

УДК 000

ОБНАРУЖЕНИЕ СЛЕДОВЫХ КОЛИЧЕСТВ ПЕРОКСИДОВ И НИТРАТА АММОНИЯ В ОТПЕЧАТКАХ ПАЛЬЦА МЕТОДОМ СПЕКТРОМЕТРИИ ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ

© 2024 г. Т. И. Буряков^а, *, И. А. Буряков^а, **

^аНаучно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова,
Копорское ш., 72, Ленинградская обл., Сосновый Бор, 188540 Россия

*E-mail: buryakovti@gmail.com

**E-mail: buryakovia@gmail.com

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 27.07.2023 г.

Принята к публикации 27.07.2023 г.

Исследовано влияние потожировых отложений (ПЖО) отпечатка пальца на эффективность обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ – триацетона трипероксида (ТАТП), гексаметиленпероксиддиамин (ГМТД) и нитрата аммония (НА) методом спектрометрии ионной подвижности в воздушной среде при атмосферном давлении. Одними из основных компонентов ПЖО, оказывающими такое влияние, в положительной моде является мочевина, в отрицательной – молочная кислота (МК). Показано, что наличие в пробе мочевины или ПЖО существенно не влияет на регистрацию ТАТП в положительной моде, но уменьшает эффективность образования ионов ГМТД и вызывает появление аддукт-катионов ГМТД и мочевины. Наличие в пробе МК или ПЖО незначительно уменьшает эффективность образования ионов НА в отрицательной моде, сильно изменяет качественный состав ионов ГМТД, вызывая появление аддукт-анионов ГМТД и МК. В отсутствие каких-либо примесей в пробе наилучший приведенный предел обнаружения (сигнал/шум = 3σ), оцениваемый величиной 30–50 пг, зарегистрирован для ГМТД. Определено время жизни следов ГМТД, ТАТП и НА на алюминиевой фольге при лабораторных условиях, равное 1, 3 и 12 ч для проб массами $m_{\text{ГМТД}} 1 \times 10^{-9}$, 2×10^{-9} и 1×10^{-8} г и с поверхностными плотностями d_s 0.008, 0.016 и 0.08 мкг/см² соответственно; 10^2 и 10^3 с для $m_{\text{ТАТП}} 1 \times 10^{-5}$ и 1×10^{-4} г и d_s 80 и 800 мкг/см² соответственно; 12 и 25 ч для $m_{\text{НА}} 3 \times 10^{-8}$ и 5×10^{-8} г и d_s 0.24 и 0.4 мкг/см² соответственно.

Ключевые слова: спектрометрия ионной подвижности, триацетона трипероксид, гексаметиленпероксиддиамин, нитрат аммония, отпечаток пальца руки человека, мочевина, молочная кислота.

DOI: 10.31857/S0044450224070093, EDN: TNKCRB

Простота изготовления и доступность необходимых для синтеза химических компонентов является причиной высокого риска проведения террористических актов с использованием самодельных, так называемых “кухонных”, взрывчатых веществ (ВВ). К таким веществам относятся триацетона трипероксид (ТАТП), гексаметиленпероксиддиамин (ГМТД) и нитрат аммония (НА), причем последнее ВВ может быть как кустарного, так и промышленного изготовления. В табл. 1 указаны города и даты совершения

террористических актов и других противоправных деяний, связанных с использованием перечисленных выше ВВ. Из таблицы видно, какую серьезную угрозу представляют собой самодельные ВВ и насколько важна задача обнаружения взрывных устройств или зарядов на их основе.

В настоящее время одним из самых широко распространенных и эффективных методов обнаружения следов/микрочастиц ВВ является спектрометрия ионной подвижности [15–17]. Этот метод основан на отборе потенциально

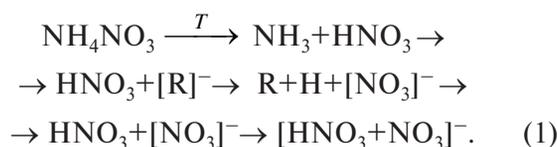
Таблица 1. Города и даты проведения террористических актов и других противоправных деяний, связанных с использованием триацетона трипероксида (ТАТП), гексаметиленрипероксиддиамина (ГМТД) и нитрата аммония (НА)

Город	Дата	Литература
ТАТП		
Теракт в г. Касабланка	16.05.2003	[1]
Теракт в г. Маракеш	28.04.2011	[2]
Теракт в г. Серанг	28.10.2015	[3]
Теракт в г. Париж	13.11.2015	[1]
Теракт в аэропорту г. Брюссель	22.03.2016	
Теракт на Манчестер-Арена	22.05.2017	
Хранение вещества, г. Москва	14.08.2017	[4]
Самоподрыв на вокзале г. Брюссель	20.06.2017	[5]
Случайный самоподрыв в г. Альканар (Испания)	17.08.2017	
Теракт в метро г. Лондон	15.09.2017	
Серия терактов в г. Сурабая	13.05.2018	[6]
Серия терактов в Шри-Ланке	21.04.2019	[7]
Хранение зарядов, г. Джакарта	29.03.2021	[8]
ГМТД		
Попытка теракта в аэропорту г. Лос-Анджелеса	Декабрь 1999	[9]
Попытка подрыва самолетов, Великобритания	28.08.2006	[10]
Хранение вещества, г. Бристоль	17.04.2008	[11]
Теракты в г. Сисайд-Парк и на Манхеттене в г. Нью-Йорк	17.09.2016	[12]
НА		
Теракт у посольства США в г. Бейрут	18.04.1983	[1]
Теракт в г. Оклахома Сити	19.04.1995	
Теракты в г. Стамбул	15.11.2003, 20.11.2003	
Теракт в г. Касабланка	16.05.2003	
Теракт в г. Маракеш	28.04.2011	[2]
Подрыв автомобиля в г. Осло	22.07.2011	[13]
Теракты в г. Сисайд-Парк и на Манхеттене в г. Нью-Йорк	17.09.2016	[12]
Теракт в г. Могадिशо	14.10.2017	[2]
Теракт в г. Ламитан, Филиппины	31.07.2018	[14]

содержащей следы/микрочастицы ВВ твердой или жидкой пробы и переводе (например, термомодесорбцией) ее в газообразное состояние, ионизации газовой пробы, разделении образовавшихся ионов по скорости их движения в газе

под действием электрического поля и регистрации разделенных ионов в виде совокупности пиков – спектра.

Ключевым процессом, обеспечивающим эффективность обнаружения того или иного вещества посредством метода спектрометрии ионной подвижности, является ионизация. Часто в спектрометрах ионной подвижности (СИП) используют ионизацию при атмосферном давлении (ИАД). В ИАД формирование ионов газовой пробы происходит в две стадии. На первой стадии происходит образование реактант-ионов из атомов и молекул газовой матрицы, на второй – образование ионов примесных веществ за счет ион-молекулярных реакций реактант-ионов с молекулами этих веществ. При ИАД с помощью коронного разряда в положительной моде (ПМ) основными типами реактант-ионов в воздухе в присутствии паров воды являются полигидраты $(H_2O)_mH^+$ ($m \geq 1$ – целое число) [18], а в отрицательной моде (ОМ) – ионы O_2^- и NO_2^- , в меньшей степени NO_3^- , CO_3^- и др., а также полигидраты на их основе [19, 20]. Образование ионов ТАТП, ГМТД происходит в ион-молекулярных реакциях реактант-ионов и молекул этих веществ. Ионы НА возникают вследствие термического разложения молекул вещества и последующих реакций автоионизации [21] ($[R]^-$ – реактант-ионы):



В СИП разделение ионов по типам проводят в дрейфовой камере, представляющей собой заполненную газом полость, образованную системой электродов, обеспечивающих внутри полости однородное электрическое поле E . Ионы различных типов, импульсно введенные через ионный затвор в дрейфовую камеру, под действием поля приобретают скорости, пропорциональные их подвижности, дрейфуют, разделяясь на концентрационные облака, и рекомбинируют на электроде электрометрической системы регистрации (ЭСР). Регистрируют величину ионного тока в зависимости от времени дрейфа $I(t_d)$ – спектр. Скорость движения ионов i -го типа характеризуется приведенной подвижностью:

$$K_{oi} = I^2 / (U t_{di}) (273.15/T) (P/760) , \quad (2)$$

Таблица 2. Приведенные подвижности K_{0i} и отношения массы к заряду (m/z) ионов триацетона трипероксида (ТАТП), гексаметилентрипероксиддиамин (ГМТД) и нитрата аммония (НА), образующихся в воздушной среде, а также предполагаемые типы этих ионов

ВВ	K_0 , см ² /(В·с)	m/z , а.е.м.	Тип иона или полярность	Литература	
ТАТП	2.15	59	$[C_3H_6OH]^+$	[18]	
	2.08	91	$[C_3H_6O_3H]^+$		
	1.36	240	$[M+NH_4]^+$		
ТАТП	2.30	73	$[C_4H_9NH_2]^+$	[21]	
	2.17	89	$[C_4H_9O_2]^+$		
ГМТД	2.12	90	$[NC_3H_8O_2]^+$		
	1.74	145	$[M+H-CH_2O-H_2O_2]^+$		
	2.33	72	$[NC_2H_2O_2]^-$		
	2.05	108, 110	$[NC_2H_3O_2+Cl]^-$		
	1.82	138, 140	$[M-NC_3H_7O_3+Cl]^-$		
НА	1.83	140, 142	$[M-NC_3H_7O_3+Cl]^-$		
	2.40	62	$[NO_3]^-$		
	2.05	125	$[HNO_3+NO_3]^-$		
ТАТП	1.36	240	$[M+NH_4]^+$	[22]	
ГМТД	2.10	90	+		
	1.73	145	+		
	1.50	209	$[M+H]^+$		
	1.49	224	+		
	1.49	226	$[M+NH_4]^+$		
	2.42	72	-		
	1.82	150	-		
НА		62	$[NO_3]^-$		[23]
	2.07	125	$[HNO_3+NO_3]^-$		
ТАТП	2.05	91	$[C_3H_6O_3H]^+$	[24]	
ГМТД	1.53	209	$[M+H]^+$		

где l – расстояние между ионным затвором и электродом ЭСР, см; U – разность потенциалов между ионным затвором и электродом ЭСР, В; t_{di} – среднее время дрейфа ионов i -го типа между ионным затвором и электродом ЭСР, с; T – температура, К; P – давление, мм рт. ст. Значения K_{0i} исследуемых веществ могут быть определены при использовании химического стандарта:

$$t_{di}/t_{dcs} = K_{0cs}/K_{0i}, \quad (3)$$

где t_{dcs} , K_{0cs} – время дрейфа и приведенная подвижность химического стандарта.

В табл. 2 указаны опубликованные значения приведенных подвижностей K_{0i} и отношения массы к заряду m/z ионов ТАТП, ГМТД и НА, образующихся в воздушной среде, а также предполагаемые типы этих ионов. Из таблицы следует, что молекулы ТАТП эффективно образуют положительные ионы, НА – отрицательные, а ГМТД – положительные и отрицательные.

При наличии в газовой пробе паров нескольких веществ возможно их взаимное влияние в процессе ионообразования. В работе [17] это влияние исследовано для случая, имеющего большую практическую значимость, – анализа отпечатка пальца (**ОП**) человека, имевшего контакт с зарядами взрывчатых веществ, содержащих нитрогруппу. В частности, показано, что основным активным компонентом потожировых отложений (**ПЖО**) отпечатка, который может воздействовать на обнаружение паров ВВ при использовании СИП в отрицательной моде, является молочная кислота (**МК**). Из литературы также известно [25, 26], что ПЖО содержит мочевины, способную активно образовывать положительные ионы. Молекулы мочевины и МК вступают в ион-молекулярные реакции с реагент-ионами, конкурируя с молекулами ВВ, а образующиеся ионы мочевины и МК взаимодействуют с молекулами ВВ. Все это может сильно уменьшать эффективность образования ионов ВВ и изменять их качественный состав.

Цель настоящей работы – выявление влияния следовых количеств мочевины и молочной кислоты, являющихся одними из основных компонентов потожировых отложений человека, в том числе отпечатков пальца, на эффективность обнаружения следовых количеств ТАТП, ГМТД и НА методом спектрометрии ионной подвижности в положительной и отрицательной ионизационных модах в воздушной среде при атмосферном давлении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы. Растворы триацетона трипероксида (CAS 17088-37-8) в ацетоне с концентрацией $(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ г/мл, гексаметилен трипероксидиамин (CAS 283-66-9) в ацетоне с концентрацией $(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-3}$ г/мл и нитрата аммония (CAS 6484-52-2) в воде с концентрацией $(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ г/мл с массовой долей примесей не более 4×10^{-4} % (РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия); диамид угольной кислоты (мочевина, ч.д.а., CAS 57-13-6) (Экспит, Россия); 2-гидроксипропановая (молочная) кислота (80%-ный водный р-р, CAS 50-21-5) (Hugestone Enterprise Co., Ltd, Китай); ацетон для хроматографии 99.85% (CAS 67-64-1) (Компонент-Реактив, Россия), вода для инъекций (Новосибхимфарм, Россия).

Аппаратура. Салфетка для нанесения пробы – фольга алюминиевая толщиной 14 мкм. Дозаторы Лайт 2–20 мкл и Лайт ДПОП-1-100-1000 (Thermo Fisher Scientific, USA). Весы лабораторные XS 205 DU (Mettler Toledo, Швейцария). Ионно-дрейфовый детектор (ИДД) Кербер-Т (Атомпромкомплекс, Россия) на основе спектрометрии ионной подвижности, подробно описанный в работах [17, 27]. Параметры ИДД: температура камеры термодесорбции 180 °С; источник ионизации при атмосферном давлении на основе коронного разряда с импульсным источником питания; $l = 12$ см; $U = 2.2$ кВ; газ-носитель – лабораторный воздух (объемная скорость $Q = 5$ см³/с, 180 °С, абсолютная влажность ≤ 12 г/м³); дрейфовый газ – осушенный воздух (объемная скорость 10 см³/с, 100 °С, абсолютная влажность ≤ 0.1 г/м³); чувствительность ЭСР 15 фА/(ед. АЦП); уровень шумов ЭСР (3σ) – 25 ед. АЦП, эквивалентных 0.375 пА; уровни срабатывания сигнала “тревога” $I_a = 60$ пА (ТАТП), $I_a = 45$ пА (ГМТД и НА) и $I_a = 4.5$ пА (2,4,6-тринитротолуол, ТНТ), т.е. в 160, 120 и 12 раз превышают 3σ ЭСР соответственно.

Приведенные подвижности ионов химических стандартов $K_0(\text{прокаин}) = 1.31$ см²/(В·с) в ПМ и $K_0(\text{ТНТ}) = 1.47$ см²/(В·с) в ОМ [28, 29]. Время установления показаний $t_s \leq 6$ с. Разрешающая способность, определяемая как отношение времени t_{di} ионного пика в спектре к ширине этого пика на половине высоты, составила 40–50.

Методика эксперимента. Растворы различных концентраций готовили из исходных растворов в день проведения экспериментов. В лабораторных условиях (23–25 °С, относительная влажность 25–40%, давление 1000–1017 гПа) с помощью дозатора растворы ВВ, мочевины и МК наносили на поверхность алюминиевой салфетки в виде пятна диаметром 4 мм, которое при анализе располагалось вблизи входного отверстия ИДД. В экспериментах со смесями веществ сначала наносили растворы мочевины или МК, затем растворы ВВ; в экспериментах с отпечатками пальца – сначала отпечаток, затем раствор ВВ в виде пятна диаметром 4 мм. После нанесения проб ожидали $\sim 10^2$ с для испарения ацетона либо $\sim 10^3$ с для испарения воды. Далее салфетку помещали в термодесорбер ИДД. Регистрировали среднее время дрейфа t_{di} ионов, а также зависимость амплитуды ионного тока A_i пика этих ионов от времени пребывания салфетки в камере термодесорбции t_h . Значения K_{0i} ионов ВВ определяли с использованием t_{dcs} и K_{0cs} химических стандартов и уравнения (3). Для определения ионизационной эффективности регистрации ВВ в присутствии или в отсутствие следовых количеств мочевины, МК или отпечатка пальца зависимости амплитуд соответствующих ионных пиков A_i интегрировали по времени t_h и полученные значения зарядов (q_i) нормировали на нанесенные массы веществ (m_i). Предел обнаружения ВВ определяли как превышение амплитуды какого-либо из пиков ионов данного ВВ соответствующего уровня срабатывания сигнала “тревога” I_a . Отпечатки пальца ранжировали на отпечатки со среднестатистическими (сс) и обильными (об) ПЖО. Их примерные массы, оцениваемые в 8–15 и 30–50 мкг, определены ранее [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты показали, что при регистрации исследуемых ВВ наличие в пробе ПЖО существенно не влияло на качественный состав ионов ТАТП или НА, однако вызывало появление новых пиков ГМТД. На рис. 1 представлены

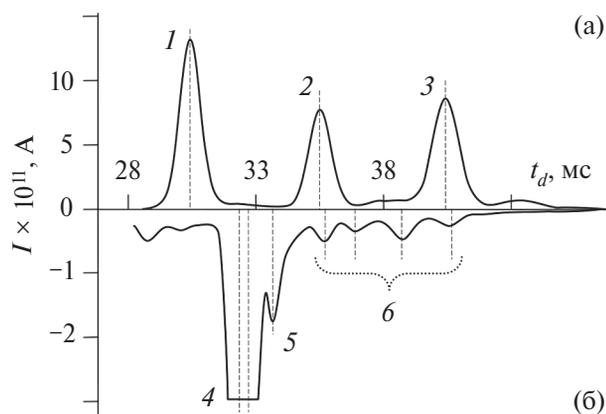


Рис. 1. Фрагменты (а) положительного и (б) отрицательного спектров при анализе отпечатка пальца, содержащего 1 мкг ГМТД. Обозначения пиков: 1 – катионы мочевины, 2 – катионы ГМТД, 3 – аддукт-катионы ГМТД и мочевины, 4 – МК, 5 – аддукт-анионы ГМТД и МК, 6 – анионы ГМТД.

фрагменты положительного и отрицательного спектров подвижности при анализе отпечатка пальца, содержащего 1 мкг ГМТД. В положительной моде время дрейфа доминирующих ионов ПЖО отпечатка пальца $t_d = 30.42$ мс (пик 1) полностью совпадало с t_d ионов мочевины, а в отрицательной моде времена дрейфа доминирующих ионов ПЖО отпечатка пальца $t_d = 32.26$ мс и $t_d = 32.80$ мс (пики 4) полностью совпадали с t_d ионов молочной кислоты. Пик (3) соответствует аддукт-катиону, так как последний образуется при наличии в пробе ГМТД и мочевины или ПЖО, а пик (5) – аддукт-аниону ГМТД, для образования которого необходимо наличие в пробе ГМТД и МК или ПЖО.

В табл. 3 представлены полярности и приведенные подвижности K_{0i} ионов мочевины, МК и ВВ, вычисленные с использованием уравнения (3), экспериментальных значений t_{dcs} и подвижностей химических стандартов $K_0(\text{прокаин}) = 1.31 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (ПМ) и $K_0(\text{ТНТ}) = 1.47 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (ОМ) [28, 29].

Из данных табл. 2, 3 и рис. 1 можно сделать следующие основные выводы по качественному составу ионов:

- присутствие в пробе мочевины или ОП вызывает появление в спектре пика катионов подвижностью $K_0 = 1.77 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (рис. 1, пик 1);
- присутствие в пробе МК или ОП вызывает появление в спектре пиков анионов с подвижностями $K_0 = 1.54$ и $1.52 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (рис. 1, пики 4);
- полученные в настоящей работе значения подвижности ионов ТАТП, ГМТД в ПМ и НА

Таблица 3. Полярности и приведенные подвижности K_{0i} ионов мочевины, молочной кислоты и взрывчатых веществ, а также ионизационная эффективность регистрации веществ e_i

Вещество	Полярность ионов	K_0 , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	e_i , Кл/моль	
Мочевина (ОП)	+	1.77	3.3	
МК (ОП)	–	1.54	2.8	
ТАТП	+	1.52		
		2.13	0.0002	
		2.05	0.003	
ТАТП + ОП	+	1.33	0.002	
		2.05	0.0007	
		1.33	< 0.0001	
ГМТД	+	1.50	8.2	
		–	2.13	0.1
			1.91	0.09
ГМТД + ОП	–	1.73, 1.58	≤ 0.02	
		1.66, 1.52,	≤ 0.005	
		1.42, 1.38,		
		1.33, 1.26		
		1.50	0.5	
		1.31	0.2	
НА	–	1.48	0.02	
		1.42	0.003	
		1.38	0.004	
		1.33	0.002	
НА + ОП	–	1.26	0.006	
		2.36	1.3	
		2.01	2.8	
НА + ОП	–	2.36	0.01	
		2.01	0.2	

в ОМ хорошо согласуются с опубликованными данными (см. табл. 2), на основании чего можно предположить, что в регистрируемых спектрах наиболее интенсивные пики образованы следующими типами ионов (K_{0i} , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$): 2.05 (ТАТП) – $[\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3\text{N}]^+$; 1.50 (ГМТД) – $[\text{M}+\text{H}]^+$; 2.36 (НА) – $[\text{NO}_3]^-$ и 2.01 (НА) – $[\text{HNO}_3+\text{NO}_3]^-$.

– количество наблюдаемых в спектре пиков ионов ГМТД в отрицательной моде и значения их K_{0i} , полученные в настоящей работе, отличаются от опубликованных данных [21, 22];

– при анализе пробы, содержащей ТАТП и мочевины (либо ОП), качественный состав спектра ТАТП не изменяется;

– при анализе пробы, содержащей ГМТД и мочевины (либо ОП), в спектре положительной моды, помимо пика ионов ГМТД с $K_0 = 1.50 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (рис. 1, пик 2), появляется пик

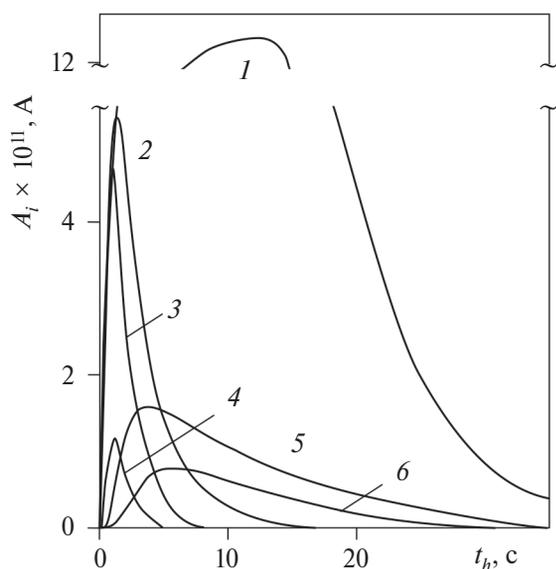


Рис. 2. Зависимости амплитуды пиков ионов от времени пребывания салфетки в камере термодесорбции $A_i(t_h)$: в положительной моде K_0 ГМТД = 1.50 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при массе пробы $m_{\text{ГМТД}} = 1$ мкг (1) или 10 нг (2) и K_0 ТАТП = 2.05 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $m_{\text{ТАТП}} = 10$ мкг (3); в положительной моде K_0 ТАТП = 10 мкг + обильные потожировые отложения (4); в отрицательной моде K_0 НА = 2.01 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ $m_{\text{НА}} = 50$ нг + обильные потожировые отложения (5) и K_0 ГМТД = 1.48 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ $m_{\text{ГМТД}} = 0.5$ мкг + обильные потожировые отложения (6).

предположительно аддукт-катионов ГМТД и мочевины с подвижностью $K_0 = 1.31 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (рис. 1, пик 3);

– при анализе пробы ГМТД в спектре отрицательной моды регистрируется по крайней мере десять пиков;

– в спектре отрицательной моды, полученном при анализе пробы, содержащей ГМТД и МК (либо ОП), по сравнению со спектром ГМТД без МК (ОП) отсутствуют пики ионов с высокой подвижностью $K_0 = 2.13, 1.91, 1.73, 1.66, 1.58 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, регистрируются пики ионов подвижностью $K_0 = 1.42, 1.38, 1.33, 1.26 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (рис. 1, пики б), и появляется наиболее интенсивный пик предположительно аддукт-анионов фрагмента ГМТД и МК с подвижностью $K_0 = 1.48 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (рис. 1, пик 5);

– присутствие в пробе МК или ОП заметно не влияет на качественный состав ионов НА.

Ранее предложено [17] для оценки ионизационной эффективности регистрации вещества, испаряемого с поверхности пробоотборной салфетки, использовать интеграл амплитуды пика ионов этого вещества A_i по времени

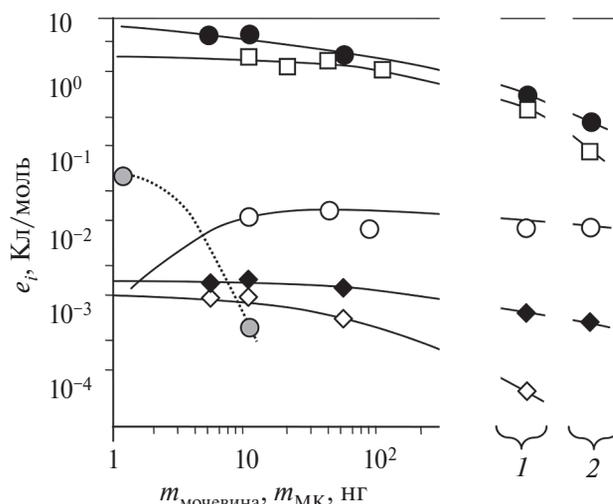


Рис. 3. Зависимости $e_i(m_{\text{мочевина}})$ в положительной моде для ионов с $K_0, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$: черный круг – K_0 ГМТД = 1.50, черный ромб – K_0 ТАТП = 2.05, белый ромб – K_0 ТАТП = 1.33. Зависимости $e_i(m_{\text{МК}})$ в отрицательной моде для ионов: белый круг – K_0 ГМТД = 1.48, серый круг – K_0 ГМТД = 1.91, белый квадрат – K_0 НА = 2.01. 1 – среднестатистические потожировые отложения + взрывчатое вещество, 2 – обильные потожировые отложения + взрывчатое вещество.

пребывания салфетки в камере термодесорбции t_h , отнесенный к массе вещества m_i в пробе: $e_i = \int A_i(t_h) dt_h / m_i = q_i / m_i$. На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости $A_i(t_h)$ в ПМ пика ионов с подвижностью K_0 ГМТД = 1.50 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при десорбции с поверхности салфетки $m_{\text{ГМТД}} = 1$ мкг (1) или 10 нг (2) и пика ионов K_0 ТАТП = 2.05 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при десорбции $m_{\text{ТАТП}} = 10$ мкг (3), а также пика ионов K_0 ТАТП = 2.05 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (4) в ПМ и пиков ионов K_0 НА = 2.01 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (5) и K_0 ГМТД = 1.48 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (6) в ОМ при одновременной десорбции с отпечатком пальца с обильными ПЖО соответственно $m_{\text{ТАТП}} = 10$ мкг, $m_{\text{НА}} = 50$ нг или $m_{\text{ГМТД}} = 0.5$ мкг.

Из рис. 2 видно, что проба $m_{\text{ГМТД}} = 10$ нг (2) малолетучего ГМТД при введении салфетки в термодесорбер, в котором поддерживается температура 180 °С, полностью испаряется с ее поверхности, проходит входной тракт ИДД и покидает камеру ионизации примерно за $t_h = 15$ с. Максимум наблюдается при $t \approx 1.2$ с. При анализе $m_{\text{ГМТД}} = 1$ мкг (кривая 1) в диапазоне $t_h \approx 5-13$ с амплитуда пика находится в насыщении $A_{\text{ГМТД}} \approx 120$ пА, при $t_h > 13$ с интенсивно спадает, но даже при $t_h = 35$ с она остается достаточно большой – $A_{\text{ГМТД}} \approx 5$ пА. Пик ионов летучего ТАТП при массе пробы $m_{\text{ТАТП}} = 10$ мкг полностью исчезает примерно за 8 с при максимуме $t_h \approx 1$ с.

Наличие в пробе отпечатка пальца с обильными ПЖО практически не влияет на динамику испарения летучего ТАТП (сравнение кривых 3 и 4), в то время как для малолетучих НА и ГМТД наблюдается более пологий спад амплитуды $A_i(t_h)$.

Из зависимостей $A_i(t_h)$ определили ионизационные эффективности e_i для наблюдаемых типов ионов мочевины в ПМ, МК в ОМ, ГМТД и ТАТП в ПМ и ГМТД и НА в ОМ при десорбции с поверхности салфеток следовых количеств этих веществ массами $m_i = 5, 1, 1, 5000, 100$ и 20 нг соответственно. Полученные значения ионизационных эффективностей e_i приведены в табл. 3. Там же даны значения e_i ионов, регистрируемых при одновременной десорбции с салфетки отпечатка пальца с обильными ПЖО и следовых количеств ТАТП, НА, ГМТД в ПМ и ОМ массами $m_i = 10, 0.1, 0.05$ и 1 мкг соответственно.

Для определения степени воздействия следовых количеств мочевины и МК, входящих в состав ОП, на ионизационную эффективность наблюдаемых типов ионов ВВ исследовали зависимости $e_i(m_{\text{мочевина}})$ в положительной и $e_i(m_{\text{МК}})$ в отрицательной модах (рис. 3). При варьировании в пробе массы мочевины от 5 до 50 нг регистрировали $A_i(t_h)$ и рассчитывали e_i для положительных ионов $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $K_0_{\text{ТАТП}} = 2.05$ и $1.33 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а при варьировании МК от 1 до 100 нг определяли e_i для отрицательных ионов $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.48$ и $1.91 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $K_0_{\text{НА}} = 2.01 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. На рис. 3 также даны значения e_i для указанных ионов при их регистрации в присутствии отпечатка с ссПЖО и обПЖО. Из рисунка следует, что увеличение в пробе массы мочевины вызывает существенное уменьшение e_i ионов $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $K_0_{\text{ТАТП}} = 1.33 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, умеренное уменьшение e_i ионов $K_0_{\text{ТАТП}} = 2.05 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а увеличение массы МК приводит к исчезновению наиболее интенсивного пика ионов $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.91 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и появлению пика ионов $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.48 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а также существенному уменьшению e_i ионов $K_0_{\text{НА}} = 2.01 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. При наличии в пробе отпечатков с ссПЖО или обПЖО, содержащих существенно большие массы мочевины и МК [17, 25, 26], чем нанесенные из растворов, тенденции падения эффективностей e_i указанных ионов с увеличением массы мочевины или МК сохраняются.

Очевидно, что влияние присутствующих в ОП мочевины и МК на величину e_i ВВ будет отражаться и на их пределах обнаружения (ПО), являющихся основными параметрами,

характеризующими обнаружительную способность устройства.

Гексаметилентрипероксиддиамин (ГМТД). В отсутствие мочевины, МК или ОП, из всех исследованных веществ наилучший ПО зафиксирован с помощью ИДД Кербер-Т для ГМТД при регистрации положительных ионов с подвижностью $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, равный $L_{\text{ГМТД}} = 10$ нг при $I_a = 45$ пА и соотношении $A_i/3\sigma = 120$. При использовании традиционного соотношения сигнал/шум = 3σ (Кербер-Т, $3\sigma = 0.375$ пА) приведенный ПО оценивали величиной $L_{\text{ГМТД}} = 30\text{--}50$ пг, что существенно меньше пределов обнаружения других СИП, равных 0.2 нг [24] и 5 нг (сигнал/шум = 3) [30, 31]. Верхняя граница динамического диапазона достигает величины $m_{\text{ГМТД}} = 0.4$ мкг при амплитуде пика ГМТД 120 пА. При дальнейшем увеличении $m_{\text{ГМТД}} > 0.4$ мкг амплитуда пика ионов $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ уменьшается, а в спектре появляются новые пики. Таким образом, с учетом показателя шума 3σ потенциально динамический диапазон составил $\sim 10^4$.

В пробе с ссПЖО предел обнаружения ГМТД в ПМ регистрировали на уровне $L_{\text{ГМТД}} \approx 50$ нг, а в пробе с обПЖО — $L_{\text{ГМТД}} \approx 150$ нг, причем в последнем случае указанное значение $L_{\text{ГМТД}}$ фиксировали либо для пика ионов подвижностью $K_0_{\text{ГМТД}} = 1.50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, либо для пика предположительно аддукт-катионов ГМТД и мочевины $K_0 = 1.31 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

В отрицательной моде наиболее представительным индикатором наличия в пробе ГМТД в отсутствие МК является пик ионов с $K_0 = 1.91 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, при регистрации которого масса пробы $m_{\text{ГМТД}} = 0.5$ мкг вызывает сигнал $A_i = 4.5$ пА = $12 \cdot (3\sigma)$. При наличии отпечатка с ссПЖО или обПЖО наиболее представительным является появляющийся именно в присутствии МК пик ионов ГМТД с подвижностью $K_0 = 1.48 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, близкий к пику ионов $K_0_{\text{ТНТ}} = 1.47 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что при $m_{\text{ГМТД}} = 0.5$ мкг обеспечивает срабатывание сигнала “тревога” с индикацией обнаружения ТНТ ($I_a = 4.5$ пА). Значение $L_{\text{ГМТД}} = 0.5$ мкг можно считать пределом обнаружения ГМТД в отрицательной моде. К сожалению, в литературе не удалось найти ПО ГМТД в ОМ каких-либо других СИП.

Триацетона трипероксид (ТАТП). Предел обнаружения ТАТП при регистрации ионов $K_0_{\text{ТАТП}} = 2.05 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ является сравнительно высоким $L_{\text{ТАТП}} = 15$ мкг ($A_i/3\sigma = 160$). Кроме

того, с увеличением $m_{\text{ТАТП}} \geq 20$ мкг амплитуда этого пика практически не возрастает, а при $m_{\text{ТАТП}} \geq 50$ мкг уменьшается и в спектрах появляется много новых неразделенных пиков. Приведенный ПО (3σ) оценивали величиной ~ 0.1 мкг. Опубликованные значения ПО ТАТП других СИП сильно различаются – от 5 нг [31] и 23.3 нг [24] до 3.9 мкг [32] и $\sim 10^2$ мкг [22]. Приведенный ПО ИДД Кербер-Т лежит примерно в середине указанного диапазона значений.

Можно оценить предел обнаружения паров ТАТП в воздухе $L_{\nu, \text{ТАТП}}$, используя значения I_a , e_i , Q , число Авогадро $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ моль $^{-1}$ и число Лошмидта $N_L = 2.69 \times 10^{19}$ см $^{-3}$. Например, при температуре воздуха $T = 298$ К по пику ионов $K_0_{\text{ТАТП}} = 2.05$ см 2 /(В·с), для которого $I_a = 60$ пА и $e_i = 0.003$ Кл/моль, $L_{\nu, \text{ТАТП}} = (I_a / (e_i \cdot Q)) \cdot (N_A / N_L) \cdot (298 / 273) \times 10^6 \approx 779100$ ppt, а приведенный ПО при $I_a = 3\sigma = 0.375$ пА составил $L_{\nu, \text{ТАТП}} \approx 0.6$ ppt. Для сравнения в отрицательной моде $L_{\nu, \text{ТНТ}} \approx 167$ ppt (1.5 пг/см 3), так как $e_i(\text{ТНТ}) = 11$ Кл/моль [17].

В присутствии отпечатка с ссПЖО или обПЖО предел обнаружения ТАТП по пику ионов $K_0_{\text{ТАТП}} = 2.05$ см 2 /(В·с) оценивали величиной $L_{\text{ТАТП}} = 50$ мкг. При дальнейшем увеличении $m_{\text{ТАТП}} > 50$ мкг в спектрах появляется много других неразделенных пиков в области $t_d = 35 \div 50$ мс, амплитуда пика ионов $K_0_{\text{ТАТП}} = 2.05$ см 2 /(В·с) уменьшается и сигнал “тревога” не вырабатывается.

Таким образом, необходимо особо отметить, что ИДД Кербер-Т имеет верхнюю границу обнаружения ТАТП, примерно равную $m_{\text{ТАТП}} \approx 50$ мкг. Это означает, что для проб с $m_{\text{ТАТП}} > 50$ мкг высока вероятность отсутствия сигнала “тревога” (ложноотрицательный сигнал – “пропуск цели”). Возможно, выявленное ограничение присуще любым СИП с данным типом ионизации.

Нитрат аммония (НА). Обнаружение НА имеет особенность. Так как образование ионов НА происходит посредством реакции автоионизации (уравнение (1)), зависимость амплитуды пика ионов $K_0_{\text{НА}} = 2.01$ см 2 /(В·с) от массы НА в пробе нелинейна – $A_{\text{НА}} \sim (m_{\text{НА}})^k$, где $k > 1$. Например, при $m_{\text{НА}} = 5$ нг – $A_{\text{НА}} = 0$, $m_{\text{НА}} = 10$ нг – $A_{\text{НА}} \approx 25$ пА, $m_{\text{НА}} = 20$ нг – $A_{\text{НА}} \approx 150$ пА. Из этих данных ПО НА оценивали величиной $L_{\text{НА}} \approx 15$ нг (при $A_{\text{НА}}/3\sigma = 120$). Указанное значение ПО на два порядка выше, чем, например, приведенный ПО НА (при $A_{\text{НА}}/3\sigma = 1$) 0.1 нг СИП с фотоионизацией [23].

В присутствии ссПЖО или обПЖО предел обнаружения НА по пику ионов $K_0_{\text{НА}} = 2.01$ см 2 /(В·с) оценивали величиной $L_{\text{НА}} = 100$ нг.

Экспериментально оценили время жизни следов ГМТД, ТАТП и НА на алюминиевой фольге. Время жизни следов ГМТД с массами $m_{\text{ГМТД}} = 1 \times 10^{-9}$, 2×10^{-9} , 1×10^{-8} г и поверхностными плотностями $d_s = 0.008$, 0.016 , 0.08 мкг/см 2 примерно равно 1, 3 и 12 ч соответственно. Время жизни следа ТАТП массой $m_{\text{ТАТП}} = 1 \times 10^{-5}$ г и $d_s \gg 80$ мкг/см 2 оценивается величиной $\sim 10^2$ с, а массой $m_{\text{ТАТП}} = 1 \times 10^{-4}$ г и $d_s \gg 800$ мкг/см $^2 \sim 10^3$ с. Наличие следов НА с массами $m_{\text{НА}} = 3 \times 10^{-8}$, 5×10^{-8} г и $d_s = 0.24$, 0.4 мкг/см 2 регистрировали в течение 13 и 25 ч соответственно.

* * *

Подводя итог, можно отметить следующее. Мочевина и молочная кислота являются теми компонентами ПЖО отпечатка пальца, которые могут влиять на эффективность обнаружения ГМТД, ТАТП и НА с помощью СИП с ИАД в положительной и отрицательной модах. Наличие в пробе мочевины или ПЖО оказывает небольшое влияние на регистрацию ТАТП в положительной моде, существенно уменьшает эффективность образования ионов ГМТД, вызывая появление предположительно аддукт-катионов ГМТД и мочевины с подвижностью $K_0 = 1.31$ см 2 /(В·с). Наличие в пробе МК или ПЖО незначительно уменьшает эффективность образования ионов НА в отрицательной моде, сильно изменяет качественный состав ионов ГМТД, вызывая появление наиболее интенсивного пика предположительно аддукт-анионов фрагмента ГМТД и МК с подвижностью $K_0 = 1.48$ см 2 /(В·с).

Пределы обнаружения следовых количеств ГМТД в ПМ и ОМ, ТАТП в ПМ и НА в ОМ с учетом высоких уровней срабатывания сигнала “тревога” ($\sim 100\sigma$) ИДД Кербер-Т, уменьшающих вероятность ложноположительных сигналов при решении реальных задач обнаружения ВВ в присутствии возможных мешающих веществ, составили 10 нг, 0.5 мкг, 15 мкг и 15 нг, а этих же ВВ, но в присутствии отпечатка пальца с обильными ПЖО – 150 нг, 0.5 мкг, 50 мкг и 100 нг соответственно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Научно-исследовательского

технологического института им. А.П. Александра. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Conklin C. Reducing the Threat of Improvised Explosive Device Attacks by Restricting Access to Explosive Precursor Chemicals. CISA, 2019. 11 p.
2. Grantham A. AMAT Insights. Reducing Risks Associated with Ammonium Nitrate. Geneva: GICHD, 2020. 26 p.
3. Bom di Mall Alam Sutera Gunakan TATP, Pertama di Indonesia. <https://www.liputan6.com/news/read/2352321/bom-di-mall-alam-sutera-gunakan-tatp-pertama-di-indonesia> (дата обращения 01.09.2022).
4. Взорвать “мать Сатаны”: ФСБ задержала боевиков, готовивших теракты в Москве. <https://ria.ru/20170814/1500327022.html> (дата обращения 01.09.2022).
5. Key Trends in Terrorism. <https://www.newamerica.org/international-security/reports/jihadist-terrorism-17-years-after-911/key-trends-in-terrorism/> (дата обращения 01.09.2022).
6. “Mother of Satan” explosives used in Surabaya church bombings: Police. <https://www.thejakartapost.com/news/2018/05/14/mother-of-satan-explosives-used-in-surabaya-church-bombings-police.html> (дата обращения 01.09.2022).
7. Gunasingham A. Sri Lanka attacks: An analysis of the aftermath // Counter Terrorist Trends and Analyses. 2019. V. 11. № 6. P. 8.
8. Indonesian police seize 5 bombs, explosives during terrorist raids. http://www.xinhuanet.com/english/2021-03/29/c_139844716.htm (дата обращения 01.09.2022).
9. Sniffing Out Terrorism. https://archives.fbi.gov/archives/news/stories/2005/december/k9_explosives122305 (дата обращения 01.09.2022).
10. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Reducing the Threat of Improvised Explosive Device Attacks by Restricting Access to Explosive Precursor Chemicals. Washington, DC: The National Academies Press, 2018. P. 154.
11. Teen charged with terrorism offences. <https://www.reuters.com/article/uk-britain-security-idUKL2932538820080429> (дата обращения 01.09.2022).
12. A look at the explosives used in the New York bombing. <https://cen.acs.org/articles/94/i38/look-explosives-used-New-York.html> (дата обращения 01.09.2022).
13. Oslo government district bombing and Utøya island shooting July 22, 2011: The immediate prehospital emergency medical service response. <https://sjtrem.biomedcentral.com/articles/10.1186/1757-7241-20-3> (дата обращения 01.09.2022).
14. Banlaoi R.C. The Lamitan bombing and terrorist threat in the Philippines // Counter Terrorist Trends and Analyses. 2018. V. 10. № 9. P. 1.
15. Eiceman G.A., Karpas Z., Hill H.H.Jr. Ion Mobility Spectrometry. 3rd Ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 444 p.
16. DeBono R., Lareau R.T. Trace detection of explosives by ion mobility spectrometry / Counterterrorist Detection Techniques of Explosives / Eds. Cagan A., Oxley J. C. 2nd Ed. Elsevier, 2022. P. 163.
17. Буряков Т.И., Буряков И.А. Обнаружение следовых количеств взрывчатых веществ в присутствии молочной кислоты методом спектрометрии ионной подвижности // Журн. аналит. химии. 2022. Т. 77. № 1. С. 28. (Buryakov T.I., Buryakov I.A. Detection of trace amounts of explosives in the presence of lactic acid by ion mobility spectrometry // J. Anal. Chem. 2022. V. 77. № 1. P. 43.)
18. Ewing R.G., Waltman M.J., Atkinson D.A. Characterization of triacetone triperoxide by ion mobility spectrometry and mass spectrometry following atmospheric pressure chemical ionization // Anal. Chem. 2011. V. 83. P. 4838.
19. Skalny J.D., Orszagh J., Mason N., Rees J.A., Aranda-Gonzalvo Y., Whitmore T.D. Mass spectrometric study of negative ions extracted from point to plane negative corona discharge in ambient air at atmospheric pressure // Int. J. Mass Spectrom. 2008. V. 272. P. 12.
20. Ewing R.G., Waltman M.J. Mechanisms for negative reactant ion formation in an atmospheric pressure corona discharge // Int. J. Ion Mobil. Spectrom. 2009. V. 12. P. 65.
21. Kozole J., Levine L.A., Tomlinson-Phillips J., Stairs J.R. Gas phase ion chemistry of an ion mobility spectrometry based explosive trace detector elucidated by tandem mass spectrometry // Talanta. 2015. V. 140. P. 10.
22. Marr A.J., Groves D.M. Ion mobility spectrometry of peroxide explosives TATP and HMTD // Int. J. Ion Mobility Spectrom. 2003. V. 6. P. 59.
23. Cheng S., Wang W., Zhou Q., Chen C., Peng L., Hua L. et al. Fast switching of CO₃⁻(H₂O)_n and O₂⁻(H₂O)_n reactant ions in dopant-assisted negative photoionization ion mobility spectrometry for explosives detection // Anal. Chem. 2014. V. 86. P. 2687.
24. Jiang D., Peng L., Wen M., Zhou Q., Chen C., Wang X. et al. Dopant-assisted positive photoionization ion mobility spectrometry coupled with time-resolved thermal desorption for on-site detection of TATP and HMTD in complex matrices // Anal. Chem. 2016. V. 88. № 8. P. 4391.
25. DART (Direct Analysis in Real Time) Applications Notebook. Atmospheric Pressure Ionization High-Resolution Time-of-Flight Mass Spectrometer. JEOL Ltd, 2016. P. 40.

26. *Kalhor H., Alizadeh N.* Determining urea levels in dialysis human serum by means of headspace solid phase microextraction coupled with ion mobility spectrometry and on the basis of nanostructured polyurethane film // *Anal. Bioanal. Chem.* 2013. V. 405. P. 5333.
27. *Головин А.В., Васильев В.К., Иванов И.А., Беляков В.В., Громов Е.А., Малкин Е.К., Матуско М.А., Першенков В.С.* Двухполярный спектрометр ионной подвижности // *Датчики и системы.* 2018. № 2. С. 4. (*Golovin A.V., Vasilyev V.K., Ivanov I.A., Belyakov V.V., Gromov E.A., Malkin E.K., Matusko M.A., Pershenkov V.S.* Bipolar ion mobility spectrometer // *Sensors and Systems.* 2018. № 2. P. 4.)
28. *Головин А.В.* Спектрометр ионной подвижности с источником ионизации на основе импульсного коронного разряда. Дис. ... канд. тех. наук. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2010. 197 с.
29. *Громов Е.А.* Система регистрации и управления спектрометрическим каналом двухполярного спектрометра ионной подвижности. Москва: Дис. ... канд. тех. наук. Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2018. 160 с.
30. *Ehlert S., Walte A., Zimmermann R.* Ambient pressure laser-desorption and laser induced acoustic desorption ion-mobility-spectrometry detection of explosives // *Anal. Chem.* 2013. V. 85. № 22. P. 11047.
31. *Cook G.W.* Improving ion mobility spectrometry detection methods for trace forensics and military field applications. Dis. ... PhD. Bethesda: The Uniformed Services University of the Health Sciences, 2006. 117 p.
32. *Oxley J.C., Smith J.L., Kirschenbaum L.J., Marimanganti S., Vadlamannati S.* Detection of explosives in hair using ion mobility spectrometry // *J. Forensic Sci.* 2008. V. 53. № 3. P. 690.

ORIGINAL ARTICLES

DETECTING TRACE AMOUNTS OF PEROXIDES AND AMMONIUM NITRATE IN FINGERPRINTS BY ION MOBILITY SPECTROMETRY**T. I. Buryakov^{a, *}, I. A. Buryakov^{a, **}**^a*Alexandrov Research Institute of Technology, 188540, Sosnovy Bor, Leningrad oblast, Russia***E-mail: buryakovti@gmail.com****E-mail: buryakovia@gmail.com*

Abstract. The effect of the sweat and grease deposits (SGD) from fingerprints on the detection efficiency of trace amounts of explosive substances—triacetone triperoxide (TATP), hexamethylene triperoxide diamine (HMTD), and ammonium nitrate (AN) by ion mobility spectrometry in air at atmospheric pressure was investigated. Among the main components of SGD, urea is identified as a positive mode influencer, while lactic acid (LA) affects in a negative mode. The presence of urea or SGD in the sample does not significantly affect the detection of TATP in the positive mode but decreases the efficiency of HMTD ion formation and leads to the appearance of adduct cations of HMTD and urea. The presence of lactic acid or SGD slightly decreases the efficiency of ammonium nitrate ion formation in the negative mode and significantly alters the qualitative composition of HMTD ions, leading to the appearance of HMTD and LA adduct anions. In the absence of any impurities in the sample, the best reduced limit of detection (signal-to-noise ratio = 3σ), estimated at 30–50 pg, was observed for HMTD. The lifetime of HMTD, TATP, and AN traces on aluminum foil under laboratory conditions was determined to be 1, 3, and 12 h for samples with masses of m_{HMTD} 1×10^{-9} , 2×10^{-9} , and 1×10^{-8} g and surface densities d_s of 0.008, 0.016, and 0.08 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively; 10^2 and 10^3 s for m_{TATP} 1×10^{-5} and 1×10^{-4} g and d_s of 80 and 800 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively; 12 and 25 h for m_{AN} 3×10^{-8} and 5×10^{-8} g and d_s of 0.24 and 0.4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively.

Keywords: ion mobility spectrometry, triacetone triperoxide, hexamethylene triperoxide diamine, ammonium nitrate, human fingerprint residue, urea, lactic acid.