

СТРУКТУРА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 547.461'62+547.233.3+539.26

СТРУКТУРА ТРИС(2-ГИДРОКСИЭТИЛ)АММОНИЙНЫХ СОЛЕЙ ЯНТАРНОЙ КИСЛОТЫ

© 2018 г. С. В. Логинов*, И. А. Даин, В. Б. Рыбаков^{1,**}, Е. Н. Офицеров^{2,***},
Д. А. Гордеев, П. А. Стороженко

Научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, Москва

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Российский химико-технологический университет, Москва

*E-mail: florasilik@yandex.ru

**E-mail: Rybakov20021@yandex.ru

***E-mail: ofitser@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2016 г.

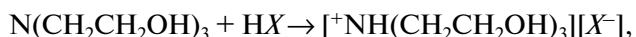
Синтезированы и структурно исследованы соли янтарной кислоты — сукцинат трис-(2-гидрокси-этил)аммония ($C_6H_{16}NO_3)_2^+C_4H_4O_4^{2-}$ (кристаллы моноклинные, пр. гр. $P2_1/c$, $Z = 4$) и гидросукцинат трис-(2-гидроксиэтил)аммония ($C_6H_{16}NO_3)^+C_4H_5O_4^-$ (кристаллы моноклинные, пр. гр. $P2_1/c$, $Z = 4$). Рассмотрены особенности пространственного строения трис(2-гидроксиэтил)аммонийных солей янтарной кислоты. Показана роль межмолекулярных электростатических взаимодействий в стабилизации структуры и образовании продуктов состава 1 : 1 и 1 : 2 в случае янтарной кислоты.

DOI: 10.7868/S0023476118010125

ВВЕДЕНИЕ

Трис-(2-гидроксиэтил)амин или триэтанол-амин (ТЭА) и его производные находят широкое применение в различных областях [1]. Принято считать, что ТЭА биологически мало активен, однако соли и соединения атрановой структуры на его основе обладают широким спектром биологической активности [2, 3]. Исходя из основного постулата теории химического строения органических соединений: “структура определяет свойства”, представляет определенный интерес выяснение влияния среды, состояния атома азота и аниона в случае солей на изменение пространственного строения триэтанольного каркаса и в связи с этим свойств, поскольку соединения с так называемой протатрановой структурой $[N(CH_2CH_2OH)_3H]^+X^-$ активно используются в качестве адаптогенов и регуляторов роста растений, например трис-(2-гидроксиэтил)аммониевая соль *o*-крезоксисукусной кислоты $[N(CH_2CH_2OH)_3H]^+CH_3C_6H_4OCH_2COO^-$ [4], а часть из них относятся также к так называемым “ионным жидкостям”, т.е. органическим солям с температурой плавления не более 100°C, активно исследуемым зарубежными авторами для применения в различных технических областях (гетерогенный катализ, лубриканты, фармацевтика и т.д.) [5].

К достоинствам соединений с протатрановой структурой кроме биологической активности относится доступность синтеза. Реакции образования легко протекают при температурах 40–60°C, чаще всего в спиртовой среде:



где X^- — анион кислоты.

Получаемые соединения представляют собой водорастворимые бесцветные (белые или желтоватые) твердые вещества, а в некоторых случаях — прозрачные вязкие жидкости.

Наибольший интерес вызывают факторы, определяющие пространственное строение триэтанольного каркаса. Последний может существовать в виде нескольких устойчивых конформаций, не переходящих друг в друга в условиях выделения соединений и обладающих различной реакционной способностью.

Особенностью катионов ТЭА-структур является их существование в двух принципиально отличающихся друг от друга конформациях. Образующиеся структуры ТЭА условно разбивают на два класса — эндо-конформеры (протатраны) (схема 1a) и экзо-конформеры (схема 1b, 1c) [6] с их различными вариациями или отклонениями от канонических форм.

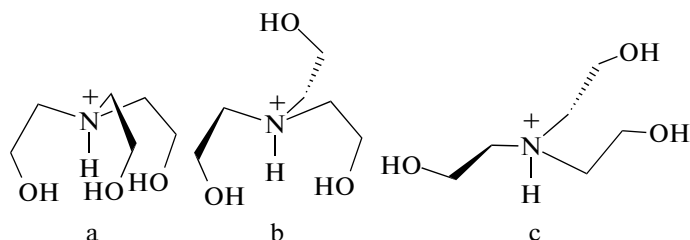


Схема 1. Конформационные типы структур катиона трис(2-гидроксиэтил)аммония: а — протатрановая, б — квазипротатрановая, с — гипопротатрановая.

Превращения одной формы в другую под действием физических факторов не было зарегистрировано, а данные по конформации специфичны для солей с различными анионами или числом анионов, например в случае гидроксималеината [6] и иодида трис(2-гидроксиэтил)аммония [7] отмечено образование исключительно протатрановой структуры без перехода в экзо-конформер. Анализ причин такого превращения в литературе отсутствует.

Как говорилось выше, исходный ТЭА в кристаллическом состоянии (рис. 1) существует в форме протатрана в виде димера [8], в котором 2-гидроксиэтильные фрагменты окружают неподеленную электронную пару азота; при этом атомы кислорода двух молекул через межмолекулярные водородные связи $O-H\cdots O$ образуют шестичленный цикл в конформации кресла (схема 2), а атом азота имеет эндо-ориентацию, которая уменьшает его нуклеофильные свойства [9].

Эндо-ориентация атома азота обусловлена особенностями геометрического строения и мак-

симальным количеством водородных связей, приходящих на одну молекулу, поскольку трансаннулярной связи $N-H$ в данном димере нет [10]. Последнее позволяет надеяться на синтез в ряду протатранов соединений с различными заместителями по атому азота.

Геометрия катиона несколько различается в различных протатранах и экзо-конформере; так длины связей $N-C$ в молекулах не одинаковы и варьируют в пределах $1.463(2)–1.515(4)$ Å [7]. Из-за обилия межмолекулярных водородных связей структура катиона значительно отличается от идеально симметричной модели, к которой наиболее близки протатраны ряда галогенводородных кислот.

В данном сообщении приведены результаты определения молекулярной структуры двух сукцинатов трис-(2-гидроксиэтил)аммония состава 1 : 2 (I) и 1 : 1 (II).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез сукцината трис-(2-гидроксиэтил)аммония ($C_6H_{16}NO_3^+ \cdot C_4H_4O_4^{2-}$ (I). К раствору 5.90 г (0.05 моль) янтарной кислоты в смеси 60 мл изопропилового спирта (75% об.) и 20 мл гексана (25% об.) добавляли при перемешивании 14.92 г (0.10 моль) ТЭА. Смесь перемешивали при нагревании до $55^\circ C$, образовавшиеся кристаллы про-

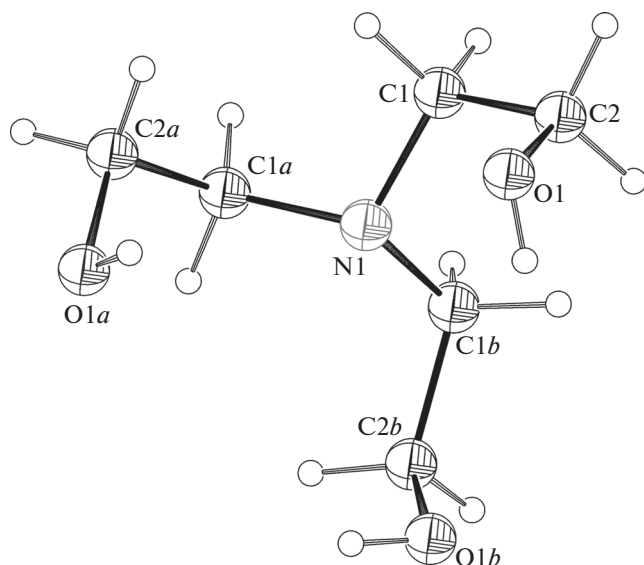


Рис. 1. Строение молекулы триэтанолamina в кристаллическом состоянии [8].

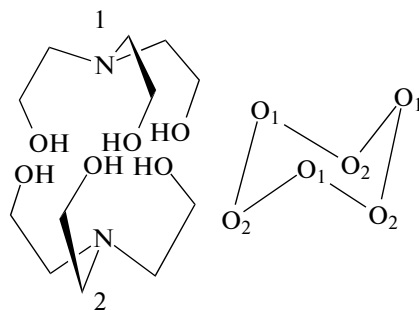


Схема 2. Строение димера кристаллического триэтанолamina (показана конформация, образуемая атомами кислорода мономеров 1 и 2).

Таблица 1. Кристаллографические характеристики, данные эксперимента и уточнения структур $C_{16}H_{36}N_2O_{10}$ (I) и $C_{10}H_{21}NO_7$ (II)

Сингония, пр. гр., Z	Моноклинная, $P2_1/c$, 4	
$a, b, c, \text{\AA}$	16.8227(7), 5.4300(2), 23.0105(10)	11.5876(6), 11.4349(7), 9.9948(5)
β , град	99.140(4)	99.027(4)
$V, \text{\AA}^3$	2075.26(15)	1307.94(12)
D_x , г/см ³	1.333	1.357
Излучение, λ , $\text{\AA}$	CuK α , 1.5418	
μ , см ⁻¹	0.934	0.983
T , К	295 (2)	
Размер образца, мм	0.2 $\times$ 0.2 $\times$ 0.2	0.1 $\times$ 0.1 $\times$ 0.1
Дифрактометр	STOE STADI VARI PILATUS-100K	
Тип сканирования	ω	
Учет поглощения; $T_{\min}$, $T_{\max}$	DIFABS; 0.536, 2.214	нет
$\theta_{\max}$, град	70.31	71.35
Пределы h, k, l	$-20 \leq h \leq 20, 0 \leq k \leq 6, 0 \leq l \leq 27$	$-14 \leq h \leq 11, -13 \leq k \leq 10, -11 \leq l \leq 12$
Число отражений: измеренных/независимых (N_1), R_{int}/c $I > 2\sigma(I)$ (N_2)	7368/3784, 0.0217/1778	5429/2516, 0.0625/2119
Метод уточнения	Полноматричный МНК по F^2	
Число параметров	261	184
Учет экстинкции, коэффициент	Нет	SHELXL, 0.0186(15)
R_1/wR_2 по N_1	0.1204/0.1020	0.0474/0.1105
R_1/wR_2 по N_2	0.0578/0.0845	0.0405/0.1074
S	0.791	1.040
$\Delta\rho_{\max}/\Delta\rho_{\min}$, э $\text{\AA}^{-3}$	0.297/−0.179	0.267/−0.228
Программы	X-Area [11], SHELX [12], ORTEP-3 [13], WinGX [14]	

мывали гексаном, сушили на воздухе в течение 1 сут. Выход продукта: 18.43 г (88.5%). Температура плавления: 69–71°C. ЯМР ^1H (DMSO- d_6 , δ , м.д.): 2.367 (с., 4H, CH_2COO), 2.673 (т., 12H, 3NCH_2), 3.465 (т., 12H, 3OCH_2). ИК-спектр (KBr), $\nu/\text{см}^{-1}$: 1577 (C=O); 3355 (O–H).

Синтез гидросукцината трис-(2-гидроксиэтил)аммония ($\text{C}_6\text{H}_{16}\text{NO}_3$)⁺ · $\text{C}_4\text{H}_5\text{O}_4$ [−] (II). К раствору 5.90 г (0.050 моль) янтарной кислоты в смеси 200 мл изопропилового спирта с водой при 40°C добавляли при перемешивании 3.73 г (0.025 моль) ТЭА. Смесь перемешивали при постоянной температуре в течение 30 мин, после чего отгоняли 50 мл растворителя на роторном испарителе до помутнения. Кубовый остаток выдерживали в течение 20 ч при комнатной температуре, после чего образовавшиеся кристаллы отфильтровывали, промывали гексаном, сушили на воздухе в течение 1 сут. Выход продукта: 5.55 г (84.5%). Температура плавления: 76–79°C. ЯМР ^1H (DMSO- d_6 , δ , м.д.): 2.375 (с., 4H, CH_2COO), 2.744 (т., 6H, 3NCH_2), 3.498 (т., 6H, 3OCH_2). ИК-спектр (KBr), $\nu/\text{см}^{-1}$: 1644 (C=O); 3356 (O–H).

Спектр ЯМР ^1H регистрировали на спектрометре BrukerAM-360 с рабочей частотой 360.13 МГц. Спектр записывали при комнатной температуре в DMSO- d_6 . Химические сдвиги в спектре ^1H ЯМР приведены в δ -шкале.

Рентгеноструктурный анализ монокристаллов I и II проводили на дифрактометре STOE STADI-VARI PILATUS-100K (Stoe© & Cie). Кристаллографические характеристики, данные эксперимента и уточнения структур приведены в табл. 1.

Обе структуры решены прямым методом и уточнены в анизотропном приближении для неводородных атомов. Позиции атомов водорода, связанных с атомами углерода, определялись из геометрических соображений. Атомы водорода при атомах азота и кислорода локализованы в разностном синтезе электронной плотности и уточнялись в изотропном приближении.

Кристаллографическая информация депонирована в Кембриджской базе структурных данных (CCDC № 1047792 (I), 1481436 (II)).

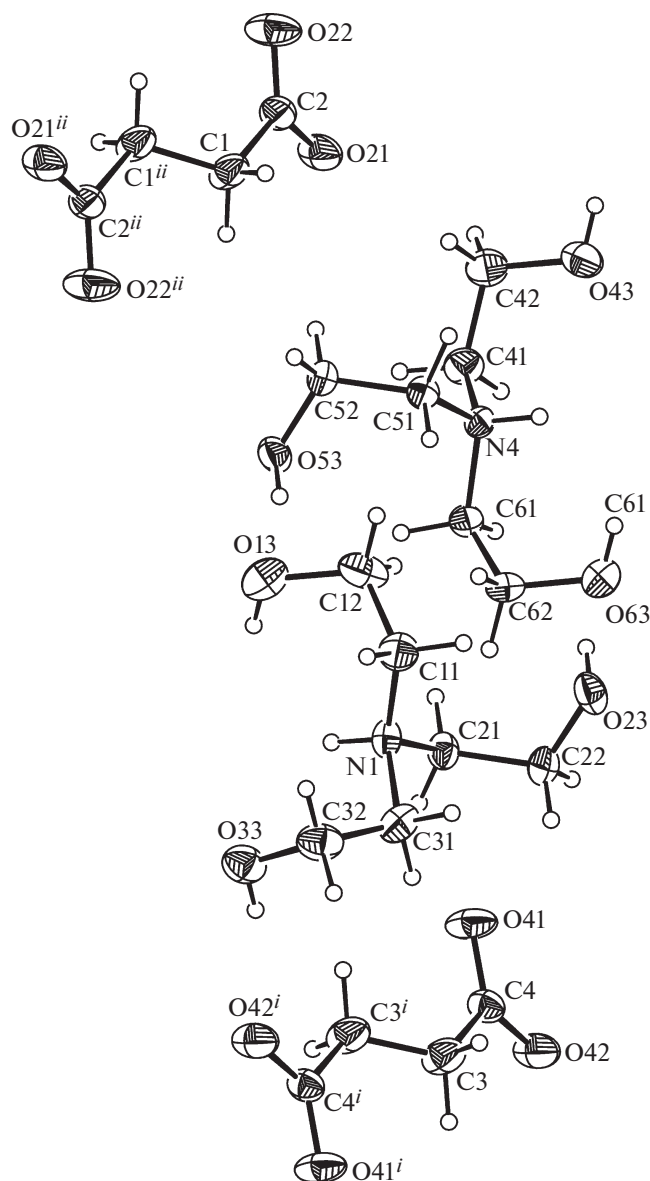


Рис. 2. Фрагмент структуры **I** и нумерация атомов в нем. Здесь и на рис. 3 анизотропные параметры смещения атомов приведены с вероятностью 50%. Атомы водорода показаны кругами произвольного радиуса.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно на рис. 2 и 3, в катионе **I** две из трех гидроксиэтильных ветвей имеют эндо-конформацию, т.е. он существует в квазипротатрановой форме (схема 1b), в то время как в катионе **II** все три гидроксиэтильных ветви имеют эндо-конформацию, отвечающую протатрановой форме (схема 1a).

В экзо-конформере сукцината и ТЭА 1 : 2 (**I**) длины связей C—C в катионах (N1) и (N4) находятся в пределах 1.440(1)–1.499(4) Å (рис. 2, табл. 2). Близкие значения наблюдаются и в протатрановом катионе соли сукцината 1 : 1 (**II**) – 1.5063(18),

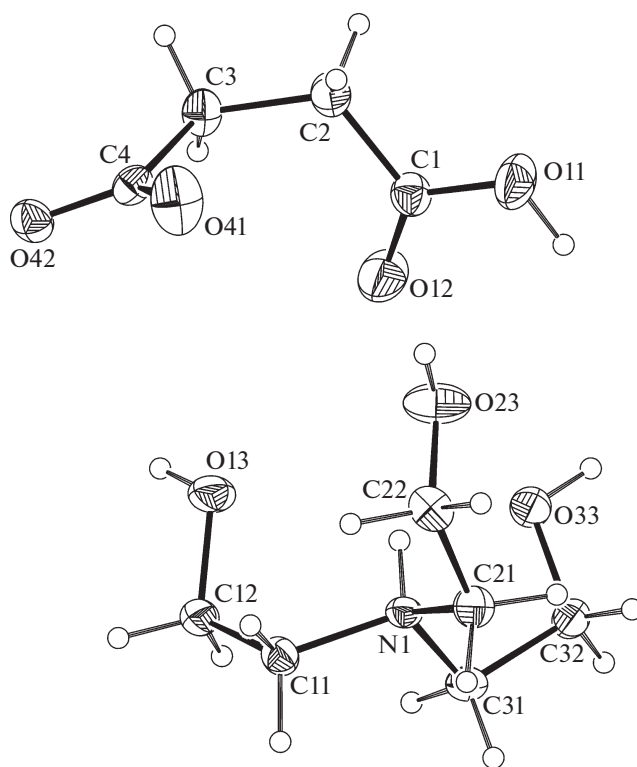


Рис. 3. Фрагмент структуры **II** и нумерация атомов в нем.

1.503(2) и 1.5042(18) Å (табл. 3). Приведенные данные свидетельствуют, что эта связь обладает повышенным порядком вне зависимости от количества окружающих анионов.

Расстояния N...O в эндо-ветвях катиона **I** составляют 2.928–2.956 Å, т.е. они увеличены как относительно классических атрановых (2.450–2.660 Å) [6], так и протатрановых структур (2.741–2.799 Å в гидроксималеинате трис(2-гидроксиэтил)аммония) [6], и стремятся к значениям в структуре самого ТЭА (2.991 Å) [8]. Это свидетельствует о более низкоэнергетическом характере межатомного взаимодействия кислорода и азота при переходе от атранов к протатранам и от протатранов к экзо-конформерам.

Геометрия фрагмента N—H...O в эндо-ветвях катиона N(1) (H...O 2.58 и 2.58 Å, N—H...O 104.6 и 105.4 Å) отвечает обычным для протатрановых структур внутримолекулярным водородным связям [7, 10] (табл. 4), тогда как в катионе N(4) ориентация атома H63 препятствует образованию таких связей.

Предположительно на конформацию катионов влияют одновременно стерический и электростатический фактор, но для конкретных выводов в литературе недостаточно данных, в особенности экзо-конформеров, чья структура впервые подробно описывается в данной статье.

Таблица 2. Отдельные межатомные расстояния d (Å) и валентные углы ω (град) в структуре **I**

Связь	d	Связь	d
N1–C11	1.477(4)	N4–C61	1.503(3)
N1–C21	1.503(3)	N4–C41	1.501(3)
N1–C31	1.560(4)	N4–C51	1.514(3)
N1–H1	0.89(3)	N4–H4	0.95(3)
C11–C12	1.476(4)	C41–C42	1.485(4)
C12–O13	1.450(5)	C42–O43	1.434(5)
C21–C22	1.491(4)	C51–C52	1.499(4)
C22–O23	1.394(4)	C52–O53	1.388(3)
C31–C32	1.440(5)	C61–C62	1.489(4)
C32–O33	1.382(4)	C62–O63	1.403(4)
C3–C3 ⁱ	1.449(7)	C1–C1 ⁱⁱ	1.457(6)
C3–C4	1.502(4)	C1–C2	1.501(4)
C4–O41	1.225(3)	C2–O22	1.222(3)
C4–O42	1.264(3)	C2–O21	1.257(3)
Угол	ω	Угол	ω
O21–C2–O22	124.6(2)	O63–C62–C61	110.4(3)
O41–C4–O42	123.0(2)	C12–C11–N1	113.4(3)
O21–C2–C1	118.2(2)	C22–C21–N1	115.7(3)
O22–C2–C1	117.2(2)	C32–C31–N1	113.5(3)
O41–C4–C3	118.7(2)	C42–C41–N4	112.9(2)
O42–C4–C3	118.3(2)	C52–C51–N4	116.1(2)
C1–C1–C2	116,3(3)	C62–C61–N4	113.8(2)
C3–C3–C4	115.9(3)	C11–N1–C21	117.0(2)
O13–C12–C11	110.0(3)	C11–N1–C31	111.3(2)
O23–C22–C21	115.8(2)	C21–N1–C31	109.7(2)
O33–C32–C31	111.4(3)	C41–N4–C51	114.7(2)
O43–C42–C41	109.2(3)	C41–N4–C61	106.6(2)
O53–C52–C51	115.4(2)	C51–N4–C61	113.9(2)

Симметрические преобразования: (i) $-x + 2, -y, -z + 1$; (ii) $-x + 1, -y, -z + 2$.

Валентные углы N–C–C в эндо-ветвях **I** ($112.8(7)^\circ$ – $113.8(3)^\circ$) увеличены по сравнению с таковыми в гидроксималеинате [6] ($110.0(6)^\circ$ – $110.7(2)^\circ$) и гидроксисукцинате **II** ($111.0(7)^\circ$ – $112.0(3)^\circ$), углы C–C–O равны $109.2(3)^\circ$ – $111.4(3)^\circ$. В экзо-ветвях аналогичные углы увеличены до 115° – 116° , в результате чего расстояния N...O увеличиваются до 3.07 и 3.05 Å, т.е. до нормального ван-дер-ваальсова контакта.

Углы C–N–H в эндо-ветвях близки к тетраэдрическому (хотя с довольно большим разбросом, 107.5° – 114.9°), тогда как в экзо-ветвях уменьшены до 98° – 99° . Валентные углы C–N–C в катио-

Таблица 3. Отдельные межатомные расстояния d (Å) и валентные углы ω (град) в структуре **II**

Связь	d	Связь	d
N1–C11	1.5033(16)	N1–C21	1.5023(16)
N1–C31	1.5031(16)	N1–H1	0.871(15)
C11–C12	1.5063(18)	C12–O13	1.4046(16)
O13–H13	0.84(2)	C21–C22	1.503(2)
C22–O23	1.3967(18)	O23–H23	0.77(2)
C31–C32	1.5042(18)	C32–O33	1.4085(16)
O33–H33	0.89(2)	O11–C1	1.3040(17)
O11–H11	0.93(3)	O12–C1	1.2019(18)
C1–C2	1.489(2)	C2–C3	1.5124(19)
C3–C4	1.5092(18)	C4–O41	1.2410(16)
C4–O42	1.2567(16)		
Угол	ω	Угол	ω
O11–C1–O12	124.31(14)	O23–C22–C21	107.63(11)
O11–C1–C2	112.02(12)	O33–C32–C31	107.48(10)
O12–C1–C2	123.65(13)	C12–C11–N1	111.08(11)
C1–C2–C3	115.50(12)	C22–C21–N1	111.55(11)
C2–C3–C4	114.82(11)	C32–C31–N1	112.02(10)
C3–C4–O41	117.54(12)	C11–N1–C21	112.21(10)
C3–C4–O42	117.37(11)	C11–N1–C31	111.47(9)
O41–C4–O42	124.99(13)	C21–N1–C31	111.80(10)
O13–C12–C11	106.95(10)		

нах **I** также заметно различаются (106.6° – 117.0°) в отличие от аналогичных, описанных в [10].

Значения торсионных углов τ вокруг связей C–C эндо-ветвей катиона в **I** $60.2(3)^\circ$ – $63.2(4)^\circ$ попадают в интервал известных значений для ТЭА и его производных ($-46.8(2)^\circ$ – $67.5(3)^\circ$), что соответствует *транс-гош*-конформации [10]. Торсионные углы экзо-ветвей **I** имеют близкие по модулю значения $-63.9(3)^\circ$ и $-64.5(3)^\circ$. Аналогичные торсионные углы в катионе трис(2-гидроксиэтил)аммония в **II** (рис. 3) имеют существенно меньшие значения ($53.14(14)^\circ$ и $56.00(15)^\circ$), что демонстрирует большую напряженность связей в протатране.

Оба сукцинат-аниона в соединении **I** расположены в центрах симметрии (середины связей C1–C1ⁱⁱ и C3–C3ⁱ). Катионы (N1) и (N4) **I** образуют две межмолекулярные водородные связи N–H...O между собой и четыре межмолекулярные связи O–H...O с сукцинат-анионами (табл. 4).

Таблица 4. Геометрические параметры водородных связей в структуре **I**

$D-H\cdots A$	$D-H$, Å	$H\cdots A$, Å	$D\cdots A$, Å	$D-H\cdots A$, град
$N1-H1\cdots O23^i$	0.89(3)	1.99(3)	2.843(4)	160(2)
$N1-H1\cdots O13$	0.89(3)	2.58(2)	2.928(3)	104.6(19)
$N1-H1\cdots O33$	0.89(3)	2.58(2)	2.937(3)	105.4(19)
$O13-H13\cdots O23^i$	0.82	2.24	3.062(3)	175.4
$O23-H23\cdots O22^{ii}$	0.82	1.84	2.621(3)	158.6
$O33-H33\cdots O42^{iii}$	0.82	1.94	2.700(3)	153.6
$N4-H4\cdots O53^{iv}$	0.95(3)	2.00(3)	2.898(3)	156(2)
$O43-H43\cdots O21^{iv}$	0.82	1.91	2.692(3)	160.0
$O53-H53\cdots O41^v$	0.82	1.86	2.664(2)	167.9
$O13-H13\cdots N1$	0.82	2.62	2.928(3)	104.29
$O63-H63\cdots O63^{iv}$	0.82	2.18	2.990(3)	167.79
$O23-H23\cdots O23^{ii}$	0.82	2.99	3.719(3)	149.84
$O63-H63\cdots N4$	0.82	2.63	2.956(3)	105.81

Симметрические преобразования: (i) $x, y-1, z$; (ii) $-x+1, y+1/2, -z+3/2$; (iii) $-x+2, -y, -z+1$; (iv) $x, y+1, z$; (v) $x, -y+1/2, z+1/2$.

В отличие от **I** анион в структуре **II** имеет лишь одну депротонированную карбоксильную группу, т.е. представляет собой гидросукцинат-анион, находящийся в общем положении.

В катионе **II**, имеющем протатрановую конформацию, углы $C-C-O$, как и $N-C-C$ в гидроксипропиловых фрагментах (табл. 3), имеют меньшие значения, чем в эндо-ориентированных ветвях **I**. Валентные углы $C-N-H$ имеют близкие

значения $-107.5(8)^\circ, 107.4(8)^\circ, 106.0(8)^\circ$, углы $C-N-C$ также находятся в узком диапазоне значений (табл. 3).

Внутрикатионные водородные связи в **II** имеют достаточно близкие расстояния $H\cdots O$ (2.29, 2.37 и 2.32 Å, табл. 5) в отличие от существенно больших в **I** — 2.58 Å, что указывает на общее ослабление водородных связей в экзо-конформере **I**. Катион **II** также образует четыре прочные межмолекулярные водородные связи (табл. 5).

Как следует из полученных данных, пространственное и электронное строение ТЭА-каркаса имеет свои особенности. На основе анализа литературных [8, 10, 15] и полученных в настоящей работе данных необходимо выделить три основных типа структур ТЭА-каркаса: структуру исходного ТЭА, протатрановые и атрановые структуры, не считая промежуточных типов, например квазипротатрановые [15, 16] и гипопротатрановые [17] (схема 1с). Различие этих каркасов проявляется в перераспределении типа и количества водородных связей, одновременно с чем существенно изменяется распределение отрицательного заряда неподеленной электронной пары атомов кислорода, обеспечивающего электростатические межмолекулярные взаимодействия. На этот факт в литературе внимание не обращается, хотя именно межмолекулярные взаимодействия фермент-субстрат определяют активность различных соединений в биологических системах. Таким образом, выявленная впервые возможность существования экзо- и эндо-конформеров катионов трис(2-гидроксиэтил)аммония для двух анионов одной кислоты ставит вопрос о целесообразности применения узкого термина “протатран” ко всем ионным производным ТЭА, как это имеет место в [2, 9, 15, 17].

Таблица 5. Геометрические параметры водородных связей в структуре **II**

$D-H\cdots A$	$D-H$, Å	$H\cdots A$, Å	$D\cdots A$, Å	$D-H\cdots A$, град
$N1-H1\cdots O13$	0.871(15)	2.296(13)	2.7480(14)	112.3(10)
$N1-H1\cdots O23$	0.871(15)	2.379(13)	2.7902(16)	109.3(10)
$N1-H1\cdots O33$	0.871(15)	2.322(13)	2.7758(14)	112.5(10)
$O13-H13\cdots O42^i$	0.84(2)	1.87(2)	2.6985(14)	169(2)
$O23-H23\cdots O12$	0.77(2)	2.01(2)	2.7722(17)	170(2)
$O33-H33\cdots O42^{ii}$	0.89(2)	1.82(2)	2.7027(13)	169.1(18)
$O11-H11\cdots O41^{iii}$	0.93(3)	1.62(3)	2.5358(17)	166(2)

Симметрические преобразования: (i) $x, y+1, z$; (ii) $-x+1, y+1/2, -z+1/2$; (iii) $-x+2, y+1/2, -z+1/2$.

ВЫВОДЫ

Впервые определены молекулярные и кристаллические структуры солей янтарной кислоты с ТЭА. Обнаружено, что в них существует как минимум два ряда солей, в которых ТЭА-катион имеет разную структуру (протатрановую в соли состава 1 : 1 и квазипротатрановую в соли состава 1 : 2) и разное электронное строение, обусловленное ориентацией неподеленной электронной пары атомов кислорода в катионах.

Авторы выражают благодарность А.В. Кисину (АО “ГНИИХТЭОС”) за регистрацию и помощь в интерпретации спектров ЯМР и ИК.

Работа выполнена с использованием оборудования (дифрактометра STOE STADI VARI PILATUS-100K), приобретенного по программе развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fuime M., Heldreth B., Bergfeld W. et al.* // Int. J. Toxicol. 2013. V. 32. № 1. P. 59.
2. *Адамович С.Н., Мирскова А.Н., Воронков М.Г. и др.* // Журн. орган. химии. 2009. Т. 79. № 6. С. 1043.
3. *Pernak J., Syguda A., Janiszewska D. et al.* // Tetrahedron. 2011. V. 67. P. 4838.
4. *Воронков М.Г., Расулов М.М.* // Хим.-фарм. журн. 2001. Т. 41. № 1. С. 3.
5. *Shamshina J., Kelley S., Gurau G. et al.* // Nature. 2015. V. 528. P. 188.
6. *Логинов С.В., Гордеев Д.А., Даин И.А., Офицеров Е.Н.* // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 43. № 9. С. 66.
7. *Воронков М.Г., Зельбст Э.А., Беляева В.В.* // Докл. РАН. 2014. Т. 455. № 2. С. 167.
8. *Mootz D., Brodalla D., Wiebcke M.* // Acta Cryst. C. 1989. V. 45. P. 754.
9. *Du M., Yin X., Gong H.* // Mater. Lett. 2015. V. 152. P. 40.
10. *Воронков М.Г., Корлюков А.А., Зельбст Э.А. и др.* // Журн. структур. химии. 2014. Т. 55. № 1. С. 117.
11. *Stoe & Cie, X-Area: Program for the Acquisition and Analysis of Data* // Stoe & Cie GmbH, Darmstadt, Germany, 2014.
12. *Sheldrick G.M.* // Acta Cryst. A. 2015. V. 71. P. 3.
13. *Farrugia L.J.* // J. Appl. Cryst. 1997. V. 30. P. 565.
14. *Farrugia L.J.* // J. Appl. Cryst. 2012. V. 45. P. 849.
15. *Адамович С.Н.* Дисс. д-ра хим. наук “Атраны и ионные комплексы в дизайне биологически активных соединений”. Иркутск: ИИХ, 2014.
16. *Verkade J.G.* // Coord. Chem. Rev. 1994. V. 137. P. 233.
17. *Воронков М.Г., Корлюков А.А., Кочина Т.А., Зельбст Э.А.* // Журн. структур. химии. 2013. Т. 54. № 1. С. 198.