

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ТЕХНОГЕННЫМ УГРОЗАМ, ВКЛЮЧАЯ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УГРОЗАХ НЕВОЕННОГО ХАРАКТЕРА

COUNTERING MAN-MADE THREATS, INCLUDING ENSURING RADIOLOGICAL SAFETY IN NON-MILITARY THREATS

Научная статья
УДК 535.3; 535.5
doi: 10.17223/7783494/1/3

Исследование эволюции поверхностной концентрации следов высокоэнергетических веществ в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим и лидарным методами

Сергей Михайлович Бобровников¹, Евгений Владимирович Горлов²,
Виктор Иванович Жарков³, Сергей Николаевич Мурашко⁴,
Юрий Николаевич Панченко⁵, Валерий Анатольевич Аксёнов⁶,
Андрей Владимирович Кихтенко⁷, Мария Ильинична Тивилёва⁸

^{1, 2, 4, 5} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{1, 2, 3, 4} *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

⁵ *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

^{6, 8} *Сибирский филиал ФКУ НПО «Спецтехника и связь» МВД России, Новосибирск, Россия*

⁷ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *bsm@iao.ru*

² *gorlov_e@mail.ru*

³ *zharkov@iao.ru*

⁴ *msn_17@mail.ru*

⁵ *yu.n.panchenko@mail.ru*

⁶ *duploduba@mail.ru*

⁷ *kikht@mail.ru*

⁸ *mtivileva@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования эволюции поверхностной концентрации следов циклотриметилентринитрамина (RDX) в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим методом и с помощью метода лазерной фрагментации / лазерно-индуцированной флуоресценции. Описана методика оценки поверхностной плотности следов RDX в потожировых отпечатках пальцев на основе попиксельного анализа макрофотографий, сделанных в поляризованном свете. Приведены экспериментальные данные по дистанционному обнаружению частиц RDX в отпечатках пальца. Сопоставление данных прямых измерений суммарной площади следа с данными откликов лидарного обнаружителя ЛФ / ЛИФ дает хорошее согласие.

Ключевые слова: высокоэнергетические вещества, циклотриметилентринитрамин, следы, макросъемка, лазерная фрагментация, лазерно-индуцированная флуоресценция

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н., Панченко Ю.Н., Аксёнов В.А., Кихтенко А.В., Тивилёва М.И. Исследование эволюции поверхностной концентрации следов высокоэнергетических веществ в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим и лидарным методами // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 8–18. doi: 10.17223/7783494/1/3

Original article

doi: 10.17223/7783494/1/3

Study of the evolution of the surface concentration of traces of high energy substances in fingerprints by polarization macrophotographic and lidar methods

Sergei M. Bobrovnikov¹, Evgeny V. Gorlov², Viktor I. Zharkov³, Sergei N. Murashko⁴,
Yury N. Panchenko⁵, Valery A. Aksenov⁶, Andrey V. Kikhtenko⁷, Maria I. Tivileva⁸

^{1, 2, 4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2, 3, 4} V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

⁵ Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

^{6, 8} Federal Government Institution of Scientific and Production Association "Special Equipment and Telecoms" of the Ministry of the Internal Affairs of the Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation

⁷ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russian Federation

¹ bsm@iao.ru

² gorlov_e@mail.ru

³ zharkov@iao.ru

⁴ msn_17@mail.ru

⁵ yu.n.panchenko@mail.ru

⁶ duploduba@mail.ru

⁷ kikht@mail.ru

⁸ mtivileva@yandex.ru

Abstract. The results of the study of the evolution of the surface concentration of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) traces in fingerprints by the polarization macrophotographic method and by the method of laser fragmentation/laser-induced fluorescence are presented. A technique for estimating the surface density of RDX traces in fingerprints based on a pixel-by-pixel analysis of macrophotographs taken in polarized light is described. Experimental data on remote detection of RDX particles in fingerprints are presented. Comparison of the data of direct measurements of the total area of the trace with the data of the responses of the LF/LIF lidar detector gives good conformability.

Keywords: high energy substances, cyclotrimethylenetrinitramine, traces, macro photography, laser fragmentation, laser-induced fluorescence

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Bobrovnikov, S.M., Gorlov, E.V., Zharkov, V.I., Murashko, S.N., Panchenko, Yu.N., Aksenov, V.A., Kikhtenko, A.V. & Tivileva, M.I. (2023) Study of the evolution of the surface concentration of traces of high energy substances in fingerprints by polarization macrophotographic and lidar methods. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 8–18. doi: 10.17223/7783494/1/3 (In Russian).

Введение

Переносимые скрытно взрывные устройства (ВУ) можно выявить по ряду демаскирующих признаков, к числу которых относятся следовые количества взрывчатых веществ (ВВ) на руках человека и различных поверхностях, имевших контакт с этими веществами (например, одежда, поверхность ручной клади, крышки, элементы упаковки, рукоятки запоров кузова). Объекты, имевшие газовоздушный или непосредственный контакт с ВУ или ВВ, могут адсорбировать частицы ВВ на своей поверхности и сохранять их довольно длительное время. Попытки избавиться от таких следов далеко не всегда достигают своей цели. Следы ВВ на руках человека сохраняются до нескольких часов, и даже однократное мытье рук с мылом не может гарантировать избавление от их присутствия.

Поскольку само понятие «след» может меняться в зависимости от решаемой задачи, не существует и

общепринятого мнения относительно уровня концентрации, при котором для его характеристики применяют термин «следовые количества». В настоящей работе под следом будет пониматься наслоение микроскопических частиц следообразующего вещества (ВВ) на твердую следовоспринимающую поверхность в результате их переноса с поверхности пальцев рук при контакте. Поверхностная концентрация вещества в следах в этом случае, очевидно, будет зависеть от исходной концентрации ВВ на поверхности пальцев, силы давления пальцев на поверхность объекта, состояния и физических свойств следовоспринимающей поверхности, кратности касания и т.д. Поэтому оценить содержание частиц ВВ в следе априорно не представляется возможным.

Целью работы является определение параметров следов ВВ в отпечатках пальцев, влияющих на эффективность их обнаружения методом лазерной фрагментации / лазерно-индуцированной флуорес-

ценции (ЛФ / ЛИФ). Для этого будет исследована микроструктура следов и проведено экспериментальное исследование возможности их дистанционного обнаружения методом ЛФ/ЛИФ.

Кратко суть метода ЛФ / ЛИФ состоит в использовании эффекта фотодиссоциации (фотофрагментации, фотолиза) оптически малоактивных молекул с целью образования характеристических фрагментов, имеющих высокую эффективность в процессе ЛИФ. Выбор в качестве характеристического фрагмента функциональной группы (или ее части) исходного соединения позволяет достоверно определить его принадлежность к конкретному классу соединений. Например, для всех нитросоединений общим в их

структуре является наличие нитро- или нитрозо- групп. Возникающие в процессе фотофрагментации нитросоединений молекулы оксида азота (NO-фрагменты), очевидно, могут служить маркерами исходных соединений [1–17].

Методика создания следов

Для имитации контакта с ВВ указательный палец руки прижимали к поверхности с порошкообразным циклотриметилентринитрамин (RDX). Сила давления ($2,2 \pm 0,2$ Н) при этом соответствовала минимальной силе захвата F , необходимой для удержания на весу двумя пальцами руки предмета массой $m = 200$ г при коэффициенте трения $\mu = 0,5$ (рис. 1).

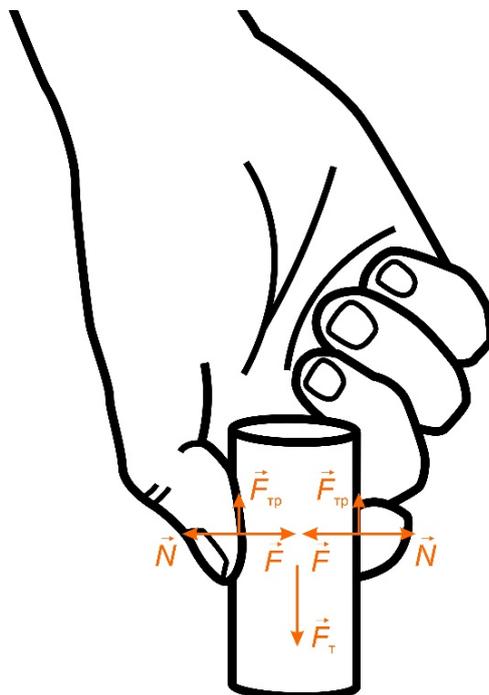


Рис. 1. Захват и удержание предмета на весу

Fig. 1. Capturing and holding an object

Величина F определялась из условия

$$2F_{\text{тр}} \geq F_T,$$

где $F_{\text{тр}} = \mu N$ – сила трения; N – сила реакции опоры, равная по величине F ; $F_T = mg$ – сила тяжести; g – ускорение свободного падения. После переноса частиц ВВ на палец руки его многократно прикладывали к чистой поверхности, оставляя на ней потожировые отпечатки с частицами ВВ. В качестве следовоспринимающей поверхности в работе использовалось предметное стекло (ТУ 9464-012-52876859-2014). Стекла с первым, десятым, двадцатым, тридцатым, сороковым, пятидесятым, шестидесятым, семидесятым, восьмидесятым, девяностым и сотым отпечатками пальца использовались для последующего исследования микроструктуры следов ВВ и

экспериментального исследования возможности их дистанционного обнаружения методом ЛФ / ЛИФ.

Микроструктура следов RDX в отпечатках пальца

Известно, что кристаллические частицы RDX обладают естественной оптической активностью [18]. При прохождении линейно поляризованного света через такие вещества плоскость поляризации света оказывается повернутой относительно своего исходного положения. Явление вращения плоскости поляризации может быть использовано для повышения контраста при распознавании кристаллических частиц RDX на фоне потожирового отпечатка пальца, состоящего из аморфного вещества. Для этого пре-

парат необходимо разместить в проходящем свете между двумя скрещенными поляризаторами.

На рис. 2 представлена схема стенда для макросъемки следов ВВ в проходящем свете с помощью фотоаппарата Canon EOS 500D с объективом EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS. Цифровые изображения предметного стекла, помещенного между двумя скрещенными поляризаторами, до и после нанесения 50-го отпечатка пальца представлены на рис. 3, *a* и *b* соответственно. Из рис. 3, *a* видно, что в изображении «чистого» предметного стекла присутствуют яркие вкрапления – признак непреднамеренного загрязнения поверхности

стекла частицами «постороннего» вещества, вращающего плоскость поляризации проходящего излучения. Ожидаемо, их наличие сохраняется и после нанесения целевого вещества на ту же поверхность (см. рис. 3, *b*). Исключение подобных артефактов проводилось путем попиксельного «вычитания» изображения *a* из изображения *b* в ходе цифровой обработки с помощью программы *ImageJ* (<https://imagej.nih.gov/ij/>) и получения в результате разностного изображения. Результат такой обработки снимков представлен на рис. 3, *c*. Разностные изображения всех образцов представлены на рис. 4.

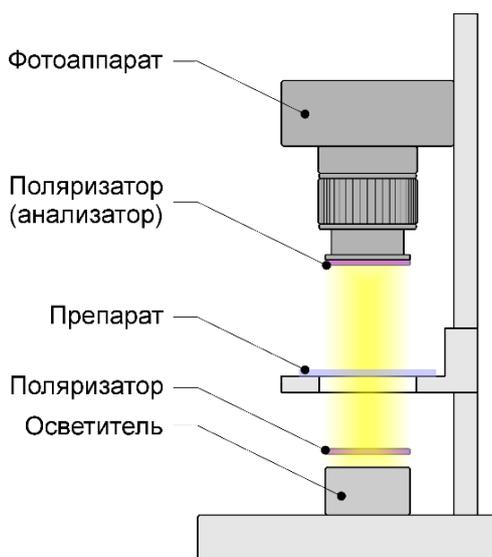


Рис. 2. Стенд для макросъемки следов ВВ в проходящем свете

Fig. 2. Stand for macro photography of traces of HES in transmitted light

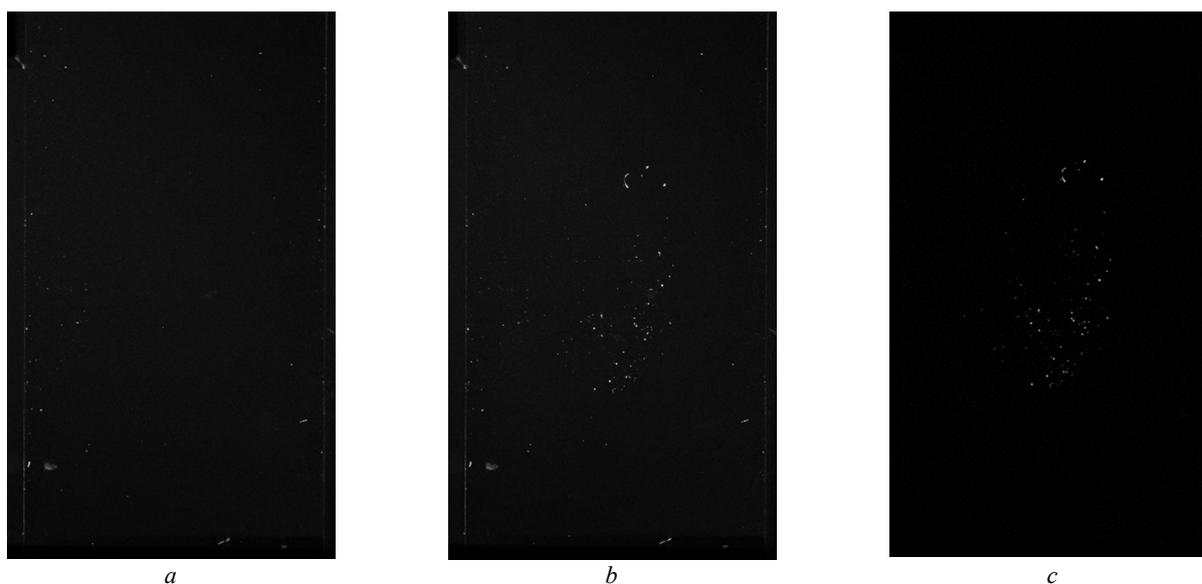


Рис. 3. Цифровые изображения: *a* – «чистое» предметное стекло до нанесения отпечатка пальца; *b* – то же предметное стекло с 50-м отпечатком пальца со следами RDX; *c* – разностное изображение

Fig. 3. Digital images: *a* – “clean” glass slide before fingerprinting; *b* – the same slide with the 50th fingerprint with traces of RDX; *c* – difference image

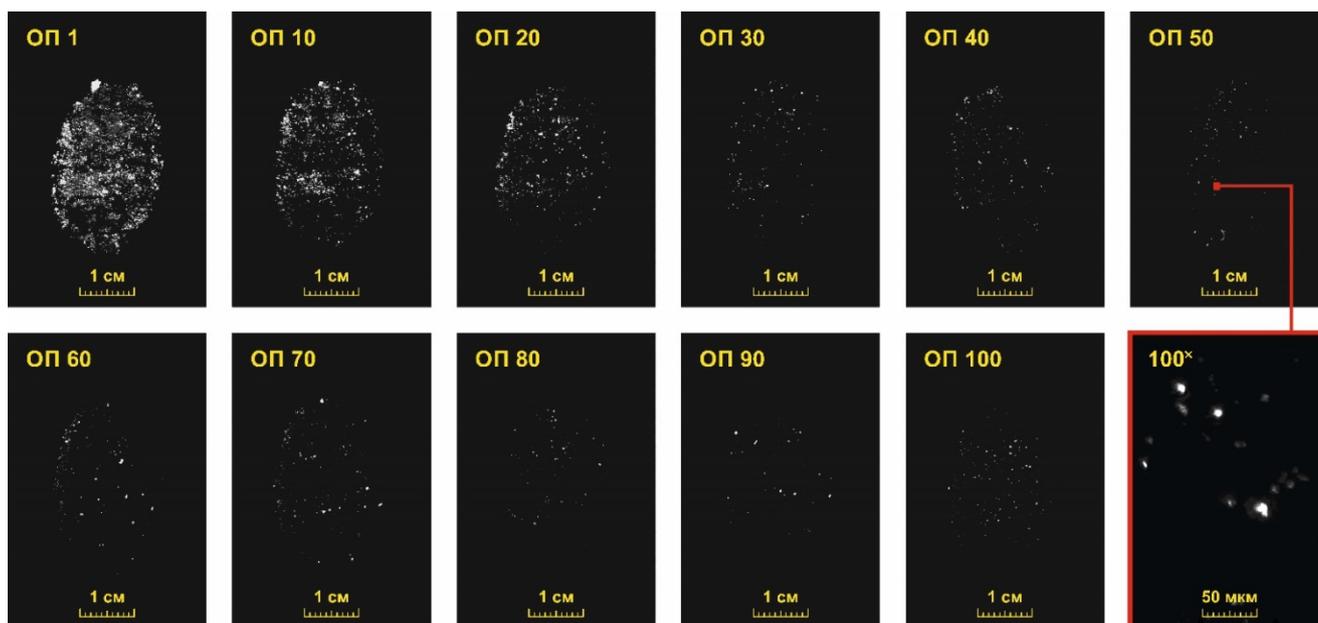


Рис. 4. Разностные изображения потожировых отпечатков пальца с частицами RDX на стеклянной поверхности: ОП – отпечаток пальца; 1, 10, 20, ...100 – порядковый номер отпечатка пальца; 100^x – стократное увеличение фрагмента изображения «ОП 50», полученное с помощью поляризационного микроскопа

Fig. 4. Difference images of fingerprints with RDX microparticles on a glass surface: ОП – fingerprint; 1, 10, 20, ...100 – serial number of the fingerprint; 100^x – a hundredfold increase in the image fragment “ОП 50”, obtained using a polarizing microscope

Как видно из рисунка, площадь следа значительно уменьшается при переходе от 1-го к 100-му отпечатку пальца. Количественный попиксельный анализ макрофотографий показал, что уменьшение площади следа происходит монотонно и для 100-го отпечатка

эта площадь примерно на два порядка меньше исходной (рис. 5).

Анализ макрофотографий следов показывает, что проекции частиц RDX на плоскость подложки имеют разнообразную форму (рис. 6, a–c).

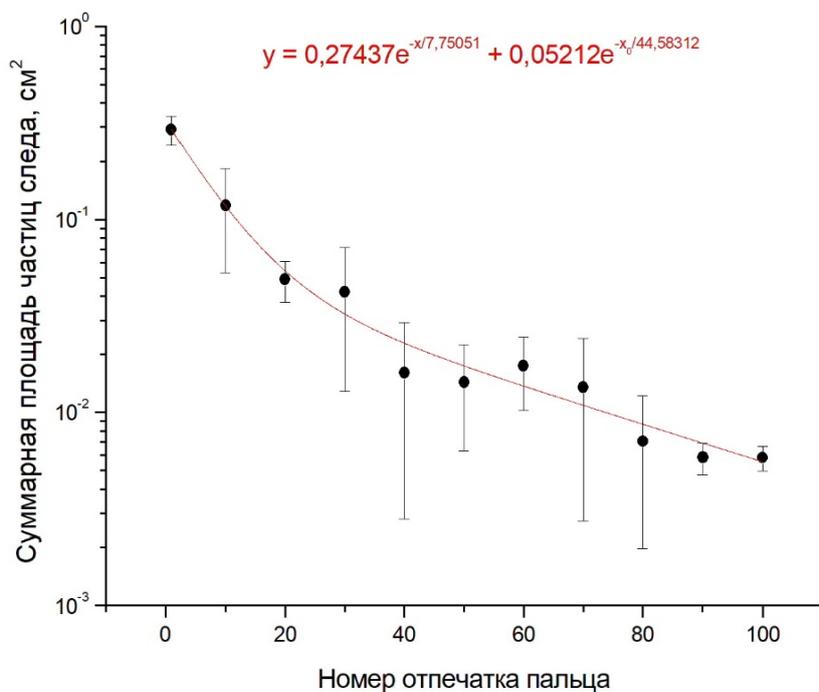


Рис. 5. Зависимость суммарной площади частиц следа от порядкового номера отпечатка пальца

Fig. 5. Dependence of the total area of trace particles on the serial number of the fingerprint

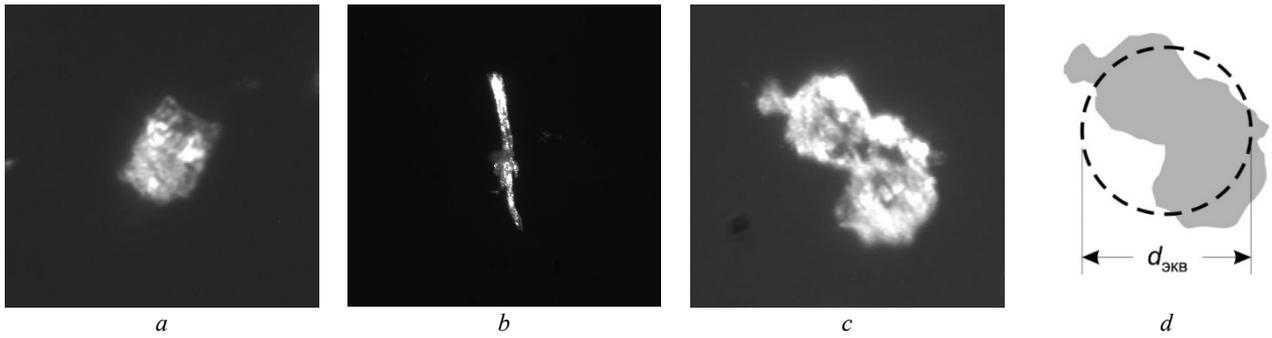


Рис. 6. Морфология частиц RDX

Fig. 6. Morphology of RDX particles

В этом случае мы имеем дело с плоскими фигурами, размер которых может быть охарактеризован с помощью некоторых эквивалентных параметров. Это могут быть максимальный и минимальный диаметр (линейный размер), диаметры Ферета и Мартина и т.д., каждый из которых определяет эффективный размер частицы.

Для определения эффективного объема частиц можно использовать аппроксимацию, предполагающую замену реальных частиц эквивалентными частицами правильной геометрической формы. В [18] для оценки объема V микроскопических частиц RDX в отпечатках пальца предложено использовать выражение

$$V = \frac{1}{6} \pi d_{\text{экв}}^2 h,$$

где $d_{\text{экв}}$ – поверхностно-эквивалентный диаметр – диаметр окружности, площадь которой равна площади поверхностной проекции исходной частицы (рис. 6, d); $h \approx 0,31d_{\text{экв}}$ – толщина частицы.

Таким образом, зная объем частиц и плотность RDX ($1,858 \text{ г/см}^3$), можно оценить общую массу ВВ в отпечатках пальца. Результат подобных вычислений представлен на рис. 7.

Как видно из рисунка, масса перенесенного ВВ при первом касании составляет ~ 3 мг и уменьшается до ~ 30 мкг в сотом отпечатке пальца.

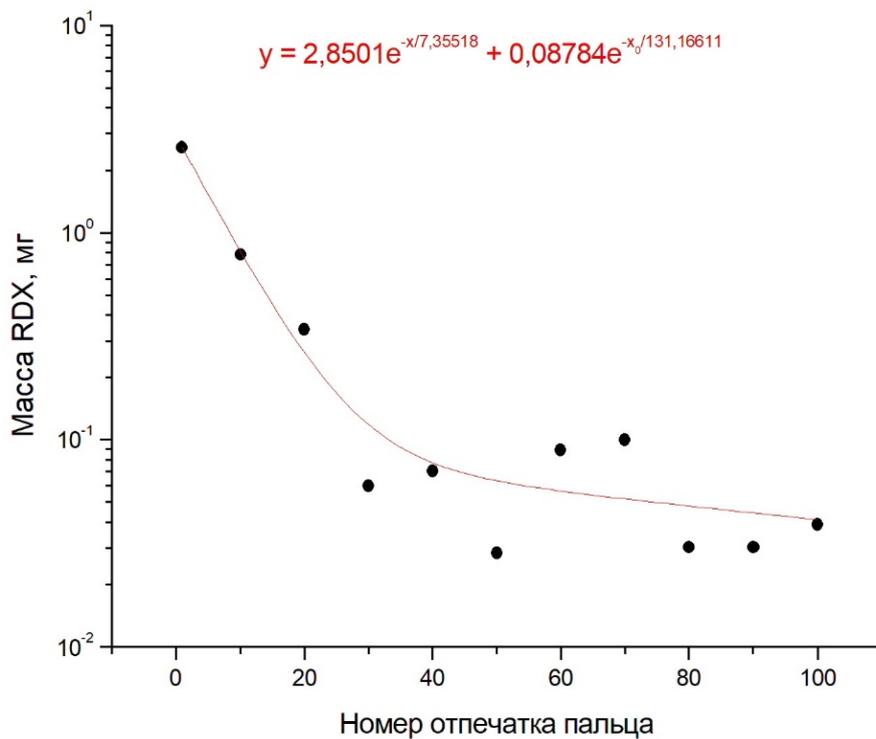


Рис. 7. Зависимость массы RDX от порядкового номера отпечатка пальца

Fig. 7. Dependence of the RDX mass on the serial number of the fingerprint

Дистанционное обнаружение следов ВВ в отпечатках пальца методом ЛФ / ЛИФ

Блок-схема установки для экспериментальных исследований представлена на рис. 8.

Для фрагментации молекул RDX и возбуждения флуоресценции их NO-фрагментов использовался перестраиваемый KrF-лазер с узкой линией генерации ~ 5 пм в области расположения канта ветви P_{12} полосы поглощения $A^2\Sigma^+(v' = 0) - X^2\Pi(v'' = 2)$ молекулы NO (247,867 нм) [19].

С помощью поворотных зеркал 31 и 32 выходной пучок лазера направлялся в область обнаружения. Для обеспечения необходимой плотности энергии лазерного излучения на поверхности объекта использовалась двухлинзовая система Л1–Л2. Синхронный запуск лазера и системы фотодетектирования осуществлялся с помощью генератора импульсов ГИ, управляемого от компьютера ПК.

Под действием излучения лазера от поверхности объекта возникал оптический отклик, который частично собирался приемной оптической системой двойного дифракционного спектрометра на вогнутых голографических решетках. Спектрометр осуществлял спектральное выделение $\gamma(0, 0)$ -полосы флуоресценции NO-фрагментов нитросоединений в диапазоне длин волн 222–227 нм с пропусканием $\sim 25\%$ и уровне подавления линии несмещенного рассеяния 10^{-12} . Для регистрации выделенного участка спектра использовалась стробируемая ПЗС-камера с усилителем яркости (Andor iStar DH-712).

Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 8.

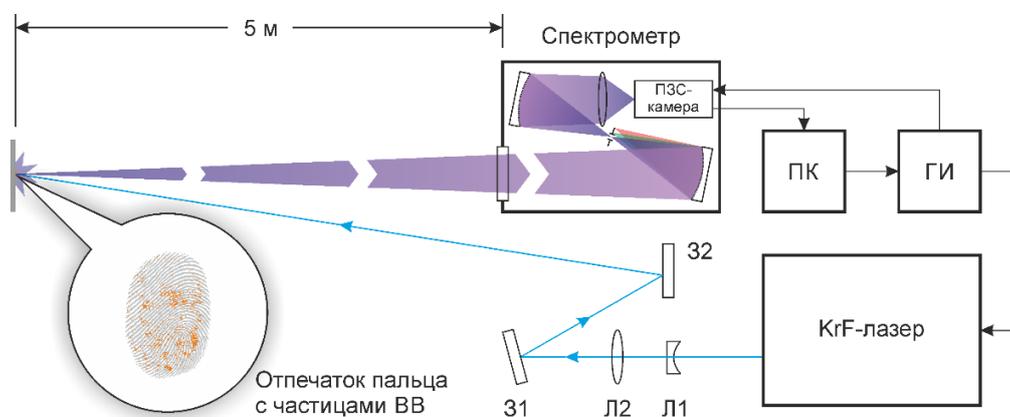


Рис. 8. Блок-схема установки для дистанционного обнаружения следов RDX в отпечатках пальца на стеклянной поверхности: 31 и 32 – направляющие зеркала; Л1 и Л2 – линзы; ГИ – генератор импульсов; ПК – персональный компьютер

Fig. 8. Block diagram of a setup for remote detection of RDX traces in fingerprints on a glass surface
31 and 32 – guiding mirrors; Л1 and Л2 – lenses; ГИ – pulse generator; ПК – personal computer

В зоне обнаружения на расстоянии 5 м от макета дистанционного обнаружителя следов ВВ устанавливался объект с закрепленным на его поверхности образцом со следами RDX. Далее производилось импульсное лазерное воздействие на поверхность образца с последующей регистрацией оптического отклика от него. Регистрация оптического отклика велась в режиме счета фотонов. При объеме накопления сигнала по 50 лазерным импульсам и частоте следования лазерных импульсов 20 Гц время одного измерения составляло 2,5 с. Все измерения проводились в лабораторном помещении при температуре 23 °С. Плотность энергии в лазерном импульсе составляла ~ 30 мДж/см².

Результаты экспериментов

Результаты экспериментов по обнаружению следовых количеств RDX в отпечатках пальцев на предметном стекле представлены в таблице. Разработанный экспериментальный макет аппаратуры

достоверно регистрировал отклик на наличие RDX в сотом отпечатке пальца.

Результаты экспериментов по обнаружению следов RDX в отпечатках пальцев на предметном стекле

Порядковый номер отпечатка пальца	Среднее число фотоотсчетов отклика от поверхности образца со следами ВВ ($\bar{n}_s + \bar{n}_n$)	Среднее число шумовых фотоотсчетов отклика (от чистой поверхности образца) \bar{n}_n	Отношение сигнал/шум \bar{n}_s / \bar{n}_n
1	138	1	137
10	36	1	35
20	17	1	16
30	13	1	12
40	11	1	10
50	14	1	13
60	15	1	14
70	4	1	3
80	4	1	3
90	6	1	5
100	3	1	2

Интенсивность ЛИФ NO-фрагментов RDX, нормированная на интенсивность от первого отпечатка пальца, представлена на рис. 9. Здесь же для сравнения приведена нормированная зависимость площади следа от порядкового номера отпечатка пальца (см. рис. 5).

Видно, что обе зависимости хорошо согласуются между собой. Вероятно, это связано с тем, что излучение с длиной волны ~ 248 слабо проникает в объем частиц RDX (глубина проникновения импульса излучения составляет ~ 55 нм). Для серии из 50-лазерных импульсов слой вещества, проваимодействовавший

с излучением, составит не более 3 мкм. Распределение частиц RDX по параметру h в приготовленных образцах (рис. 10) показывает, что доля частиц с $h \leq 10$ мкм составляет около 9% от общего числа частиц. Таким образом, при оценке эффективности использования ЛФ / ЛИФ-метода определяющее значение будет иметь площадь следа, а не масса вещества в нем. С учетом этой особенности очевидно, что чувствительность метода в терминах поверхностной концентрации ($\text{мкг}/\text{см}^2$) будет зависеть от структуры следа.

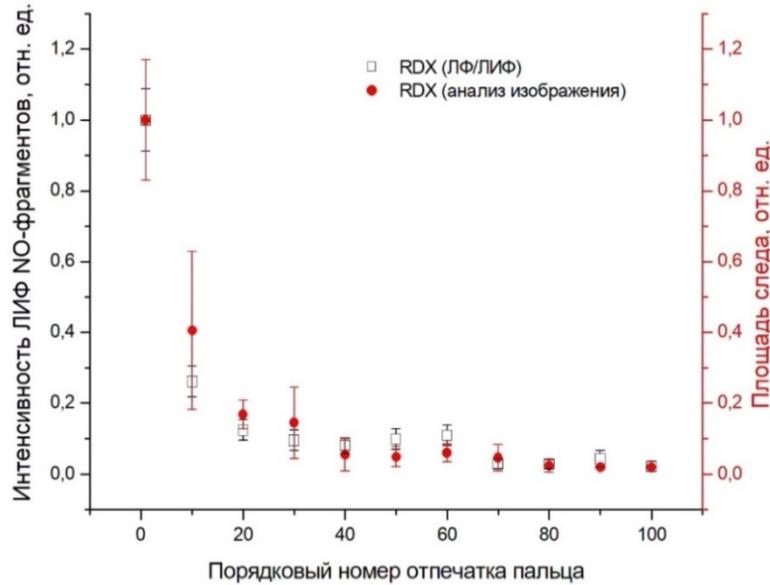


Рис. 9. Нормированные зависимости интенсивности ЛИФ и площади следа от порядкового номера отпечатка пальца

Fig. 9. Normalized dependences of LIF intensity and trace area on the serial number of the fingerprint

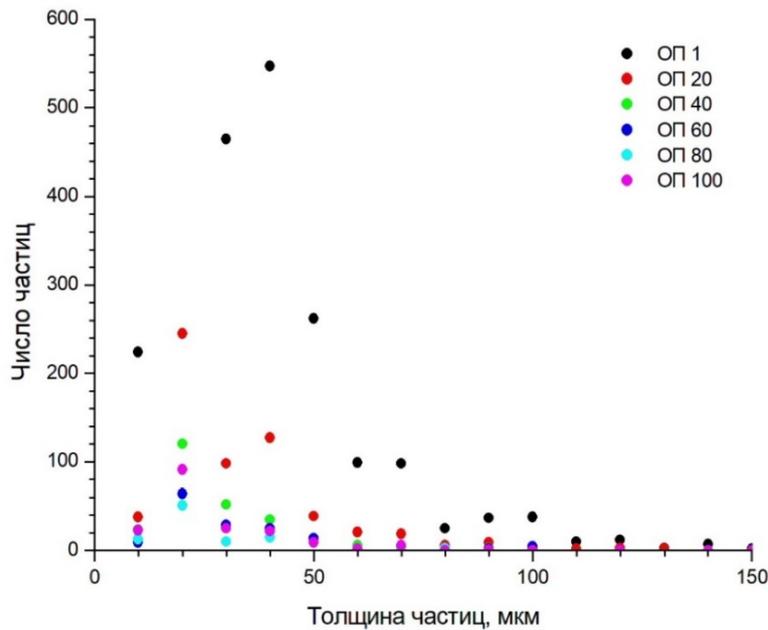


Рис. 10. Распределение частиц RDX по параметру h

Fig. 10. Distribution of RDX particles by parameter h

Заключение

Таким образом, применение метода макрофотографии высокого разрешения в поляризованном свете позволило исследовать эволюцию процесса переноса микрочастиц RDX в потожировых отпечатках пальцев от 1-го до 100-го. При этом сила давления при каждом акте переноса отпечатка контролировалась и составляла 2 Н. Такой подход позволил стабилизировать процесс переноса отпечатка и повысить повторяемость результата.

Попиксельный анализ макрофотографий следа позволил осуществить количественную оценку эволюции суммарной площади проекции контура частиц на плоскость подложки и в рамках модели при-

плюснутых сфероидов определить массу следа в каждом отпечатке. Результаты экспериментов позволили построить зависимость массы следа от номера отпечатка. Анализ зависимости показывает, что уменьшение массы вещества следа при переносе происходит по экспоненциальному закону вплоть до 40-го отпечатка, а затем процесс переноса существенно замедляется и, возможно, входит в насыщение. Это явление подтверждает гипотезу высокой сохранности следа в отпечатке пальцев и требует дополнительного исследования.

Сопоставление данных прямых измерений суммарной площади следа с данными откликов лидарного обнаружителя ЛФ / ЛИФ дает хорошее согласие.

Список источников

1. Rodgers M.O., Davis D.D. A UV-Photofragmentation/Laser-Induced Fluorescence Sensor for the Atmospheric Detection of HONO // *Environmental science & technology*. 1989. V. 23 (9). P. 1106–1112. DOI: 10.1021/es00067a007
2. Galloway D.B., Bartz J.A., Huey L.G., Crim F.F. Pathways and kinetic energy disposal in the photodissociation of nitrobenzene // *The Journal of chemical physics*. 1993. V. 98 (3). P. 2107–2114. DOI: 10.1063/1.464188
3. Lemire G.W., Simeonsson J.B., Sausa R.C. Monitoring of vapor-phase nitro compounds using 226-nm radiation: fragmentation with subsequent NO resonance-enhanced multiphoton ionization detection // *Analytical Chemistry*. 1993. V. 65 (5). P. 529–533. DOI: 10.1021/AC00053A008
4. Galloway D.B., Glenewinkel-Meyer T., Bartz J.A., Huey L.G., Crim F.F. The Kinetic and Internal Energy of NO from the Photodissociation of Nitrobenzene // *The Journal of chemical physics*. 1994. V. 100 (3). P. 1946–1952. DOI: 10.1063/1.466547
5. Wu D.D., Singh J.P., Yueh F.Y., Monts D.L. 2,4,6-Trinitrotoluene detection by laser-photofragmentation–laser-induced fluorescence // *Applied Optics*. 1996. V. 35 (21). P. 3998–4003. DOI: 10.1364/AO.35.003998
6. Simeonsson J.B., Sausa R.C. A critical review of laser photofragmentation/fragment detection techniques for gas phase chemical analysis // *Applied Spectroscopy Reviews*. 1996. V. 31 (1). P. 1–72. DOI: 10.1080/05704929608000564
7. Swayambunathan V., Singh G., Sausa R.C. Laser photofragmentation–fragment detection and pyrolysis–laser-induced fluorescence studies on energetic materials // *Applied optics*. 1999. V. 38 (30). P. 6447–6454. DOI: 10.1364/AO.38.006447
8. Daugey N., Shu J., Bar I., Rosenwaks S. Nitrobenzene detection by one-color laser photolysis/laser induced fluorescence of NO ($\nu = 0-3$) // *Applied spectroscopy*. 1999. V. 53 (1). P. 57–64. DOI: 10.1366/0003702991945227
9. Shu J., Bar I., Rosenwaks S. Dinitrobenzene Detection by Use of One-color Laser Photolysis and Laser-Induced Fluorescence of Vibrationally Excited NO // *Applied optics*. 1999. V. 38 (21). P. 4705–4710. DOI: 10.1364/AO.38.004705
10. Shu J., Bar I., Rosenwaks S. NO and PO photofragments as trace analyte indicators of nitrocompounds and organophosphonates // *Applied Physics B*. 2000. V. 71 (5). P. 665–672. DOI: 10.1007/S003400000382
11. Shu J., Bar I., Rosenwaks S. The use of rovibrationally excited NO photofragments as trace nitrocompounds indicators // *Applied Physics B*. 2000. V. 70(4). P. 621–625. DOI: 10.1007/S003400050870
12. Arusi-Parpar T., Heflinger D., Lavi R. Photodissociation Followed by Laser-Induced Fluorescence at Atmospheric Pressure and 24°C: A Unique Scheme for Remote Detection of Explosives // *Applied optics*. 2001. V. 40 (36). P. 6677–6681. DOI: 10.1364/AO.40.006677
13. Heflinger D., Arusi-Parpar T., Ron Y., Lavi R. Application of a unique scheme for remote detection of explosives // *Optics Communications*. 2002. V. 204 (1–6). P. 327–331. DOI: 10.1016/S0030-4018(02)01250-6
14. Wynn C.M., Palmacci S., Kunz R.R., Rothschild M. Noncontact detection of homemade explosive constituents via photodissociation followed by laser-induced fluorescence // *Optics express*. 2010. V. 18 (6). P. 5399–5406. DOI: 10.1364/OE.18.005399
15. Wynn C.M., Palmacci S., Kunz R.R., Aernecke M. Noncontact optical detection of explosive particles via photodissociation followed by laser-induced fluorescence // *Optics express*. 2011. V. 19 (19). P. 18671–18677. DOI: 10.1364/OE.19.018671
16. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V. Lidar method for remote detection of vapors of explosives in the atmosphere // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011. V. 24 (3). P. 235–241. DOI: 10.1134/S1024856011030055
17. Bobrovnikov S.M., Vorozhtsov A.B., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Maksimov E.M., Panchenko Y.N., Sakovich G.V. Lidar detection of explosive vapors in the atmosphere // *Russian Physics Journal*. 2016. V. 58(9). P. 1217–1225. DOI: 10.1007/s11182-016-0635-9
18. Verkouteren J.R., Coleman J.L., Cho I. Automated Mapping of Explosives Particles in Composition C-4 Fingerprints // *Journal of Forensic Sciences*. 2010. V. 55(2). P. 334–340. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2009.01272.x
19. Panchenko Y., Puchikin A., Yampolskaya S., Bobrovnikov S., Gorlov E., Zharkov V. Narrowband KrF Laser for Lidar Systems // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2021. V. 57 (2). P. 1–5. DOI: 10.1109/JQE.2021.3049579

References

1. Rodgers, M.O. & Davis, D.D. (1989) A UV-Photofragmentation/Laser-Induced Fluorescence Sensor for the Atmospheric Detection of HONO. *Environmental science & technology*. 23(9). pp. 1106–1112. DOI: 10.1021/es00067a007
2. Galloway, D.B., Bartz, J.A., Huey, L.G. & Crim, F.F. (1993) Pathways and kinetic energy disposal in the photodissociation of nitrobenzene. *The Journal of chemical physics*. 98(3). pp. 2107–2114. DOI: 10.1063/1.464188

- Lemire, G.W., Simeonsson, J.B. & Sausa, R.C. (1993) Monitoring of vapor-phase nitro compounds using 226-nm radiation: fragmentation with subsequent NO resonance-enhanced multiphoton ionization detection. *Analytical Chemistry*. 65(5). pp. 529–533. DOI: 10.1021/AC00053A008
- Galloway, D.B., Glenwinkel-Meyer, T., Bartz, J.A., Huey, L.G. & Crim, F.F. (1994) The Kinetic and Internal Energy of NO from the Photodissociation of Nitrobenzene. *The Journal of chemical physics*. 100(3). pp. 1946–1952. DOI: 10.1063/1.466547
- Wu, D.D., Singh, J.P., Yueh, F.Y. & Monts, D.L. (1996) 2,4,6-Trinitrotoluene detection by laser-photofragmentation–laser-induced fluorescence. *Applied Optics*. 35(21). pp. 3998–4003. DOI: 10.1364/AO.35.003998
- Simeonsson, J.B. & Sausa, R.C. (1996) A critical review of laser photofragmentation/fragment detection techniques for gas phase chemical analysis. *Applied Spectroscopy Reviews*. 31(1). pp. 1–72. DOI: 10.1080/05704929608000564
- Swayambunathan, V., Singh, G. & Sausa, R.C. (1999) Laser photofragmentation–fragment detection and pyrolysis–laser-induced fluorescence studies on energetic materials. *Applied optics*. 38(30). pp. 6447–6454. DOI: 10.1364/AO.38.006447
- Daugey, N., Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (1999) Nitrobenzene detection by one-color laser photolysis/laser induced fluorescence of NO ($v = 0-3$). *Applied spectroscopy*. 53(1). pp. 57–64. DOI: 10.1366/0003702991945227
- Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (1999) Dinitrobenzene Detection by Use of One-color Laser Photolysis and Laser-Induced Fluorescence of Vibrationally Excited NO. *Applied optics*. 38(21). pp. 4705–4710. DOI: 10.1364/AO.38.004705
- Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (2000) NO and PO photofragments as trace analyte indicators of nitrocompounds and organophosphonates. *Applied Physics B*. 71(5). pp. 665–672. DOI: 10.1007/S003400000382
- Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (2000) The use of rovibrationally excited NO photofragments as trace nitrocompounds indicators. *Applied Physics B*. 70(4). pp. 621–625. DOI: 10.1007/S003400050870
- Arusi-Parpar, T., Heflinger, D. & Lavi, R. (2001) Photodissociation Followed by Laser-Induced Fluorescence at Atmospheric Pressure and 24°C: A Unique Scheme for Remote Detection of Explosives. *Applied optics*. 40(36). pp. 6677–6681. DOI: 10.1364/AO.40.006677
- Heflinger, D., Arusi-Parpar, T., Ron, Y. & Lavi, R. (2002) Application of a unique scheme for remote detection of explosives. *Optics Communications*. 204(1–6). pp. 327–331. DOI:10.1016/S0030-4018(02)01250-6
- Wynn, C.M., Palmacci, S., Kunz, R.R. & Rothschild, M. (2010) Noncontact detection of homemade explosive constituents via photodissociation followed by laser-induced fluorescence. *Optics express*. 18(6). pp. 5399–5406. DOI: 10.1364/OE.18.005399
- Wynn, C.M., Palmacci, S., Kunz, R.R. & Aernecke, M. (2011) Noncontact optical detection of explosive particles via photodissociation followed by laser-induced fluorescence. *Optics express*. 19(19). pp. 18671–18677. DOI: 10.1364/OE.19.018671
- Bobrovnikov, S.M. & Gorlov, E.V. (2011) Lidar method for remote detection of vapors of explosives in the atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 24(3). pp. 235–241. DOI: 10.1134/S1024856011030055
- Bobrovnikov, S.M., Vorozhtsov, A.B., Gorlov, E.V., Zharkov, V.I., Maksimov, E.M., Panchenko, Y.N. & Sakovich, G.V. (2016) Lidar detection of explosive vapors in the atmosphere. *Russian Physics Journal*. 58(9). pp. 1217–1225. DOI: 10.1007/s11182-016-0635-9
- Verkouteren, J.R., Coleman, J.L. & Cho, I. (2010) Automated Mapping of Explosives Particles in Composition C-4 Fingerprints. *Journal of Forensic Sciences*. 55(2). pp. 334–340. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2009.01272.x
- Panchenko, Y., Puchikin, A., Yampolskaya, S., Bobrovnikov, S., Gorlov, E. & Zharkov, V. (2021) Narrowband KrF Laser for Lidar Systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 57(2). pp. 1–5. DOI: 10.1109/JQE.2021.3049579

Информация об авторах:

Бобровников Сергей Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); заведующий Центром лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: bsm@iao.ru

Горлов Евгений Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: gorlov_e@mail.ru

Жарков Виктор Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: zharkov@iao.ru

Мурашко Сергей Николаевич – инженер научно-исследовательской лаборатории лазерного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: msn_17@mail.ru

Панченко Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); заведующий лабораторией газовых лазеров Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: yu.n.panchenko@mail.ru

Аксёнов Валерий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Сибирского филиала Федерального казенного учреждения Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России (Новосибирск, Россия). E-mail: duploduba@mail.ru

Кихтенко Андрей Владимирович – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск, Россия). E-mail: kikht@mail.ru

Тивилёва Мария Ильинична – заместитель начальника Сибирского филиала Федерального казенного учреждения Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России (Новосибирск, Россия). E-mail: mtivileva@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bobrovnikov Sergei M., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); head of Center of Laser Atmosphere Sensing, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: bsm@iao.ru

Gorlov Evgeny V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gorlov_e@mail.ru

Zharkov Viktor I., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zharkov@iao.ru

Murashko Sergei N., engineer, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Engineer, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: msn_17@mail.ru

Panchenko Yuri N., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); head of Laboratory of Gas Lasers, Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yu.n.panchenko@mail.ru

Aksenov Valery A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, leading researcher of the Siberian branch of the Federal State Institution Scientific and Production Association "Special Equipment and Communications" of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: duploduba@mail.ru

Kikhtenko Andrey V., Cand.Sc. (Chemistry), researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: kikht@mail.ru

Tivileva Maria I., deputy head of the Siberian Branch of the Federal State Institution Scientific and Production Association "Special Equipment and Communications" of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: mtivileva@yandex.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023