *Chem. Commun.* 2007. Vol., № 41. P. 4221.
59. *Deng L.-R., Wang X.-J., Xiao W., et al.* // *Chem. Res. Chin. Univ.* 2000. № 4. P. 375.
60. *Aslanidis P., Cox P.J., Divanidis S., Karagiannidis P.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2004. Vol. 357. № 9. P. 2677.
61. *Jin Q.-H., Yuan Y., Yang Y.-P., et al.* // *Polyhedron.* 2015. Vol. 101. P. 56.
62. *Crespo O., Gimeno M.C., Laguna A., et al.* // *Dalton Trans.* 2014. Vol. 43. № 32. P. 12214.
63. *Fenske D., Rothenberger A., Shafaei Fallah M.* // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2005. Vol. 2005. № 1. P. 59.
64. *Zhang L., Lü X.-Q., Zhang Q., et al.* // *Trans. Met. Chem.* 2005. Vol. 30. № 1. P. 76.
65. *Dennehy M., Quinzani O.V., Mandolesi S.D., Burrow R.A.* // *J. Mol. Struct.* 2011. Vol. 998. № 1. P. 119.
66. *Yang X., Isaac I., Persau C., et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2014. Vol. 421. P. 233.
67. *Mingsheng H., Peng Z., Ying Z., et al.* // *Acta Phys. Chim. Sin.* 1991. Vol. 7. P. 694.
68. *Shawkataly O.B., Sani N.F.A., Rosli M.M., Razali M.R.* // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2016. Vol. 642. № 5. P. 419.
69. *Gray T.G., Rudzinski C.M., Meyer E.E., et al.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2003. Vol. 125. № 16. P. 4755.