

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЕЙ 1- R_1 -3-НИТРО-4- R_2 -5- R -1,2,4-ТРИАЗОЛИЕВ И 3-НИТРО-1-[1'-(3'-НИТРО-4'-МЕТИЛ-5'- R -1',2',4'-ТРИАЗОЛИЙ-1'-ИЛ)- R_1]-3-НИТРО-4-МЕТИЛ-5- R -1,2,4-ТРИАЗОЛИЕВ

А.Г. Суханова, Г.Т. Суханов, Ю.В. Филиппова

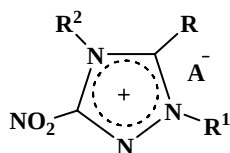
Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий
Сибирского отделения РАН

В работе приводится сравнительный анализ спектральных характеристик исходных 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов, 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-5'- R -1',2',4'-триазол-1'-ил)- R_1]-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов и продуктов их кватернизации – алкилсульфатов, перхлоратов, динитрамидов 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиев.

Ключевые слова: нитротриазолиевые соли, структура, спектроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

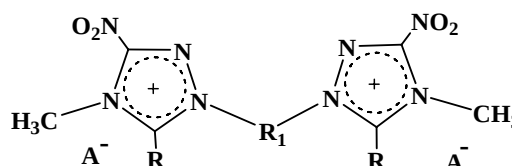
Нитротриазолиевые соли (НТС) – это новый тип ионных материалов, в том числе содержащие энергетические анионы динитрамида (ДНА) и хлорной кислоты (ХК). В настоящей работе представлен сравнительный анализ спектральных характеристик (ИК-, ЯМР ^1H и ^{13}C) от количества и типа алкильных заместителей у циклических атомов азота гетероцикла и типа аниона (для НТС) 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов, 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-5'- R -1',2',4'-триазол-1'-ил)- R_1]-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов, моно- и бициклических НТС. Объектами исследований выбраны моноциклические (рисунок 1) [1 – 3] и бициклические (схема 2) [4] НТС с различными анионами кислородсодержащих кислот (метилсульфат, этилсульфат, перхлорат, динитрамид) и различными алкильными заместителями у атома углерода C_5 и атомов азота N_1 и N_4 гетероцикла.



$R=R_1=R_2=\text{CH}_3$ (1 – 3); $R_1=\text{C}_2\text{H}_5$, $R_2=\text{CH}_3$, $R=\text{H}$ (4, 5); $R_1=R_2=\text{CH}_3$, $R=\text{C}_2\text{H}_5$ (6 – 8); $R_1=R_2=\text{C}_2\text{H}_5$, $R=\text{H}$ (9 – 11); $R_1=\text{CH}_3$, $R=R_2=\text{C}_2\text{H}_5$ (12); $R_1=i\text{-Pr}$, $R_2=\text{CH}_3$, $R=\text{H}$ (13); $R_1=i\text{-Pr}$, $R_2=\text{C}_2\text{H}_5$, $R=\text{H}$ (14, 15); $R_1=t\text{-Bu}$, $R_2=\text{CH}_3$, $R=\text{H}$ (16); $R_1=t\text{-Bu}$, $R_2=\text{C}_2\text{H}_5$, $R=\text{H}$ (17, 18); $R=R_1=\text{CH}_3$, $R_2=\text{C}_2\text{H}_5$ (19); $A=\text{RSO}_4$, $R=\text{CH}_3$ (1, 4, 6); $A=\text{RSO}_4$, $R=\text{C}_2\text{H}_5$ (9, 14, 17); $A=\text{N}(\text{NO}_2)_2$ (2, 5, 8, 11 – 13, 15, 16, 18, 19); $A=\text{ClO}_4$ (3, 7, 10).

Рисунок 1. Общая формула солей 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев

Синтез НТС осуществлен рядом последовательных стадий. Первая из которых алкилирование 3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов галогеналканами или диалкил-сульфатами (ДАС) в присутствии щелочи [5] или третбутиловым спиртом в кислой среде [6]. Из 3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов выбраны первые представители гомологического ряда ($R = \text{H}$, CH_3 , C_2H_5). В результате алкилирования получены соответствующие 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолы с большой четверкой алкильных заместителей в положении N_1 гетероцикла (CH_3 , C_2H_5 , $i\text{-Pr}$, $t\text{-Bu}$). Алкилированием 3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов 1,2-дибромэтаном, 1,3-дибромпропаном или 1-хлор-2-(2-хлорэтокси)этаном в присутствии щелочи получены бициклические N_1, N_1' -замещенные производные [7, 8].



$R_1=(\text{CH}_2)_2\text{O}-(\text{CH}_2)_2$: $R = \text{H}$ (20 – 22), $R = \text{CH}_3$ (23 – 25); $A^- = \text{CH}_3 \text{SO}_4^-$ (20, 23), $A^- = \text{N}(\text{NO}_2)_2^-$ (21, 24), $A^- = \text{ClO}_4^-$ (22, 25); $R_1 = -(\text{CH}_2)_2-$: $R = \text{H}$ (26 – 28), $R = \text{CH}_3$ (29 – 31), $A^- = \text{CH}_3\text{SO}_4^-$ (26, 29), $A^- = \text{N}(\text{NO}_2)_2^-$ (27, 30), $A^- = \text{ClO}_4^-$ (28, 31); $R_1 = -(\text{CH}_2)_3-$: $R = \text{H}$ (32 – 34), $A^- = \text{CH}_3 \text{SO}_4^-$ (32), $A^- = \text{N}(\text{NO}_2)_2^-$ (33), $A^- = \text{ClO}_4^-$ (34).

Рисунок 2. Общая формула солей 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиев

Селективная кватернизация 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов или 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-5'- R -1',2',4'-триазол-1'-ил)- R_1]-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов наиболее эффективными кватернизирующими агентами (диметил- или диэтилсульфатом) в положение N_4

гетероцикла приводит к образованию соответствующих алкилсульфатов 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев ($R_2 = \text{CH}_3, \text{C}_2\text{H}_5$) или 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'- R_2 -5'- R -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев ($R_2 = \text{CH}_3$).

Анионным обменом алкилсульфатов НТС с аммониевыми или калиевыми солями хлорной кислоты или динитрамида с высоким выходом получены соответствующие динитрамиды и перхлораты 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиев.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектры PMR^1H и $\text{ЯМР}^{13}\text{C}$ снимали на спектрометре «Bruker AM-400» с рабочей частотой 400.2 МГц в растворе DMCO-d_6 , внутренний стандарт DMCO-d_6 , ИК спектры – на приборе «PERKIN-ELMER» в таблетке с KBr.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качественном анализе НТС полезна колебательная спектроскопия. Анионы синтезированных НТС проявляются в ИК-спектрах в характерной для каждого из них области поглощения (таблицы 1 и 2). Алкилсульфаты и перхлораты проявляются в спектрах интенсивными уширенными полосами в областях, соответственно, $1225 \div 1235 \text{ см}^{-1}$ и $1080 \div 1119 \text{ см}^{-1}$ [9], анион динитрамида имеет интенсивные полосы в ИК-спектрах в пределах $1513 \div 1530 \text{ см}^{-1}$, $1171 \div 1195 \text{ см}^{-1}$, $999 \div 1013 \text{ см}^{-1}$ [9, 10].

В ИК-спектрах моно- и бициклических НТС (таблицы 1 и 2) присутствуют полосы поглощения нитрогруппы в области синфазных $1325 \div 1345 \text{ см}^{-1}$ и симметричных валентных антифазных колебаний $1514 \div 1565 \text{ см}^{-1}$, наиболее характеристичные по частоте для 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов [5, 11, 12]. Но при сравнении исходных 1- R_1 -алкил-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов и полученных из них НТС наблюдается смещение полос поглощения в высокочастотную область. Наибольшее смещение отмечено на примере синфазных колебаний нитрогруппы. Например, синфазные колебания нитрогруппы 1- R_1 -алкил-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов ($R = R_1 = \text{CH}_3$ – **35**; $R = \text{H}$: $R_1 = \text{C}_2\text{H}_5$ – **36**; $R_1 = i\text{Pr}$ – **37**), соответственно 1312 см^{-1} , 1305 см^{-1} и 1305 см^{-1} , а для полученных из них солей $1335 \div 1353 \text{ см}^{-1}$ (соли **1 – 3**, **19**, полученные из триазола **35**), $1313 \div 1336 \text{ см}^{-1}$ (соли **4**, **5**, **9**

– **11**, полученные из триазола **36**) и $1322 \div 1335 \text{ см}^{-1}$ (соли **13 – 15**, полученные из триазола **37**). Аналогичная картина наблюдается и на бициклических производных. Синфазные колебания нитрогруппы для исходных N_1, N_1' -замещенных производных находятся в области N_1, N_1' -этилен- ($1310 \div 1315 \text{ см}^{-1}$), N_1, N_1' -пропилен- (1306 см^{-1}) и N_1, N_1' -этоксипропилен- ($1309 \div 1310 \text{ см}^{-1}$), а у полученных из них солей в области, соответственно $1338 \div 1345 \text{ см}^{-1}$, $1326 \div 1334 \text{ см}^{-1}$ и $1336 \div 1342 \text{ см}^{-1}$. Отличительной особенностью НТС является то, что в полосе антифазных валентных колебаний нитрогруппы солей 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиев появляется дополнительное плечо в области $1563 \div 1600 \text{ см}^{-1}$ [2], что, видимо, связано с частичным выходом нитрогруппы из плоскости кольца. В целом синфазное и антифазное поглощение нитрогруппы моно- и бициклических НТС мало зависят от типа аниона.

Синфазные колебания нитрогруппы синтезированных моно- и бициклических НТС чувствительны к структуре и местоположению заместителей у циклических атомов азота гетероцикла. Для солей 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев синфазные колебания нитрогруппы зависят от типа алкильного заместителя у циклических атомов азота N_1 . Для N_1 -алкил- N_4 -метилзамещенных НТС **1 – 8**, **13**, **16** синфазные колебания нитрогруппы находятся в интервале $1313 \div 1345 \text{ см}^{-1}$. В целом с увеличением длины цепи алкильного заместителя в ряду $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$, $-i\text{C}_3\text{H}_7$, $-t\text{C}_4\text{H}_9$ они смещаются в низкочастотную область. Если для N_1 -метил-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиевых солей **1 – 3**, **6 – 8** синфазные колебания нитрогруппы находятся в области $1335 \div 1345 \text{ см}^{-1}$, то в N_1 -этил- **4**, **5**, N_1 -изопропил- **13**, N_1 -третбутил- **16** 3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиевых солях они смещаются в область меньших частот $1313 \div 1336 \text{ см}^{-1}$. Для бициклических нитротриазолиевых солей синфазные колебания нитрогруппы с N_1, N_1' -этиленовым мостиком **26 – 31** находятся в интервале $1335 \div 1342 \text{ см}^{-1}$, с N_1, N_1' -этоксипропиленовым мостиком **20 – 25**, в интервале $1335 \div 1345 \text{ см}^{-1}$, что соответствует области, аналогичной для N_1 -метилзамещенных 3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиевых солей **1 – 3**, **6 – 8**, а для N_1, N_1' -пропиленовых производных **32 – 34** – в области 1326 см^{-1} , аналогичной для N_1 -этил- **4**, **5** и N_1 -изопропилзамещенных **13** 3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиевых солей.

Наиболее характерной отличительной особенностью исходных 1- R_1 -3-нитро-5- R_2 -1,2,4-триазолов и их кватернизованных аналогов является существенное смещение резонанса протонов заместителей при атоме углерода C_5 гетероцикла, что происходит вследствие приобретения гетероциклом положительного заряда и уменьшения магнитного экранирования протонов. Наиболее существенные отличия в протонных спектрах исходных N_1 -алкил-3-нитро-5- R_2 -1,2,4-триазолов и НТС на их основе связаны с резонансом кольцевого протона C_5 . При образовании катионов нитротриазолиев по сравнению с исходными нитротриазолами повышается кислотность протона при атоме углерода C_5 гетероцикла. В результате в спектрах ЯМР 1H протон при этом атоме углерода 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -5- R_3 -1,2,4-триазолиев по сравнению с исходными 1- R_1 -3-нитро-5- R_2 -1,2,4-триазолами значительно смещается на $1,34 \div 1,82$ м.д. в область слабых полей. Так, если в 1- R_1 -3-нитро-5- R_2 -1,2,4-триазилах (с заместителями у атома азота N_1 в ряду $R_1 = -CH_3, -C_2H_5, -i-C_3H_7, -t-C_4H_9$) резонанс C_5H протонов проявляется синглетом в области $8,67 \div 8,95$ м.д. [5, 6, 13], то в продуктах их кватернизации ДАС, соответствующих солях 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -5- R_3 -1,2,4-триазолиев **4, 5, 9, 11, 13 – 18**, находится в области $10,31 \div$

$10,49$ м.д. Синглет протона при атоме углерода C_5 гетероцикла 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -1,2,4-триазолиевых солей не зависит от типа аниона (в ряду алкилсульфат, динитрамид, перхлорат) и незначительно зависит от заместителей у атомов азота N_1 и N_4 . С увеличением длины цепи заместителей у N_1 -моноциклических 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -1,2,4-триазолиевых солей **4, 5, 9, 11, 13 – 18** сигнал кольцевого протона смещается в область слабых полей $10,43 \div 10,49$ м.д., по сравнению с N_1, N_1 -бициклическими солями 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-1,2,4-триазолиев (**20 – 34**) – $10,29 \div 10,41$ м.д.

Заместители у атома углерода C_5 гетероцикла всех НТС 1- R_1 -3-нитро-5- R_2 -4- R_3 -1,2,4-триазолиев и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R_1 -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R_2 -1,2,4-триазолиев проявляются в достаточно узком спектральном интервале в виде: характерного синглета при $R = H$ в области $10,31 \div 10,49$ м.д. (рисунок 3); синглета при $R = CH_3$ для моноциклических в области $2,86 \div 2,92$ м.д., для бициклических в области $2,80 \div 3,10$ м.д.; квадруплета и триплета при $R = C_2H_5$, соответственно, в области $3,31 \div 3,35$ м.д. и $1,25 \div 1,28$ м.д. (рисунок 4).

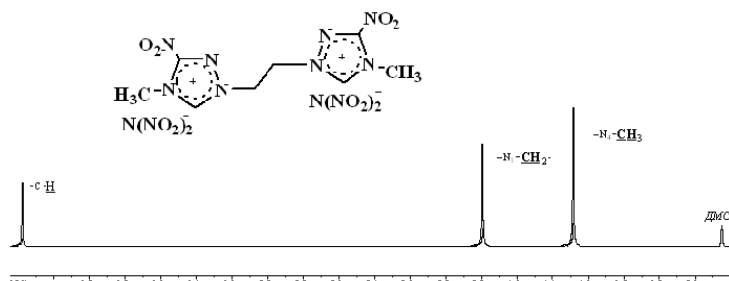


Рисунок 3. Типичный ЯМР 1H -спектр для бициклических солей на примере динитрамида **27**

Резонанс протонов метильных групп при атоме углерода C_5 солей **1 – 3, 19, 60, 31 и 23, 23, 24** и протонов C_2H_5 -группы солей **6 – 8, 12**, связанных с кольцевым атомом углерода C_5 в исследуемом ряду анионов (таблицы 1 и 2), незначительно зависит от его типа.

Алкилирующим агентом для кватернизации 3-нитро-5- R_2 -1,2,4-триазолов преимущественно выбран диметилсульфат, поэтому заместителем у атома азота N_4 в образующихся солях 3-нитро-1- R_1 -4- R_2 -5- R_3 -1,2,4-триазолиев у всех в представленной работе солей (кроме солей 1-алкил-4-этил-3-нитро-1,2,4-триазолиев **10, 11, 12, 14, 15, 17 – 19**) является CH_3 -группа. В солях **10, 11, 12, 14, 15, 17 – 19** сигналы протонов этильной груп-

пы проявляются соответствующим квадруплетом N_4-CH_2 группы при $4,53 \div 4,56$ м.д. и триплетом для CH_3 группы при $1,42 \div 1,57$ м.д.

Сигналы протонов метильной группы, связанной с атомом азота N_4 , проявляются в спектрах ЯМР 1H по одному для каждого вещества характерному синглету, не зависят от аниона и для алкилсульфатов, перхлоратов и динитрамидов 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R_3 -1,2,4-триазолиев **1 – 8, 11, 13, 16** и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R_1 -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R_2 -1,2,4-триазолиев **20 – 34** проявляются в области $3,93 \div 4,24$ м.д. Кроме того, синглеты протонов метильных групп N_4-CH_3 динитрамидов не зависят от

типа заместителя у атома азота N_1 и в ряду N_1 -метил- (**2**, **8**, **13**, **16**), N_1, N_1' -этилен- (**27**, **30**), N_1, N_1' -пропилен- (**33**), N_1, N_1' -этоксипропилен- (**21**, **24**) как для 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазиоловых солей, так и для 3-нитро-1-[1'-

(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазиолой-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазиоловых солей и находятся в интервале $4,05 \div 4,24$ м.д.

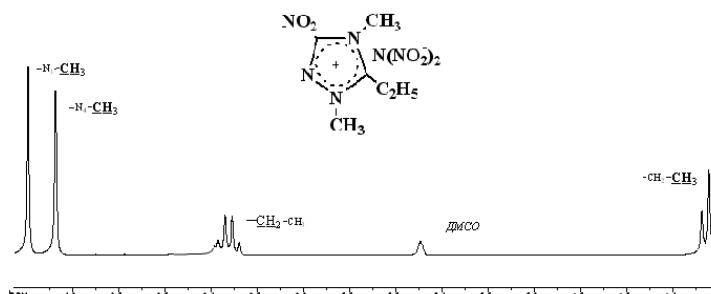


Рисунок 4. Типичный ЯМР¹H-спектр для моноциклических солей на примере динитрамида **8**

Заместители у атома азота N_1 проявляются в виде сигналов протонов соответствующих типу заместителей. Большая четверка алкильных заместителей у атома азота N_1 моноциклических НТС проявляется соответственно в виде: синглета метильной группы при $4,12 \div 4,20$ м.д. для солей с **1 – 3**, **6 – 8**, **12**, **19**; триплета и квадруплета этильной группы соответственно при $1,48 \div 1,56$ м.д. и $4,48 \div 4,60$ м.д. для солей с **4**, **5**, **10**, **11**; мультиплета и дублета изопропильной группы соответственно при $4,96 \div 4,97$ м.д. и $1,56 \div 1,57$ м.д., для солей **13 – 15**, и синглета – третбутильной группы при $1,66 \div 1,68$ м.д. для солей **16 – 18**.

Тот факт, что в ЯМР¹H спектрах 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазиолой-1'-ил)алкил]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазиоловых солей, соединенных алкиленовым мостиком **26 – 33** (например, рисунок 3) и 3-нитро-1-[[3-нитро-4-метил-1-Н-1,2,4-триазиолой-1'-ил)этоксипропилен]4-метил-1-Н-1,2,4-триазиоловых солей с простой эфирной связью **20 – 25** присутствуют по одному синглету (**26 – 33**) или триплету (**20 – 25**) протонов CH_2 - группы, связанной с циклическим атомом азота N_1 , свидетельствует о симметричности структуры биядерных НТС и сохранению неизменным в ходе процесса кватернизации и ионного обмена положений соответствующих заместителей у атомов азота N_1, N_1' , также как у исходных биядерных N_1, N_1' моно-замещенных 3-нитро-5- R -1,2,4-триазолах.

В спектрах ЯМР¹³C алкилсульфатов, перхлоратов и динитрамидов с катионом 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазиолов и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазиолой-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазиолов (таблицы 1 и 2) регистрируются характерные сигналы атомов углерода

гетероцикла – углерода C_3 при нитрогруппе и кольцевого углерода C_5 - R . Причем, если сигнал углерода C_3 гетероцикла, связанный с нитрогруппой, во всех представленных моно- и бициклических НТС мало зависит от типа и положения алкильных заместителей и локализуется в узком диапазоне при $150,38 \div 151,82$ м.д., характерном для солевых нитро-триазиоловых структур [2], то на резонанс углерода C_5 существенным образом влияет заместитель при этом атоме. Замена протона при C_5 на алкильную группу приводит к значительному смещению резонанса этого атома углерода в спектрах ЯМР¹³C на $7,61 \div 14,09$ м.д. в область слабых полей. Так, если для солей с катионами 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазиолия ($R = H$, соли **10**, **11**, **13**, **15**, **16**, **18**) и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазиолой-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазиолия ($R = H$, соли **20 – 22**, **26 – 28**, **32 – 34**) сигнал циклического углерода C_5 находится при $145,03 \div 148,57$ м.д., то для солей ($R = CH_3$ соли **1 – 3**, **19**, **29**, **30**, **31**) смещается до $156,18 \div 157,50$ м.д., а для производных ($R = C_2H_5$ соли **6 – 8**, **12**) сигналы углерода C_5 смещаются, соответственно, до $158,64 \div 159,12$ м.д.

В спектрах ЯМР¹³C алкилсульфатов, перхлоратов и динитрамидов на основе катионов 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазиолов и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазиолой-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазиолов (таблицы 1 и 2) присутствуют соответствующие сигналы углерода, связанные с атомами азота N_4 (метильные и этильные группы). При $C_5 = H$ сигнал углерода метильной группы, связанный с атомом азота N_4 , практически не зависит от заместителя R_1 , как для 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -1,2,4-триазиоловых солей, так и для 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-1',2',4'-триазиолой-1'-

ил)-R₁]-3-нитро-4-метил-1,2,4-триазиолиевых солей и в ряду N₁-изопропил- **13**, N₁-третбутил- **16**, N₁,N₁'-этилен- **26 – 28**, N₁,N₁'-пропилен- **32 – 34**, N₁,N₁'-этоксипропилен- **21, 22** находятся в узком спектральном интервале 37,46 ÷ 37,77 м.д. При замене протона при C₅ на метильную группу в солях **1 – 3, 29 – 31** диапазон резонанса углерода N₄-CH₃ смещается на 1,56 ÷ 2,10 м.д. в область сильных полей и находится в интервале 35,67 ÷ 35,90 м.д. Кроме того, в ЯМР ¹³C спектрах проявляются все имеющиеся в структурах НТС атомы углерода алкильных заместителей у атома азота N₁, атомы углерода алкиленовых и этоксиэтиленовых заместителей (таблицы 1 и 2).

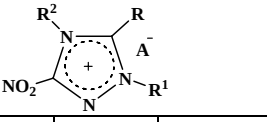
Структура полученных соединений также подтверждена хорошей сходимостью элементного анализа, причем характерной осо-

бенностью является отсутствие серы в составе солей хлорной кислоты и динитрамида, что свидетельствует о количественном проведении анионного обмена.

Проведен рентгеноструктурный анализ типичного представителя нитротриазиолиевых солей – динитрамида 1,4,5-триметил-3-нитро-1,2,4-триазолия **2**. В результате надежно установлено направление атаки электрофильного агента при кватернизации 1,5-диметил-3-нитро-1,2,4-триазола в положение N₄ гетероцикла [14]. На основании проведенного рентгеноструктурного анализа и спектроскопии ЯМР надежно установлены структурные параметры динитрамида 1,4,5-триметил-3-нитро-1,2,4-триазолия **2**. Это позволило в дальнейшем использовать ЯМР-спектроскопию для установления структуры различных НТС.

Таблица 1

Спектральные характеристики алкилсульфатов, перхлоратов и динитрамидов 1-R₁-3-нитро-4-R₂-5-R-1,2,4-триазиолиев

Ш и ф р					ЯМР ¹ H, ДМСО-d ₆ , м.д.	ЯМР ¹³ C, ДМСО-d ₆ , м.д.	ИК-спектр, λ, см ⁻¹
	R	R ₁	R ₂	A ⁻			
1	CH ₃	CH ₃	CH ₃	CH ₃ SO ₄	2,86(с.,3H,C-CH ₃) 4,03(с.,3H,N ₄ -CH ₃) 4,12(с.,3H,N ₁ -CH ₃)	10,43 (C-CH ₃) 35,68 (N ₄ -CH ₃) 38,83 (N ₁ -CH ₃) 150,38(C ₃ -NO ₂) 156,29 (C ₅ -CH ₃)	катион NO ₂ : 1589;1547;1336; 867; 630 анион CH ₃ SO ₄ : 1225 уш.
2	CH ₃	CH ₃	CH ₃	N(NO ₂) ₂	2,89(с.,3H,C-CH ₃) 4,05(с.,3H,N ₄ -CH ₃) 4,15(с.,3H,N ₁ -CH ₃)	10,67 (C-CH ₃) 35,90 (N ₄ -CH ₃) 38,58 (N ₁ -CH ₃) 150,38(C ₃ -NO ₂) 156,47 (C ₅ -CH ₃)	катион NO ₂ : 1588;1555;1336; 858; 638 анион N(NO ₂) ₂ : 999; 1176; 1518
3	CH ₃	CH ₃	CH ₃	ClO ₄	2,88(с.,3H,C-CH ₃) 4,05(с.,3H,N ₄ -CH ₃) 4,15(с.,3H,N ₁ -CH ₃)	10,38(C-CH ₃) 35,67(N ₄ -CH ₃) 38,93(N ₁ -CH ₃) 150,38(C ₃ -NO ₂) 156,18(C ₅ -CH ₃)	катион NO ₂ : 1587;1550;1335; 867; 625 анион ClO ₄ : 1100 уш.
4	H	C ₂ H ₅	CH ₃	CH ₃ SO ₄	10,35 (с. 1H, C ₅ -H) 4,11(с.,3H,N-CH ₃) 4,52(кв,2H,CH ₂ -CH ₃) 1,49(т.,3H,CH ₂ -CH ₃) 3,34(с., 3H, CH ₃ SO ₄)	-	катион NO ₂ : 1594;1566;1313; 849; 630 анион CH ₃ SO ₄ : 1243 уш.
5	H	C ₂ H ₅	CH ₃	N(NO ₂) ₂	10,31 (с. 1H, C ₅ -H) 4,11(с.,3H,N-CH ₃) 4,48(кв,3H,CH ₂ -CH ₃) 1,48 (т.,2H,CH ₂ -CH ₃)	-	катион NO ₂ : 1591;1565;1336;850; 665 анион N(NO ₂) ₂ : 1006;1172;1523

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЕЙ ТРИАЗОЛИЕВ

6	C ₂ H ₅	CH ₃	CH ₃	CH ₃ SO ₄	4,13(с., 3H, N ₁ -CH ₃) 4,09(с., 3H, N ₄ -CH ₃) 6,23(с., 3H, CH ₃ -SO ₄) 3,31(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,25(т., 3H, CH ₂ -CH ₃)	9,73(CH ₂ -CH ₃) 17,06(C ₅ -CH ₂) 35,61 (N ₄ -CH ₃) 38,82 (N ₁ -CH ₃) 150,59 (C ₃ -NO ₂) 158,73 (C ₅ -CH ₂)	катион NO ₂ : 1585;1550;1345; 875; 635 анион CH ₃ SO ₄ : 1230 уш.
7	C ₂ H ₅	CH ₃	CH ₃	ClO ₄	4,20(с., 3H, N ₁ -CH ₃) 4,07(с., 3H, N ₄ -CH ₃) 3,31(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,25(т., 3H, CH ₂ -CH ₃)	9,71(CH ₂ -CH ₃) 16,87(C ₅ -CH ₂) 35,46 (N ₄ -CH ₃) 38,83 (N ₁ -CH ₃) 150,73(C ₃ -NO ₂) 158,64(C ₅ -CH ₂)	катион NO ₂ : 1585;1545;1340; 870; 625 анион ClO ₄ : 1095 уш.
8	C ₂ H ₅	CH ₃	CH ₃	N(NO ₂) ₂	4,19(с., 3H, N ₁ -CH ₃) 4,07(с., 3H, N ₄ -CH ₃) 3,35(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,28(т., 3H, CH ₂ -CH ₃)	9,70(CH ₂ -CH ₃) 16,91(C ₅ -CH ₂) 35,46 (N ₄ -CH ₃) 38,86 (N ₁ -CH ₃) 150,73(C ₃ -NO ₂) 158,67(C ₅ -CH ₂)	катион NO ₂ : 1580;1551;1340; 870; 620 анион N(NO ₂) ₂ : 1006;1179;1519
9	H	C ₂ H ₅	C ₂ H ₅	C ₂ H ₅ SO ₄	-	13,64(CH ₂ -CH ₃) 46,82 (N-CH ₂) 13,45(CH ₂ -CH ₃) 49,12(N-CH ₂) 15,17(CH ₃ CH ₂ SO ₄) 61,62(CH ₃ CH ₂ SO ₄) 145,89(C ₅ -H) 150,97(C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1588;1560;1325; 845; 625 анион C ₂ H ₅ SO ₄ 1225 уш.
10	H	C ₂ H ₅	C ₂ H ₅	ClO ₄	10,42(с., 1H, C-H) 1,52(т., 3H, CH ₃) 1,55(т., 3H, CH ₃) 4,53(кв., 2H, CH ₂) 4,57(кв., 2H, CH ₂)	13,36(CH ₂ -CH ₃) 13,62(CH ₂ -CH ₃) 46,72(N ₄ -CH ₂) 49,09(N ₁ -CH ₂) 145,78(C ₅ -H) 150,92(C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1590;1562;1325; 850; 625 анион ClO ₄ : 1080
11	H	C ₂ H ₅	C ₂ H ₅	N(NO ₂) ₂	10,45(с., 1H, C ₅ -H) 4,53(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,54 (т, 3H, CH ₂ -CH ₃) 4,60(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,57(т, 3H, CH ₂ -CH ₃)	13,67(CH ₂ -CH ₃) 14,00(CH ₂ -CH ₃) 47,18(N-CH ₂) 49,59(N-CH ₂) 146,23(C ₅ -H) 151,27(C ₃ -NO ₂)	-
12	C ₂ H ₅	CH ₃	C ₂ H ₅	N(NO ₂) ₂	3,35(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,29 (т., 3H, CH ₂ -CH ₃) 4,20 (с., 3H, N ₁ -CH ₃) 4,56(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,46 (т., 3H, CH ₂ -CH ₃)	10,88(C ₅ -CH ₂ -CH ₃) 150,75(C ₃ -NO ₂) 14,56(C ₅ -CH ₂ -CH ₃) 17,36 (CH ₂ -CH ₃) 39,30 (N-CH ₂) 45,39 (N-CH ₃) 159,12(C ₅ -C ₂ H ₅)	катион NO ₂ : 1584;1545;1333; 867; 636 анион N(NO ₂) ₂ : 1020;1186;1524
13	H		CH ₃	N(NO ₂) ₂	10,43 (с. 1H, C ₅ -H) 4,14 (с., 3H, N ₄ -CH ₃) 4,97 (м, 1H, CH-) 1,57 (д., 6H, -(CH ₃) ₂)	21,35 (-(CH ₃) ₂) 37,52 (N-CH ₃) 57,96 (N-CH) 147,19 (C ₅ -H) 151,53(C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1564;1514;1328; 847; 627 анион N(NO ₂) ₂ : 1006;1184;1514
14	H		C ₂ H ₅	C ₂ H ₅ SO ₄	10,45 (с. 1H, C ₅ -H) 4,96(м, 1H, N ₄ -CH-) 1,56(д, 6H, -(CH ₃) ₂) 4,55(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,54(т., 3H, CH ₂ -CH ₃) 3,71(кв, 3H, CH ₃ CH ₂ SO ₄) 1,10(т., 2H, CH ₃ CH ₂ SO ₄)	-	катион NO ₂ : 1585;1556;1335; 843; 635 анион C ₂ H ₅ SO ₄ : 1217 уш.

15	H		C ₂ H ₅	N(NO ₂) ₂	10,45 (с. 1H, C ₅ -H) 4,96(м, 1H, N ₄ -CH-) 1,56(д, 6H, -(CH ₃) ₂) 4,55(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,53(т., 3H, CH ₂ -CH ₃)	14,16 (CH ₂ -CH ₃) 21,49 (-(CH ₃) ₂) 43,73 (N-CH ₂) 57,93 (N-CH) 145,53 (C ₅ -H) 151,49 (C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1586;1561;1322;844; 619 анион N(NO ₂) ₂ : 1006;1188;1513
16	H		CH ₃	N(NO ₂) ₂	10,49(с. 1H, C ₅ -H) 4,12(с., 3H, N ₄ -CH ₃) 1,67(с., 9H, -(CH ₃) ₃)	28,13 (-(CH ₃) ₃) 37,46 (N-CH ₃) 66,15(N-C(CH ₃) ₃) 145,68 (C ₅ -H) 151,53 (C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1563;1526;1331;850; 619 анион N(NO ₂) ₂ : 1003;1195;1526
17	H		C ₂ H ₅	C ₂ H ₅ SO ₄	10,46 (с. 1H, C ₅ -H) 4,56(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,57(т., 3H, CH ₂ -CH ₃) 1,68(с., 9H, -(CH ₃) ₃) 3,72(кв., 3H, CH ₃ CH ₂ SO ₄) 1,10(т., 2H, CH ₃ CH ₂ SO ₄)	-	катион NO ₂ : 1591;1560;1324; 847; 636 анион C ₂ H ₅ SO ₄ : 1170 уш.
18	H		C ₂ H ₅	N(NO ₂) ₂	10,44 (с. 1H, C ₅ -H) 4,53(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,54(т., 3H, CH ₂ -CH ₃) 1,66(с., 9H, -(CH ₃) ₃)	28,14 (-(CH ₃) ₃) 145,03 (C ₅ -H) 66,18(N-C(CH ₃) ₃) 151,29 (C ₃ -NO ₂) 14,28(CH ₂ -CH ₃) 47,12(N ₄ -CH ₂)	катион NO ₂ : 1588;1555;1337; 847; 635 анион N(NO ₂) ₂ : 1005;1182;1511
19	CH ₃	CH ₃	C ₂ H ₅	N(NO ₂) ₂	2,92(с., 3H, C-CH ₃) 4,13(с., 3H, N-CH ₃) 4,56(кв, 2H, CH ₂ -CH ₃) 1,42(т., 3H, CH ₂ -CH ₃)	10,61 (C-CH ₃) 39,27 (N ₁ -CH ₃) 156,35 (C ₅ -CH ₃), 150,60 (C ₃ -NO ₂) 13,66(CH ₂ -CH ₃) 45,38(N ₄ -CH ₂)	катион NO ₂ : 1586;1547;1353;865; 636 анион N(NO ₂) ₂ : 1008;1180;1511

Таблица 2

Спектральные характеристики метилсульфатов, перхлоратов и динитрамидов 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'-R-1',2',4'-триазолий-1'-ил)-R₁]-3-нитро-4-метил-5-R-1,2,4-триазолиев

Ши фр				ЯМР ¹ H, ДМСО-d ₆ , м.д.	ЯМР ¹³ C, ДМСО- d ₆ , м.д.	ИК-спектр, λ, см ⁻¹
	R	R ₁	A ⁻			
20	H	-(CH ₂) ₂ -O- (CH ₂) ₂ -	CH ₃ SO ₄	10,31(с., 1H, C-H) 4,16(с., 3H, N-CH ₃) 3,35(с, 3H, CH ₃ -SO ₄) 4,71(т., 2H, N-CH ₂) 3,89(т., 2H, CH ₂ -O)	-	катион NO ₂ : 1580;1566;1341; 852; 611 анион CH ₃ SO ₄ : 1237 уш
21	H	-(CH ₂) ₂ -O- (CH ₂) ₂ -	N(NO ₂) ₂	10,36(с., 1H, C-H) 4,17(с., 3H, N-CH ₃) 4,73(т., 2H, N-CH ₂) 3,88(т., 2H, CH ₂ -O)	37,75(N ₄ -CH ₃) 53,78(N ₁ -CH ₂) 67,13(CH ₂ -O) 147,55(C ₅ -H) 151,61(C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1593;1568;1340; 847; 629 анион N(NO ₂) ₂ : 998; 1178; 1523
22	H	-(CH ₂) ₂ -O- (CH ₂) ₂ -	ClO ₄	10,32(с., 1H, C-H) 4,16(с., 3H, N-CH ₃) 4,72(т., 2H, N-CH ₂) 3,88(т., 2H, CH ₂ -O)	37,77(N ₄ -CH ₃) 53,81(N ₁ -CH ₂) 67,12(CH ₂ -O) 147,51(C ₅) 151,82(C ₃)	катион NO ₂ : 1591;1563;1339; 853; 622 анион ClO ₄ : 1108 уш
23	C H ₃	-(CH ₂) ₂ -O- (CH ₂) ₂ -	CH ₃ SO ₄	2,88(с., 3H, C-CH ₃) 4,01(с., 3H, N-CH ₃) 3,32(с, 3H, CH ₃ -SO ₄) 4,69(т., 2H, N-CH ₂) 3,77(т., 2H, CH ₂ -O)	-	катион NO ₂ : 1593; 1553; 1342; 861;635 анион CH ₃ SO ₄ : 1226 уш

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЕЙ ТРИАЗОЛИЕВ

24	C H ₃	-(CH ₂) ₂ -O- (CH ₂) ₂ -	N(NO ₂) ₂	3,10 (с., 3H, C-CH ₃) 4,90 (т., 2H, N-CH ₂) 3,98 (т., 2H, CH ₂ -O) 4,24(с., 3H, N-CH ₃)	-	катион NO ₂ : 1589;1568;1339; 859; 634 анион N(NO ₂) ₂ : 1009; 1178;1516
25	C H ₃	-(CH ₂) ₂ -O- (CH ₂) ₂ -	ClO ₄	2,80(с.,3H,C-CH ₃) 3,93(с.,3H,N-CH ₃) 4,59(т.,2H,N-CH ₂) 3,67(т.,2H,CH ₂ -O)	-	катион NO ₂ : 1588;1554;1336; 910; 623 анион ClO ₄ : 1090
26	H	-CH ₂ -CH ₂ -	CH ₃ SO ₄	10,35(с., 1H, C ₅ -H) 4,98(с.,2H,N ₁ -CH ₂) 4,14(с.,3H,N ₄ -CH ₃) 3,37(с.,3H,CH ₃ -SO ₄)	37,51(N ₄ - CH ₃) 48,82(N-CH ₂) 53,22(CH ₃ SO ₄) 148,45(C ₅ -H) 151,45(C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1590;1560;1345; 855;610 анион CH ₃ SO ₄ : 1235 уш.
27	H	-CH ₂ -CH ₂ -	N(NO ₂) ₂	4,17(с, 3H, N ₄ -CH ₃) 5,19(с,2H, N ₁ -CH ₂) 10,35 (с, 1H, C ₅ -H)	37,71 (N ₄ - CH ₃) 48,91 (N-CH ₂) 148,57 (C ₅ -H) 151,47 (C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1600;1563;1340; 852; 625 анион N(NO ₂) ₂ : 1005; 1175;1516
28	H	-CH ₂ -CH ₂ -	ClO ₄	10,36 (с., 1H, C ₅ -H) 4,99(с.,2H,N ₁ -CH ₂) 4,14(с.,3H,N ₄ -CH ₃)	37,56(N ₄ - CH ₃) 48,77(N ₁ -CH ₂) 148,06(C ₅ -H) 151,43(C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1567;1550;1342; 855; 622 анион ClO ₄ : 1090 уш.
29	C H ₃	-CH ₂ -CH ₂ -	CH ₃ SO ₄	2,87(с.,3H,C-CH ₃) 5,15(с.,2H,N ₁ -CH ₂) 4,01(с.,3H,N ₄ -CH ₃) 3,35(с.,3H,CH ₃ -SO ₄)	10,71 (C-CH ₃) 35,84 (N- CH ₃) 48,21 (N-CH ₂) 150,88 (C ₃ -NO ₂) 157,57 (C ₅ -CH ₃)	катион NO ₂ : 1597;1557;1338; 860;635 анион CH ₃ SO ₄ : 1226 уш.
30	C H ₃	-CH ₂ -CH ₂ -	N(NO ₂) ₂	2,96(с.,3H,C-CH ₃) 5,16(с.,2H,N ₁ -CH ₂) 4,08(с.,3H,N ₄ -CH ₃)	10,70 (C ₅ -CH ₃) 35,79 (N ₄ - CH ₃) 48,64 (N ₁ -CH ₂) 150,79 (C ₃ -NO ₂) 157,49 (C ₅ -CH ₃)	катион NO ₂ : 1590;1561;1341; 870; 632 анион, N(NO ₂) ₂ : 1513;1189;1013
31	C H ₃	-CH ₂ -CH ₂ -	ClO ₄	2,95(с.,3H,C-CH ₃) 5,17(с.,2H,N-CH ₂) 4,06(с.,3H,N-CH ₃)	10,67(C-CH ₃) 35,84(N ₄ - CH ₃) 48,51(N ₁ -CH ₂) 150,76(C ₃ -NO ₂) 157,50 (C ₅ -CH ₃)	-
32	H	-CH ₂ -CH ₂ - CH ₂ -	CH ₃ SO ₄	10,29(с., 1H, C-H) 4,15(с.,3H,N-CH ₃) 3,34(с.,3H,CH ₃ SO ₄) 4,71(т.,2H,N-CH ₂) 3,89(т.,2H,CH ₂ -O)	37,70 (N- CH ₃) 53,41 (CH ₃ SO ₄) 53,88(N ₁ - CH ₂) 67,03(CH ₂ -O) 147,57 (C ₅ -H) 151,58 (C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1600;1567;1334; 854; 623 анион CH ₃ SO ₄ : 1227 уш.
33	H	-CH ₂ -CH ₂ - CH ₂ -	N(NO ₂) ₂	4,19(с,3H,N-CH ₃) 10,41(с, 1H, CH) 2,59(м,2H, -CH ₂ -) 4,70(т,2H,N-CH ₂ -)	27,54 (-CH ₂ -) 37,51 (N- CH ₃) 50,38 (N-CH ₂) 147,69 (C ₅ -H) 151,51 (C ₃ -NO ₂)	катион NO ₂ : 1593; 1565; 1326 анион N(NO ₂) ₂ : 1000; 1171;1515
34	H	-CH ₂ -CH ₂ - CH ₂ -	ClO ₄	-	-	катион NO ₂ : 1598;1567;1332; 853; 623 анион ClO ₄ : 1099 уш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комплексный сравнительный анализ спектральных характеристик исходных 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов, 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-5'- R -1',2',4'-триазол-1'-ил)- R_1]-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов и продуктов их кватернизации – алкилсульфатов, перхлоратов, динитрамидов 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-4'-метил-5'- R -1',2',4'-триазолий-1'-ил)- R_1]-3-нитро-4-метил-5- R -1,2,4-триазолиев. Наиболее характерной отличительной особенностью исходных 1- R_1 -3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов и 3-нитро-1-[1'-(3'-нитро-5'- R -1',2',4'-триазол-1'-ил)- R_1]-3-нитро-5- R -1,2,4-триазолов и их кватернизованных аналогов является: в ИК-спектрах в полосе антифазных валентных колебаний нитрогруппы появляется дополнительное плечо в области $1563 \div 1600 \text{ см}^{-1}$ и происходит существенное смещение полосы синфазных колебаний нитрогруппы в высокочастотную область; в ЯМР ^1H спектрах наблюдается существенное смещение резонанса протонов заместителей при циклическом атоме углерода C_5 гетероцикла в нитротриазолиевых солях в область слабых полей на $1,34 \div 1,82 \text{ м.д.}$ С помощью спектроскопии ЯМР и рентгеноструктурного анализа на примере динитрамида 1,4,5-триметил-3-нитро-1,2,4-триазолия надежно установлены структурные параметры солей 1- R_1 -3-нитро-4- R_2 -5- R -1,2,4-триазолиев. Это позволило использовать ЯМР-спектроскопию для установления структуры различных нитротриазолиевых солей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сакович Г.В., Жарков А.С., Суханов Г.Т., Лобанова А.А., Михайлов Ю.М., Суханова А.Г., Филиппова Ю.В. Заявка №2008142573/04 МКИ C07D249/14 (2006.01), C06B 25/34 (2006.01) решение о выдаче патента от 04.08.2010
2. Суханов Г.Т., Суханова А.Г., Шейков Ю.В. // Химия гетероциклических соединений. – 2007. – № 6. – С. 927 – 934.
3. Sukhanov G.T., Sakovich G.V., Sukhanova A.G., Lobanova A.A. // Energetic Materials: In 38th Annual Conference of ICT 26-29 June 2007. – Karlsruhe, 2007. – P.44/1 – 8.
4. Суханов Г.Т., Сакович Г.В., Суханова А.Г. // Вестник КГТУ. Спец. выпуск. – 2008. – С. 55 – 59.
5. Суханов Г.Т., Лукин А.Ю. // Химия гетероциклических соединений. – 2005. – №7. – С. 1020 – 1025.
6. Суханов Г.Т., Сакович Г.В., Суханова А.Г. // Химия гетероциклических соединений. – 2008. – №11. – С. 1680 – 1687.
7. Суханов Г.Т., Сакович Г.В., Суханова А.Г. // Вестник КГТУ спец. выпуск. – Казань, 2008. – С. 60 – 65.
8. Суханов Г.Т., Суханова А.Г., Филиппова Ю.В., Олещенко Ю.Ю. // Ползуновский вестник. – № 3. – 2010. – С. 14 – 18.
9. G. Drake W., Hawkins T., Brand A., Hall L., McKay M., Vij A., Ismail I. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2003. – Vol. 28, Issue 4. – P. 174 – 180.
10. Шляпочников В.А., Оленева Г.И., Черская Н.О. // Известия АН. Серия Химическая. – 1995. – №6. – С. 927 – 934.
11. Певзнер М.С., Федорова Е.Я., Шохор И.Н., Багал Л.И. // Химия гетероциклических соединений, 1971. – С. 275.
12. Багал Л.И., Певзнер М.С., Фролов А.Н., Шелудякова Н.И. // Химия гетероциклических соединений. – 1970. – №2. – С. 259 – 264.
13. Суханов Г.Т., Босов К.К., Суханова А.Г., Калмыков П.И. // Вестник КГТУ спец. выпуск. – 2008. – С. 93 – 98.
14. Григорьев Ю.В., Ляхов А.С., Григорьева И.М., Матулис Вад.Э., Элькинд П.Д., Ивашкевич О.А., Суханова А.Г. // Химия нитросоединений и родственных азот-кислородных систем: тез. докл. Всероссийской конференции 21-23 октября 2009 г. – Москва, 2009. – С. 119.