

КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

УДК 541.54:546.49+547.47(544.02)

БИЯДЕРНЫЙ КОМПЛЕКС РТУТИ(II) С D-ГЛЮКОНОВОЙ КИСЛОТОЙ

© 2019 г. И. Г. Конкина¹*, С. П. Иванов¹, Ю. И. Муринов¹¹Уфимский институт химии УфИЦ РАН, Россия, 450054 Уфа, пр-т Октября, 71

*e-mail: irkonk@anrb.ru

Поступила в редакцию 22.03.2018 г.

После доработки 23.05.2018 г.

Принята к публикации 06.07.2018 г.

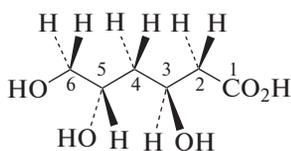
Для получения комплекса ртути с D-глюконовой кислотой (G1) проведена реакция оксида ртути(II) с G1 в водном растворе при мольном соотношении реагентов 1 : 2. Выделенный продукт, по данным элементного анализа, молярной электропроводности, ИК-, электронной, ЯМР-спектроскопии и РСА, отвечает формуле $\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7)_2$ (I) и содержит биядерный катион $(\text{Hg}_2)^{2+}$. Установлено, что комплекс имеет хелатное строение. Каждый атом ртути в I связан с двумя атомами кислорода: от атома углерода карбоксильной группы и от гидроксильной группы при втором атоме углерода в молекуле G1. Два глюконат-иона в комплексе имеют разные конфигурации. Токсичность I в десятки раз меньше, чем токсичность исходного соединения ртути. Использование G1 при взаимодействии с оксидом двухвалентной ртути в водной среде привело к снижению токсичности соединения ртути вследствие ее восстановления до формально одновалентного состояния. Полученные результаты могут быть полезны для изучения процессов детоксикации ртути и применения G1.

Ключевые слова: глюконат ртути(II), структура молекулы, восстановление ртути(II), токсичность

DOI: 10.1134/S0044457X19020119

ВВЕДЕНИЕ

D-Глюконовая кислота, (2R,3S,4R,5R)-2,3,4,5,6-пентагидроксигексановая (G1), относится к группе альдоновых кислот и находит широкое применение в пищевой и фармацевтической промышленности, в производстве косметических продуктов, средств бытовой химии и строительных материалов [1–3].



D-глюконовая кислота

Соли глюконовой кислоты – глюконаты калия [4], магния [5], кальция [6], железа [7, 8], цинка [9, 10] – применяются в виде препаратов в медицинской и ветеринарной практике при лечении недостаточности ионов соответствующих металлов и для активизации иммунитета.

D-глюконовая кислота, содержащая помимо карбоксильной группы пять атомов кислорода гидроксигрупп, способных образовывать донорно-акцепторные связи, уже десятки лет привлекает внимание ученых в качестве полидентатной лиганда, который может координировать ионы металлов при участии различных комбинаций донорных атомов [11–17].

Исследование комплексообразования тяжелых металлов, особенно ртути, весьма актуально с точки зрения более глубокого изучения их свойств в связи с прогрессирующим проникновением в среду обитания человека [18–21], представляющим опасность для живых организмов [22–26], а также с целью подбора реагентов для терапевтического хелатирования [27–30].

В литературе описаны варианты синтеза глюконата ртути(II), продукты которых отличались по составу в зависимости от условий получения. Так, в работе [31] комплекс иона двухвалентной ртути, связанный с двумя глюконат-ионами через атомы кислорода карбоксильной группы и гидроксигруппы при атоме C(2) с предполагаемым $K(\text{Hg}) = 4$ ($\text{Hg}(\text{D-gluconate})_2$), был получен в водном растворе при взаимодействии карбоната ртути(II) с δ -глюконолактоном.

Авторы [32] из нитрата ртути(II) и глюконата натрия в щелочной среде получили соединение, отвечающее формуле $\text{Hg}(\text{D-gluconate})\text{OH}$. Структура этих комплексов не было доказано.

Цель настоящей работы – синтез комплекса ртути с D-глюконовой кислотой при взаимодействии оксида ртути(II) с G1, установление его состава и структуры.

Таблица 1. Основные полосы поглощения в ИК-спектрах G1 и I (см^{-1})

Отнесение полос	G1	I
$\nu(\text{O-H})$	3234 с	3272 с
$\nu(\text{C=O}[\text{COOH}])$	1728 с	—
Смешанные валентно-деформационные колебания $\nu(\text{C-O(H)}), \delta(\text{O-CH}), \delta(\text{C-CH})$	1144 ср	1127 ср
	1210 ср	1203 ср
	1232 ср	1240 ср
	1245 пл	1275 ср
Гибридные колебания $\nu(\text{C-O(H)}), \nu(\text{C-C})$	1102 с	1091 с
	1075 ср	1053 с
	1045 с	1032 с
$\nu_{\text{as}}(\text{COO}^-)$	—	1622 с
$\nu_{\text{s}}(\text{COO}^-)$	—	1394 с

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали желтый оксид ртути(II) квалификации “ч. д. а.” и водный раствор глюконовой кислоты [11], концентрацию которого устанавливали титриметрическим методом.

Синтез проводили в водной среде при дробном добавлении к 10 мл раствора, содержащего 0.98 г глюконовой кислоты (5.0 ммоль), 0.54 г (2.5 ммоль) HgO. Реакционную смесь перемешивали в течение нескольких часов при температуре 50–55°C. Наблюдение за ходом реакции осуществляли методом ИК-спектроскопии по уменьшению интенсивности полосы поглощения валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ карбоксильной группы и увеличению интенсивности полос поглощения симметричных и асимметричных колебаний карбоксилат-аниона. По окончании реакции реакционную смесь фильтровали и маточный раствор оставляли для кристаллизации. Через 7–8 нед. чувствительные к свету и влажности бесцветные игольчатые кристаллы отделяли декантацией и хранили в защищенном от света эксикаторе в атмосфере сухого N_2 . Выход составил 0.82 г. Ниже приведены данные элементного анализа, на основании которых было высказано предположение об образовании соединения с катионом $(\text{Hg}_2)^{2+}$. В этом случае выход комплекса составил 85% от теоретического.

	C	H	Hg
Найдено, мас. %:	17.95;	3.12;	49.75.
Для $\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_{11})_2$ (I)			
вычислено, мас. %:	18.2;	2.81;	50.69.

ИК-спектры соединения I регистрировали на Фурье-спектрометре IR Prestige-21 Shimadzu, отнесение полос проводили по данным [33].

Электронные спектры поглощения (ЭСП) регистрировали на спектрофотометре Specord-M40 (Германия) в кварцевых кюветах ($l = 1.0$ см)

при 20°C. Спектры ЯМР ^1H , ^{13}C записывали на спектрометре Bruker Avance III (рабочая частота 500.1 и 125.7 МГц соответственно). Пробы готовили с концентрацией 30–40 мг для ^{13}C и 10–15 мг для ^1H на 0.5 мл растворителя (D_2O). Химические сдвиги приведены в м.д. для ЯМР ^{13}C и ^1H относительно внутреннего стандарта тетраметилсилана (ТМС).

Электропроводность водных растворов I измеряли на приборе ОК-102/1 Radelkis. Величину мольярной электропроводности оценивали при разведении 1000 л/моль по формуле:

$$\lambda = Knc^{-1} \times 10^3, \text{ л моль}^{-1} \text{ см}^{-1},$$

где K – постоянная ячейки, n – показания прибора, c – концентрация вещества, моль/л.

РСА кристалла соединения I выполняли на четырехкружном автоматическом дифрактометре Siemens-PS при 100 К [34]. Структуру расшифровывали прямым методом и последовательными синтезами электронной плотности. Все расчеты проводили с помощью комплекса программ SHELXTL [35]. Полная кристаллографическая информация соединения I депонирована в Кембриджской базе рентгеноструктурных данных (CCDC 1830013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синтезированный комплекс I исследован методами элементного анализа, ИК-, электронной и ЯМР-спектроскопии. Согласно данным элементного анализа, в результате реакции оксида ртути(II) с G1 образуется комплекс состава 1 : 1, предположительно, с катионом $(\text{Hg}_2)^{2+}$. На основании ИК-спектров (табл. 1) установлено, что G1 в комплексе I находится в форме анионов, так как наблюдается исчезновение полосы поглощения валентных колебаний связи C=O с максимумом поглощения при 1728 см^{-1} и появление полос поглощения, соответствующих валентным асим-

Таблица 2. Параметры спектров ЯМР ^{13}C G1 и I (D_2O , TMC)

Атом углерода	Химический сдвиг, δ , м.д.		Изменение химического сдвига, $\Delta\delta$, м.д.
	$\text{H}-\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$	$\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7)_2$	
1, 7	174.54	177.26	2.72
2, 8	71.05	73.43	2.38
3, 9	70.31	71.64	0.64
4, 10	69.87	70.95	1.08
5, 11	69.43	70.81	1.38
6, 12	61.45	62.52	1.07

метричным (1622 см^{-1}) и симметричным (1394 см^{-1}) колебаниям ионизированных карбоксильных групп COO^- . Известно [36], что разность частот асимметричных и симметричных колебаний ионизированной карбоксильной группы ($\Delta(\nu_{as} - \nu_s)$) используется для определения способа ее координации с металлом. Если ее значение больше 200 см^{-1} , как в данном случае, то карбоксильная группа координируется монодентатно (симметрия C_s).

В ЭСП комплекса I наблюдаются полосы поглощения с максимумами при 235 нм ($2500\text{ л моль}^{-1}\text{ см}^{-1}$) и 355 нм ($650\text{ л моль}^{-1}\text{ см}^{-1}$). Первая полоса, очевидно, относится к $n \rightarrow \pi^*$ переходу в карбонильной группе, вторая – к $n \rightarrow \sigma^*$ переходу в насыщенной части молекулы G1 [37]. Следует отметить, что в спектре глюконата кальция интенсивность первой полосы в несколько раз меньше, а вторая полоса практически не наблюдается, что может свидетельствовать об изменении электронной конфигурации лиганда при взаимодействии с ионами ртути.

В спектре ЯМР ^{13}C (D_2O) максимальное изменение химических сдвигов ядер соответствующих атомов углерода в спектре комплекса по сравнению со спектром реагента наблюдается для атомов C(1)(C(7)) и C(2)(C(8)) (в скобках указаны атомы углерода для второго глюконат-иона в молекуле I) и указывает на координацию через донорные атомы кислорода при этих атомах углерода (табл. 2).

В спектре ЯМР ^1H I присутствуют сигналы, подтверждающие структуру координированного лиганда: $3.57\text{--}3.60\text{ м}$ (1H, $\text{H}_a\text{--C6}$; $\text{H}_a\text{--C12}$), $3.70\text{--}3.80\text{ м}$. (3H, H--C4 ; H--C10 , H--C5 ; H--C11 , $\text{H}_b\text{--6}$; $\text{H}_b\text{--12}$), 4.04 д. д (1H, H--C3 ; C9), 4.34 д (1H, H--C2 ; H--C8), 4.79 уш. с (6H, 6OH).

Результаты РСА подтвердили соотношение реагентов в комплексе I $\text{Hg} : \text{G1} = 1 : 1$ и способ координации лиганда, а также показали, что при образовании соединения I произошло восстановление двухвалентной ртути до формально одновалентной и образовался биядерный комплекс состава $\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_{11})_2$ (рис. 1). В литературе есть примеры восстановления ртути(II) при комплек-

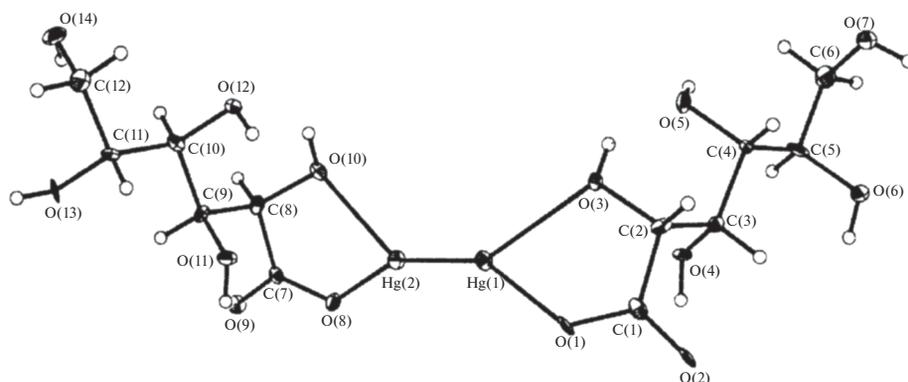


Рис. 1. Структура молекулы в кристалле I. Термические эллипсоиды показаны с 50%-ной вероятностью.

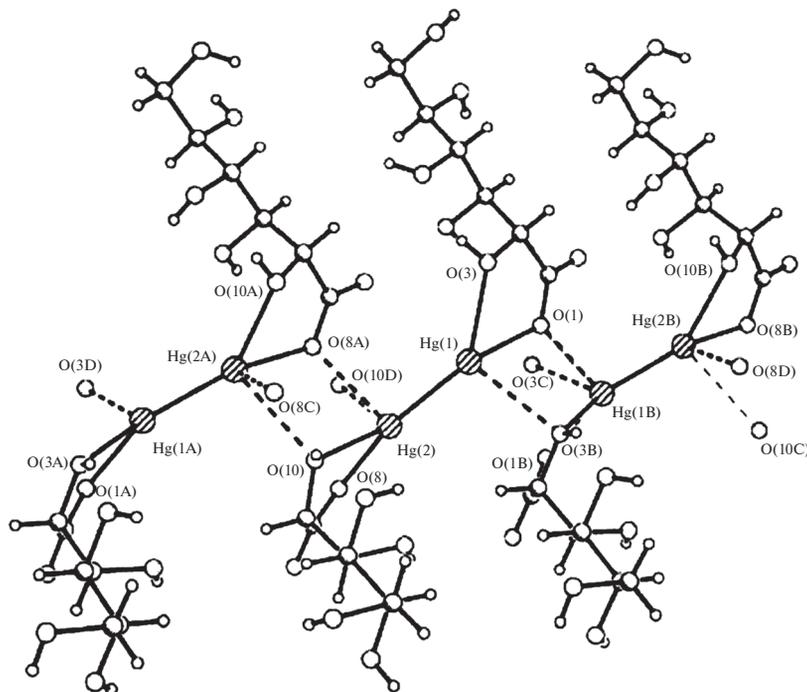


Рис. 2. Координирование атомов ртути в слое. Расстояния Hg(1)...O(3') 2.831(5), Hg(2)...O(8') 2.701(5), Hg(2)...O(10') 2.887(5) Å.

сообразовании: в реакции амидохлорида ртути(II) с производным фосфоновой кислоты [38], при взаимодействии нитрата ртути(II) с полиденатным 18-членным макроциклом [39]. В природной среде наблюдается восстановление ртути в присутствии минерала сидерита (FeCO_3) [40]. Восстановление ртути(II) при взаимодействии с органическими кислотами было отмечено ранее лишь для муравьиной кислоты, которая фактически содержит альдегидную группу [41].

При расшифровке данных РСА было выяснено, что молекулы комплекса I образуют слои путем взаимодействия атомов ртути с атомами кислорода карбоксильных групп соседних молекул (рис. 2). Молекулы при этом имеют S-образное строение.

Авторы [42] при изучении структуры глюконата калия показали возможность существования глюконат-ионов в двух конформациях — “straight-chain” и “bent-chain”.

Представляло интерес оценить конформацию глюконат-ионов в комплексе I. В табл. 3 и 4 для сравнения приведены длины связей и углы между связями для обоих лигандов комплекса I и двух описанных в [42] конформаций. Как показано проведенное сравнение, один из глюконат-ионов в молекуле I имеет усредненную конформацию между straight-chain и bent-chain, а конформация второго более соответствует bent-chain.

Различие в конформациях лигандов графически продемонстрировано на рис. 3 по данным РСА.

В соответствии с результатами РСА состав комплекса был косвенно подтвержден величиной молярной электропроводности. Если для глюконата кальция эта величина составляет $185 \text{ см}^2 \text{ Ом}^{-1} \text{ моль}^{-1}$, что находится в соответствии с характерными значениями для 1 : 2 электролитов в воде, то для I она составляет только $115 \text{ см}^2 \text{ Ом}^{-1} \text{ моль}^{-1}$, т.е. величину, характерную для 1 : 1 электролитов.

Известно, что соединения формально одновалентной ртути в значительной степени менее токсичны, чем соответствующие по составу соединения ртути(II). Если, например, сулема относится к классу высокоопасных соединений (ЛД_{50} 37 мг/кг) [43], то малотоксичная каломель используется в медицинской практике для внутреннего употребления [44].

ЛД_{50} I для мышей при внутрижелудочном способе введения составила 680 мг/кг, что соответствует (по классификации ГОСТ 12.1.007.76) классу умеренно опасных соединений. Комплекс I существенно отличается по токсичности от соединений ртути(II) с органическими кислотами (например, в паспорте безопасности ацетата ртути указано: смертельно опасный при вдыхании, проглатывании или попадании на кожу [45]) и

Таблица 3. Сравнение длин связей в глюконат-ионах в составе комплекса I с двумя известными конформациями глюконат-ионов в KGI

Связь	Длина связи, n (Å)			Δ , Å	
	в I (табл. 3)	в KGI [15] с конформацией		$\Delta = n(I) - n(\text{KGI straight})$	$\Delta = n(I) - n(\text{KGI bent})$
		straight-chain	bent-chain		
O(1)–C(1)	1.289	1.259	1.263	0.030	0.026
O(2)–C(1)	1.226	1.246	1.232	0.020	0.006
O(3)–C(2)	1.432	1.420	1.409	0.012	0.023
O(4)–C(3)	1.431	1.413	1.426	0.008	0.005
O(5)–C(4)	1.436	1.429	1.418	0.007	0.023
O(6)–C(5)	1.411	1.414	1.429	0.003	0.018
O(7)–C(6)	1.436	1.418	1.414	0.018	0.022
				$\Delta_{\text{cp}} = 0.012$	$\Delta_{\text{cp}} = 0.018$
O(8)–C(7)	1.288	1.259	1.263	0.029	0.023
O(9)–C(7)	1.229	1.246	1.232	0.017	0.003
O(10)–C(8)	1.458	1.420	1.409	0.008	0.019
O(11)–C(9)	1.436	1.413	1.426	0.023	0.010
O(12)–C(10)	1.433	1.429	1.418	0.004	0.015
O(13)–C(11)	1.434	1.414	1.429	0.020	0.005
O(14)–C(12)	1.422	1.418	1.414	0.004	0.008
				$\Delta_{\text{cp}} = 0.015$	$\Delta_{\text{cp}} = 0.012$
C(1)–C(2)	1.511	1.534	1.535	0.023	0.024
C(2)–C(3)	1.540	1.533	1.531	0.007	0.009
C(3)–C(4)	1.520	1.537	1.529	0.017	0.009
C(4)–C(5)	1.532	1.531	1.540	0.002	0.008
C(5)–C(6)	1.502	1.519	1.518	0.017	0.016
				$\Delta_{\text{cp}} = 0.013$	$\Delta_{\text{cp}} = 0.013$
C(7)–C(8)	1.524	1.534	1.535	0.010	0.011
C(8)–C(9)	1.519	1.533	1.531	0.014	0.012
C(9)–C(10)	1.526	1.537	1.529	0.013	0.005
C(10)–C(11)	1.542	1.531	1.540	0.011	0.002
C(11)–C(12)	1.526	1.519	1.518	0.007	0.008
				$\Delta_{\text{cp}} = 0.011$	$\Delta_{\text{cp}} = 0.007$

Таблица 4. Сравнение углов между связями в глюконат-ионах в составе комплекса I с соответствующими углами в двух известных конформациях глюконат-иона в KGI

Угол	φ , град			$ \Delta \varphi$, град	
	в I (табл. 3)	в KGI [15] с конформацией		$\varphi(I) - \varphi(\text{KGI straight})$	$\varphi(I) - \varphi(\text{KGI bent})$
		straight-chain	bent-chain		
C(1)C(2)C(3)	111.0	112.0	108.2	2.0	1.8
C(4)C(3)C(2)	113.1	110.8	114.5	2.8	1.4
C(3)C(4)C(5)	111.4	114.8	115.7	3.4	4.3
C(6)C(5)C(4)	112.1	110.4	115.0	2.7	2.9
				$\Delta_{\text{cp}} = 2.7$	$\Delta_{\text{cp}} = 2.6$
C(7)C(8)C(9)	108.3	112.0	108.2	3.7	0.1
C(8)C(9)C(10)	114.2	110.8	114.5	3.4	0.3
C(9)C(10)C(11)	111.3	114.8	115.7	3.5	4.4
C(10)C(11)C(12)	113.1	110.4	115.0	3.7	1.9
				$\Delta_{\text{cp}} = 3.6$	$\Delta_{\text{cp}} = 1.7$

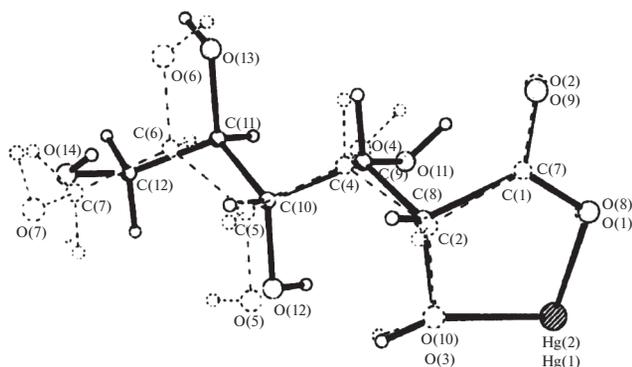


Рис. 3. Сравнение конформации лигандов в кристалле I.

почти в 40 раз менее токсичен, чем исходное соединение [46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимодействие D-глюконовой кислоты с оксидом двухвалентной ртути в водной среде привело к снижению токсичности реакционной массы вследствие восстановления ртути до формально одновалентного состояния и к образованию биядерного комплекса $\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_{11})_2$, в молекулах которого два координированных глюконат-иона имеют разные конфигурации.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем глубокую признательность бывшему сотруднику ИНЭОС РАН З.А. Стариковой за выполнение РСА кристалла $\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_{11})_2$, а также сотрудникам лаборатории новых лекарственных средств УФИХ УФИЦ РАН за определение острой токсичности соединения $\text{Hg}_2(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_{11})_2$. ИК- и ЯМР-спектры записаны на оборудовании ЦКП «Химия» УФИХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dinc S., Kara M., Oqut M. et al. // Hacettepe J. Biol. Chem. 2017. V. 45. № 4. P. 603. doi 10.15671/HJBC.2018.203
2. Pandey A., Negi S., Soccol C.R. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Production, Isolation and Purification of Industrial Products. Elsevier, 2016. 886 p.
3. Ramachandran S., Fontanille P., Pandey A., Larroche C. // Food Technol. Biotechnol. 2006. V. 44. № 2. P. 185. doi 10.1007/s12010-008-8209-0
4. Wang Y., Nomura N., Zeniya M. et al. // J. Med. Dent. Sci. 2018. V. 65. № 1. P. 35. doi 10.11480/jmds.650105
5. Trivedi M.K., Dixit N., Panda P. et al. // J. Pharm. Analysis. 2017. V. 7. № 5. P. 332. doi 10.1016/j.jpha.2017.03.006
6. Chen X., Yang Z., Metric P.X. // Am. J. Emerg. Med. 2017. V. 35. № 8. P. 1209e1. doi 10.1016/j.ajem.2017.04.006
7. Rajakaruna R.M.P.I., Ariyaratna I.R., Karunaratne D.N. // Ceylon J. Sci. 2016. V. 45. № 2. P. 3. doi 10.4038/cjs.v45i2.7384
8. Lanzkowsky's Manual of Pediatric Hematology and Oncology / Eds. Lanzkowsky P., Lipton J., Fish J. Elsevier, 2016. 788 p.
9. Hemilä H., Chalker E. // Cochrane Database of Systematic Reviews. 2017. № 9. Art. № CD012808. doi 10.1002/14651858.CD012808
10. Elseweidy M.M., Ali A-M.A., Elabidine N.Z., Mursey M. // Biomed. Pharmacother. 2017. V. 95. P. 317. doi 10.1016/j.biopha.2017.08.081
11. Фиалков Я.А., Перышкина Н.Г. // Журн. неорганической химии. 1957. Т. 2. № 4. С. 749.
12. Angyal S.J. // Pure Appl. Chem. 1973. V. 35. P. 131. doi 10.1351/pac197335020131
13. Ashtan J.F., Pickering W.F. // Austral. J. Chem. 1976. V. 23. P. 1367. doi 10.1071/CH9701367
14. Amin M.A., Refat M.S. // Arabian J. Chem. 2013. V. 6. P. 165. doi 10.1016/j.arabj.2010.09.030
15. Konkina I.G., Ivanov S.P., Murinov Yu.I. et al. // Pharm. Chem. J. 2002. V. 36. № 1. P. 18. [Конкина И.Г., Иванов С.П., Муринов Ю.И. и др. // Хим.-фарм. журн. 2002. № 1. С. 18. doi 10.1023/A:101579262]
16. Konkina I.G., Ivanov S.P., Murinov Yu.I. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2003. V. 48. № 6. P. 880. [Конкина И.Г., Иванов С.П., Муринов Ю.И. и др. // Журн. неорганической химии. 2003. Т. 48. № 6. С. 979.]
17. Князева О.А., Уразаева С.И., Конкина И.Г. и др. // Казанский мед. журн. 2018. Т. 99. № 2. С. 255. doi 10.17816/KMJ2018-255
18. Gray J.E., Theodorakos P.M., Fey D.L., Krabbenhoft D.P. // Environ. Geochem. Health. 2015. V. 37. P. 35. doi 10.1007/s10653-014-9628-1
19. Wang S., Zhong T., Chen D., Zhang X. // Sustainability. 2016. № 8. P. 795. doi 10.3390/su8080795
20. Луковникова Л.В., Сидорин Г.И., Аликбаева Л.А., Галошина А.В. // Токсикологический вестник. 2017. № 5. С. 2.
21. Кунер Р.А. Экология и токсикология ртути. [Электронный ресурс]. <http://chemister.ru/Toxicology/ecologija-i-toxicologija-rtuti.htm>.
22. Genchi G., Sinicropi M.S., Carocci A. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. № 1. P. 74. doi 10.3390/ijerph14010074
23. Peregrina-Chávez A.G., Ramírez-Galindo M.del-R., Chávez-Martínez R. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2018. V. 15. № 4. P. 657. doi 10.3390/ijerph15040657
24. Шинетова Л.Е., Бекеева С.А. // Вестн. Казахского национ. мед. ун-та. 2017. № 1. С. 370.
25. Hassan S.A., Abbott L.C. // J. Vet. Anat. 2017. V. 10. № 1. P. 49.
26. Morcillo P., Esteban M.A., Cuesta A. // AIMS Environmental Science. 2017. V. 4. № 3. P. 386. doi 10.3934/environsci.2017.3.386

27. Björklund G., Mutter J., Aaseth J. // Arch. Toxicol. 2017. V. 91. P. 3787. doi 10.1007/s00204-017-2100-0
28. Aaseth J., Skaug M.S., Cao Y., Andersen O. // J. Trace Elem. Med. Biol. 2015. V. 31. P. 260. doi 10.1016/j.jtemb.2014.10.001
29. Cao Y., Skaug M.A., Andersen O., Aaseth J. // J. Trace Elem. Med. Biol. 2015. V. 31. P. 188. doi 10.1016/j.jtemb.2014.04.010
30. Aaseth J., Ajsuvakova O.P., Skalny A.V. et al. // Coord. Chem. Rev. 2018. V. 358. № 1. P. 1. doi 10.1016/j.ccr.2017.12.011
31. Tajmir-Reahi H.A. // Can. J. Chem. 1989. V. 67. P. 651. doi 10.1139/v89-098
32. Escandar G.M., Salas Peregrin J.M., Sierra M.G. et al. // Polyhedron. 1996. V. 15. № 13. P. 2251. doi 10.1016/0277-5387(95)00478-5
33. Svehla G., Wilson C.L. Analytical Infrared Spectroscopy (Comprehensive Analytical Chemistry. 6) / Ed. Svehla G. Elsevier Science, 1976.
34. Konkina I.G., Starikova Z.A., Lybeckyi D.V., Muri-nov Yu.I. // Russ. J. Phys. Chem. 2005. V. 79. № 12. P. 1987. [Конкина И.Г., Старикова З.А., Любецкий Д.В., Муринов Ю.И. // Журн. физ. химии. 2005. Т. 79. № 11. С. 2227.]
35. Sheldrick G.M. SHELXTL 5.10. Bruker AXS. Madison. Wisconsin, USA, 1998.
36. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: Пер с англ. М.: Мир, 1991. 536 с.
37. Казыцына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектроскопии в органической химии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 240 с.
38. Somov N.V., Chausov F.F., Zakirova R.M. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2018. V. 44. № 2. P. 109. [Сомов Н.В., Чаусов Ф.Ф., Закирова Р.М. и др. // Коорд. химия. 2018. Т. 44. № 1. С. 20. doi 10.7868/SO132344X18010036]
39. Sujin Seo S., Ju H., Kim S. // Inorg. Chem. 2016. V. 55. № 21. P. 11028. doi 10.1021/acs.inorgchem.6b01583
40. Ha J., Zhao X., Yu R. et al. // Appl. Geochem. 2017. V. 78. P. 211. doi 10.1016/j.apgeochem.2016.12.017
41. Берль-Лунге Э. Химико-технические методы исследования. Т. 3. Ленинград: ОНТИ "Химтеорет", 1941. 582 с.
42. Panagiotopoulos N.C., Hamilton W.C. // Acta Crystallogr. 1974. V. 30B. P. 1421. doi 10.1107/S0567740874005012
43. Яды, противоядия. Доза яда. Характеристики токсичности. [Электронный ресурс]. <http://www.kristallikov.net/page53.html>.
44. Машковский М.Д. Лекарственные средства: пособие для врачей. М.: Новая волна, 2011. 1216 с.
45. Паспорт безопасности в соответствии с Постановлением (ЕУ) № 1907/2006. Ртуть(II) уксуснокислая. <http://www.merckmillipore.com/.../web>.
46. Material Safety Data Sheet Mercuric oxide MSDS. <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9924619>.