

# **НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ДОСМОТРА ГРУЗОВ И ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

## **FUTURE PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF X-RAY INSPECTION SYSTEMS FOR CARGO AND VEHICLES**

**Огородников Сергей Анатольевич**

**Sergey Ogorodnikov**

ООО «Скантроник Системс», заместитель генерального директора – директор

по науке и технологиям, кандидат технических наук,

Scantronic Systems Ltd., Deputy Director General – R&D Director, Ph.D.,

e-mail: [sergey.ogorodnikov@scantronicsystems.com](mailto:sergey.ogorodnikov@scantronicsystems.com)

**Виканова Алена Анатольевна**

**Alena Vikanova**

ООО «Скантроник Системс», руководитель группы математического

обеспечения,

Scantronic Systems Ltd., Head of the Mathematics Development Group,

e-mail: [alena.vikanova@scantronicsystems.com](mailto:alena.vikanova@scantronicsystems.com)

**Лебедев Василий Сергеевич**

**Vasiliy Lebedev**

ООО «Скантроник Системс», математик-программист,

Scantronic Systems Ltd., Mathematician-programmer,

e-mail: [vasiliy.lebedev@scantronicsystems.com](mailto:vasiliy.lebedev@scantronicsystems.com)

*Статья посвящена описанию основных направлений и перспектив развития систем досмотра грузов и транспортных средств. Особое внимание отводится описанию наиболее актуальных и перспективных направлений: малоракурсной томографии и методам глубокого обучения (искусственный интеллект), который позволят в ближнесрочной/среднесрочной перспективе создать принципиально новый тип инспекционно-досмотровых комплексов с функционалом автоматического/автоматизированного обнаружения взрывчатых веществ и объектов-угроз.*

*The article describes the main directions and prospects for the development of cargo and vehicle x-ray inspection systems. Special attention is paid to the description of the most relevant and promising development areas: rare-view tomography and deep learning methods (artificial intelligence), which will allow in the short/medium term to create a fundamentally new type of x-ray inspection systems with the functionality of automatic/automated detection of explosives and threat-objects.*

**Ключевые слова:** таможенный контроль; пограничный контроль; портальный инспекционно-досмотровый комплекс; стационарный инспекционно-досмотровый комплекс; малоракурсная томография; методы глубокого обучения; искусственный интеллект; автоматическое / автоматизированное обнаружение; взрывчатые вещества; объекты-угрозы.

**Keywords:** customs control; border control; portal x-ray inspection system; stationary x-ray inspection system; rare-view tomography; deep learning methods; artificial intelligence; automatic/automated detection; explosives; threat-objects.

## **Введение**

Ведущие мировые производители систем и комплексов досмотра грузов и транспортных средств ведут непрерывный процесс совершенствования Технологии сканирования с целью получения наиболее качественных рентгеноскопических изображений для анализа с участием оператора, а также возможностью проведения автоматизированного/автоматического анализа грузов на предмет выявления как несоответствий декларациям, так и выявления опасных предметов и веществ [1-4].

С точки зрения характеристик рентгеноскопических изображения, таких как проникающая способность, контрастная чувствительность, чувствительность по проволоке, пространственное разрешение, мировые производители, использующие линейные ускорителя электронов за прошедшие годы добились достаточно впечатляющих результатов для ИДК разных типов и классов (СИДК, ЖД ИДК, МИДК, Портальные ИДК, Гибридные ИДК), достигнув в определенном смысле предельных характеристик, упираясь в ограничения физических законов генерации, прохождения и детектирования тормозного излучения.

К числу открытых и актуальных технологических вопросов для ряда производителей ИДК можно было бы отнести разработку и внедрение качественной и достоверной Технологии распознавания материалов [5] при однопроекционном или двухпроекционном сканировании для всех типов инспекционно-досмотровых комплексов, в том числе, для потоковых ИДК с высокими скоростями сканирования, типа железнодорожных и портальных ИДК.

Использование линейных ускорителей электронов с криогенным СВЧ-питанием ускоряющей системы позволяет эффективно решить данную технологическую проблему для потоковых ИДК за счет высокой частоты повторения импульсов (частоты выборки рентгеноскопического изображения), использования быстрой Автоматической Подстройки Частоты Генератора (АПЧГ), дуплетной схемы сканирования и высокого качества пучка тормозного излучения, в первую очередь, по стабильности эффективной граничной энергии спектра [6].

Так, в ИДК всех типов и классов разработки и производства Сканtronик Системс используются технологии:

### **X-Mat, Z-Recovery, X-Weight**

позволяющие производить эффективное распознавание материалов в грузах и транспортных средствах [4].

Дальнейшее совершенствование Технологии сканирования для улучшения и повышения эффективности распознавания материалов оставляет для разработчиков поле деятельности в таких областях научных знаний и технологий, как:

- улучшение механизма компенсации дрейфа эффективного атомного номера по углу при распознавании материалов для ускорителей с энергиями в диапазоне 4-10 МэВ, в том числе для высоких энергий с повышенной анизотропией углового-энергетического распределения поля тормозного излучения;
- апробирование механизма бесшовной сварки рентгеноскопических изображений на основе специальных индивидуализированных детекторов для ИДК с полной частотой выборки для формирования рентгеноскопического изображения для увеличенного доступного диапазона скоростей сканирования: 5-70 км/ч для железнодорожных и 3-20 км/ч для портальных ИДК с распознаванием материалов;
- разработка математического метода частичной компенсации вклада рассеянного излучения в рентгеноскопическое изображение ИДК, в том числе, портальных ИДК;
- проведение работ по увеличению проникающей способности комплексов, в частности, для создания портальных комплексов нового класса: СТ-2634П без увеличения радиационной защиты, в том числе, для увеличения диапазона эффективного распознавания материалов.

Однако по большому счету далее, после реализации усовершенствования Технологии по вышеозначенным пунктам, просматривается так называемый Технологический потолок или иными словами технологический Тупик. Неизбежно встает вопрос поиска и выбора стратегического Пути (Путей) развития Технологии ИДК.

### **Quō vādis?**

Высокую ценность для создания новых Продуктов в области сканирования грузов и транспортных средств имеют два стратегических направления развития:

- разработка методов многоракурсного/малоракусного сканирования (Томография) для автоматизированного/автоматического обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) [7];
- внедрение методов глубокого обучения (Искусственный Интеллект) для анализа изображений и автоматического выявления объектов-угроз [8].

## Томография для ИДК

Скантроник Системс на сегодняшний день рассматривает в качестве одного из главных направлений развития технологии сканирования - концепцию томографического метода обнаружения взрывчатых веществ для инспекционно-досмотровых комплексов на основе линейных ускорителей электронов с дуплетной модуляцией энергии по критериям эффективный атомный номер – плотность материала [9].

Проведенные в инициативном порядке теоретические изыскания и математическое моделирование метода реконструкции физической плотности груза по ограниченному числу ракурсов позволяют специалистам Скантроник Системс рассматривать данное направление, как одно из важных и перспективных, куда направляются усилия по развитию Технологии сканирования с использованием ИДК, в том числе, портального типа.

Главная Цель – автоматизированное/автоматическое обнаружение ВВ в целях транспортной и инфраструктурной безопасности, по приемлемой для крупных заказчиков стоимости - это – один из главных призов в технологической гонке между основными мировыми лидерами-производителями ИДК.

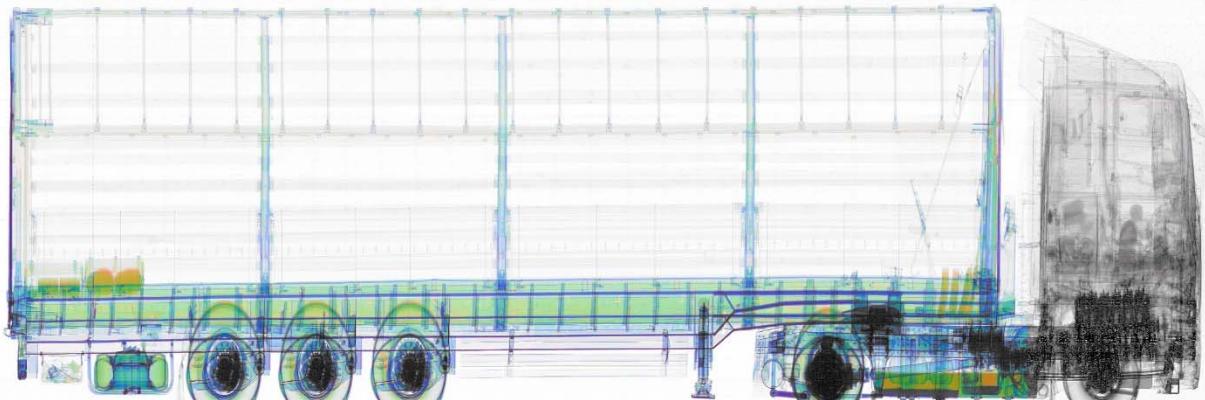


Рис. 1. Рентгеноскопическое изображение фуры с распознаванием материалов с использованием портального ИДК.

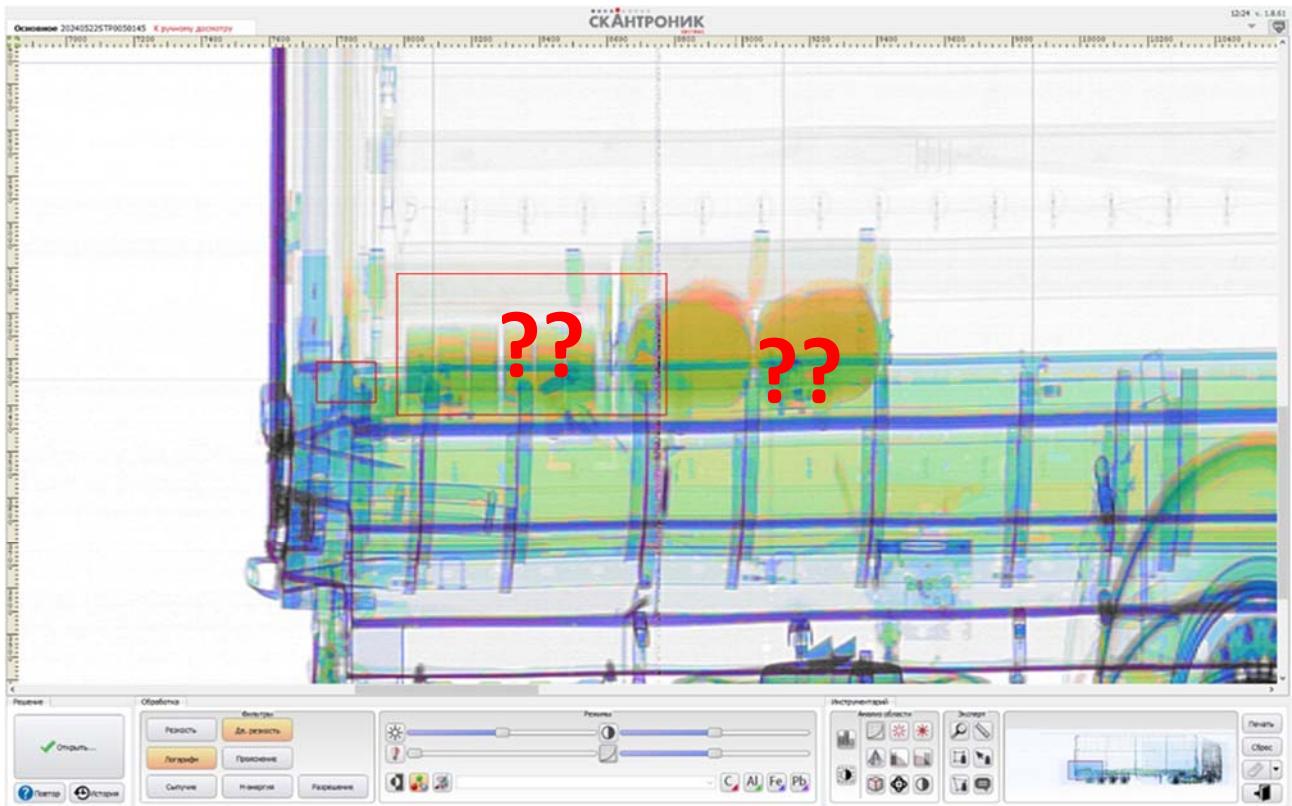


Рис. 2. Фрагмент рентгеноскопического изображения фуры с эмулятором ВВ (меламин).

Рентгеноскопическое изображение фуры с эмулятором взрывчатого вещества (меламин), полученное с использованием ИДК портального типа СТ-2630П с распознаванием материалов. Эмулятор визуализируется лишь как плотная органика. Математические алгоритмы позволяют лишь вычислить массовую толщину [ $\text{г}/\text{см}^2$ ] (величина произведения физической плотности объекта [ $\text{г}/\text{см}^3$ ] и его толщины [см]), при этом определение плотности по одному проекционному ракурсу - невозможно. Таким образом, вынести вердикт – является ли плотная органика ВВ – не представляется возможным с использованием ИДК с одним ракурсом.

### **Классическая КТ для ИДК: PRO ET CONTRA**

Классическая томография [7] технологически подходит и целесообразна главным образом для неразрушающего контроля крупногабаритных объектов, где не так критически важно время, затрачиваемое на экспозицию, а важны высокие характеристики по пространственному и плотностному разрешениям.

В ИДК одно из ключевых маркетинговых преимуществ – высокая пропускная способность при инспекции, и это не может быть принесено в жертву без потери покупной привлекательности Продукта.

Классическая компьютерная томография в применении к ИДК [10] имеет, в силу своей крайне ограниченной пропускной способности, связанной с необходимостью вращения вокруг объекта инспекции многотонного технологического оборудования, существенный, если не сказать критический недостаток против ее широкого массового применения и, в случае ее реализации в виде ИДК, как минимум, будет являться условно нишевым продуктом, рассчитанным только на редкие возможности внедрения и размещения для считанных заказчиков и объектов критической инфраструктуры по всему миру.

Сканtronик Системс инициативно провел научные изыскания и математическое моделирование и предлагает концепцию трехракурсного портального и стационарного ИДК с возможностью автоматического/автоматизированного определения взрывчатых веществ по эффективному атомному номеру и физической плотности, которая одновременно позволит обеспечить высокую пропускную способность при реализации.

Главный камень преткновения в создании трехракурсного ИДК (портального или стационарного) – поиск решения обратной сугубо некорректной математической задачи (иными словами математической задачи, не имеющей единственного и однозначного решения) – реконструкции физической плотности груза всего по трем ракурсам.

Прямого Решения обратной математической задачи не существует, однако, с рядом справедливых допущений, одно из основных которых состоит в том, что для обеспечения транспортной безопасности условно важно обнаружение не листовых взрывчатых веществ (sheet explosives), а объемных ВВ (bulk explosives), то хорошие шансы на Успех есть.

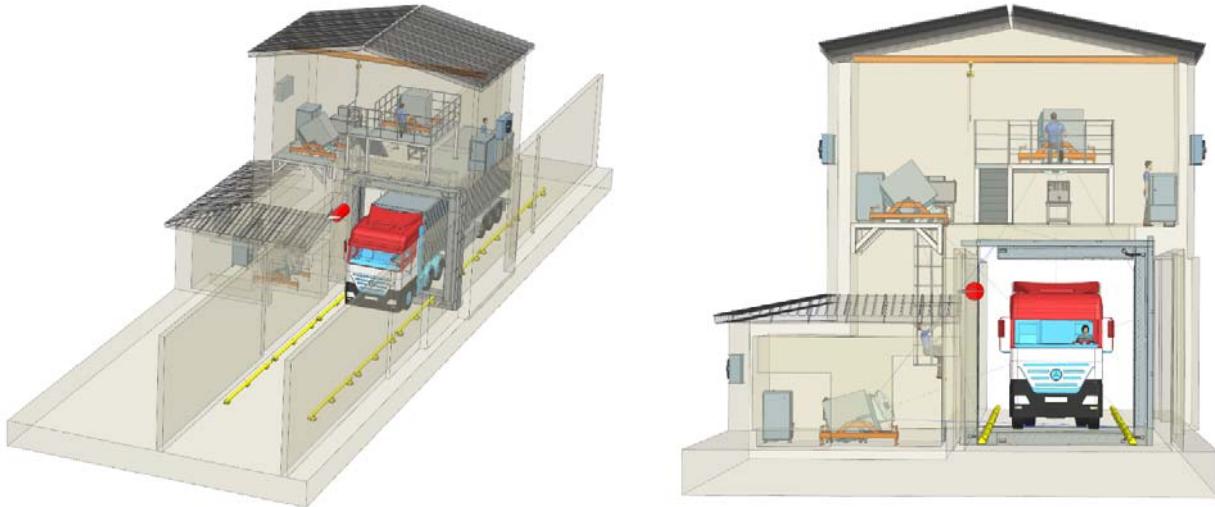


Рис. 3 а,б. Концепция портального трехракурсного ИДК.

Ключ к успеху в решении данной задачи - разработка фундаментального решения по реализации метода обнаружения объемных взрывчатых веществ в ИДК с использованием априорной информации полученной при трехракурсном сканировании и необходимых допущений вследствие актуальных моделей угроз и безусловно использовать строго математический вероятностный подход.

Основные предпосылки/допущения для успешной реализации функции обнаружения ВВ в трехракурсном ИДК:

- Актуальные модели угроз для транспортной безопасности: обнаружение объемных ВВ, как наиболее значимую потенциальную угрозу, в отличие от листовых ВВ в целях обеспечения транспортной безопасности, в отличие от авиационной безопасности.
- Реализация цифровой функции в обнаруженном объемной органической субстанции – автоматизированная процедура цифровой функции отдельно по ручному целеуказанию по трем ракурсам с участием оператора, или автоматическая без участия оператора с реконструкцией сечений за один проход с требуемой частотой выборки (reconstruction sampling rate) всего транспортного средства, а не его отдельных зон под подозрением.
- Априорная информация – цифровая функция с точным целеуказанием и прогнозируемый цифровой отклик известных ВВ по эффективному атомному номеру и плотности при реконструкции.

## **Математическое моделирование реконструкции плотности**

За последние годы большое развитие получили алгебраические итеративные методы томографической реконструкции (Algebraic Reconstruction Technique, ART) [11], которые до недавнего времени представляли в основном академический интерес в силу их большой требуемой вычислительной мощности при проведении математического моделирования (время вычисления обратно пропорционально, по крайней мере, четвертой степени точности). Это стало возможным, в том числе в связи с бурным развитием вычислительной техники и, соответственно, существенным повышением скорости вычислений и обработки данных.

Так в системах рентгеновской компьютерной томографии (СТ), ART методы позволяют реконструировать сечение объекта по ограниченному набору угловых проекционных данных и получить решение, довольно точно приближенное к реальности, при отсутствии полного набора проекционных данных.

Одним из других существенных преимуществ ART методов является их гибкость, возможность построения точной расчетной математической модели при реконструкции в любой геометрии сканирования (точная модель обратной реконструкции в выбранной оптической схеме сканирования, необязательно цилиндрическая), а также возможность эффективного включения априорной информации в процесс реконструкции, что позволяет, например, ставить и решать задачу с целью автоматизированного/автоматического обнаружения взрывчатых веществ по критерию: эффективный атомный номер – плотность, в багаже и грузах, перевозимых в транспортных средствах, по ограниченному числу ракурсов за один проход при сканировании с высокой пропускной способностью.

Некоторые результаты базового математического моделирования типовой модели угроз в грузовом транспортном средстве представлены ниже.

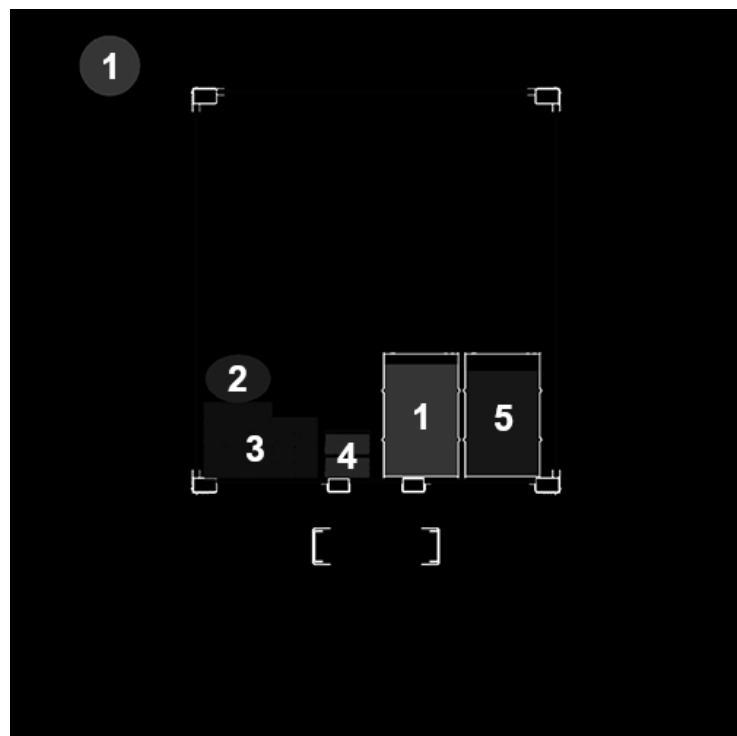


Рис. 4. Типовая модель угроз для грузового транспортного средства. Типы материалов - (1) взрывчатое в-во, (2) полиэтилен, (3) сосна, (4) мыло, (5) бензин.

В качестве исходного объекта был использован срез кузова грузового транспортного средства (сечение), содержащий товары из разных типов материалов, в том числе, объёмное взрывчатое вещество (модель угроз).

Розыгрыш математической модели угроз (рис. 4) и реконструкция позволяют оценить эффективность обнаружения плотной органики (ВВ) в экранирующих органических материалах.

Табл. 1. Цифровая карта материалов модели угроз.

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup> $20^{\circ}\text{C}$ *)	Результирующая плотность	Палитра RGB	Палитра HSL
Воздух	0.00129	0.000129	0,0,0	0,0,0
Взрывчатое в-во	1.7	0.17	54, 54, 54	0,0,21
Сталь	7.85	0.785	251,251,251	0,0,98

<b>Сосна</b>	0.5	0.05	16,16,16	0,0,6
<b>Бензин</b>	0.75	0.075	24,24,24	0,0,9
<b>Полиэтилен</b>	0.92	0.092	29,29,29	0,0,11
<b>Резина автомобильная</b>	1.4	0.14	45,45,45	0,0,18
<b>Картон</b>	0.3	0.03	10,10,10	0,0,4
<b>Мыло</b>	1.2	0.12	38,38,38	0,0,15
<b>Сэндвич</b>	0.13	0.013	4,4,4	0,0,2
<b>Пластик АБС</b>	1.05	0.105	34,34,34	0,0,13
<b>Текстиль</b>	0.4	0.04	13,13,13	0,0,5

\*) <https://temperatures.ru/>

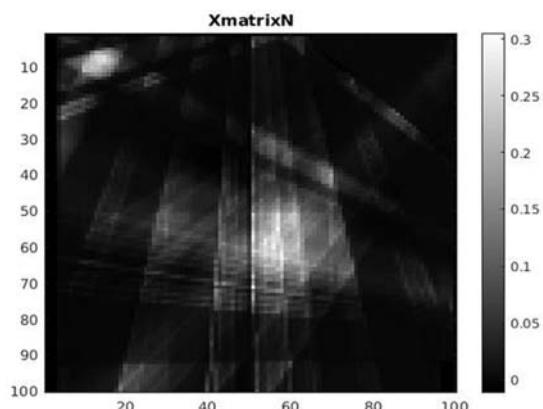


Рис. 5а. Восстановленное изображение фантома модели угроз после реконструкции с регуляризацией и 3-мя итерациями

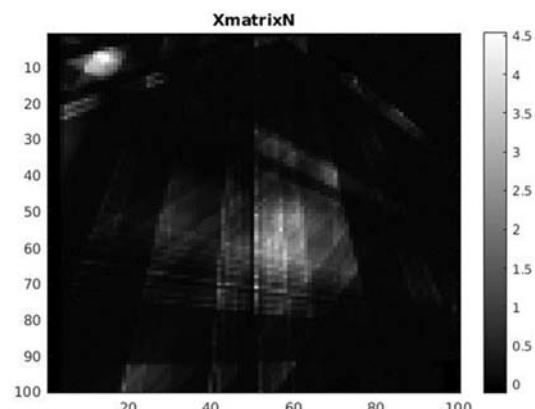


Рис. 5б. Восстановленное изображение фантома модели угроз после реконструкции с регуляризацией и 5-ю итерациями

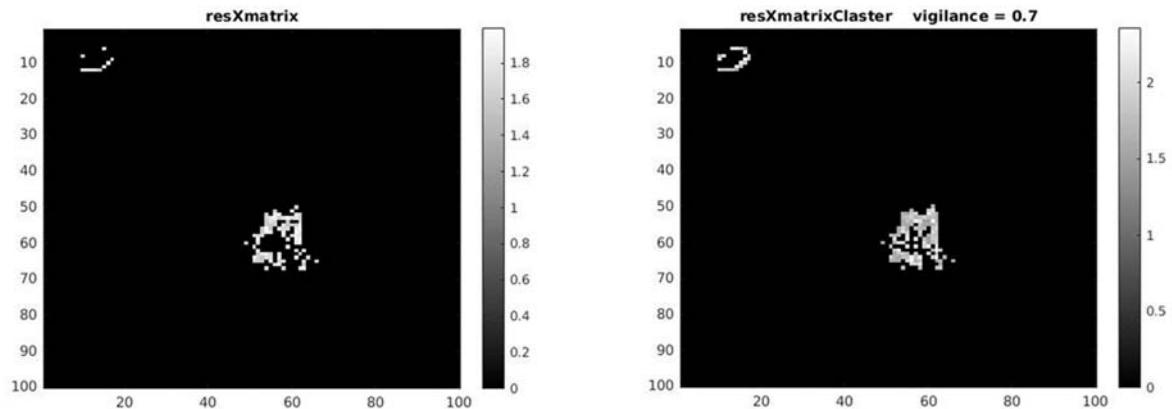


Рис. 5в. Окно принятия булевского решения о присутствии ВВ - гистограммная гильотина: 1.5 – 2.0 г/см<sup>3</sup>

Рис. 5г. Окно принятия булевского решения о присутствии ВВ - гистограммная гильотина после процедуры кластеризации: 1.5 – 2.0 г/см<sup>3</sup>

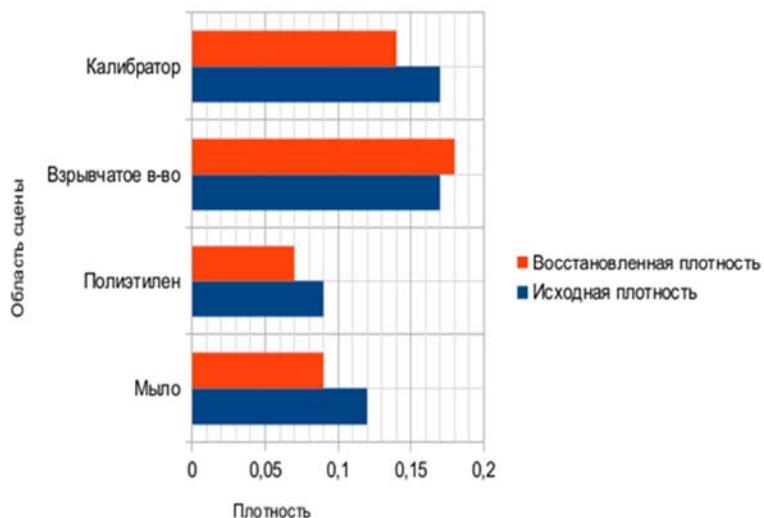


Рис. 6. Результаты реконструкции физической плотности в г/см<sup>3</sup>.

Пример в модели - условно несколько десятков кг ВВ, прикрытое иной органикой: бензином, деревом, полиэтиленом. Для бокового ракурса - это просто яркое насыщенное пятно органика. Решения оператору по одной проекции не принять вообще. Реконструкция по трём ракурсам выделила и сегмент ВВ и калибратор. Пункция сегмента позволила провести сравнение яркостей (плотностей) обеих с вероятностным подходом.

Данный подход эффективно использовать для типовых моделей угроз для разных типов грузов и который также позволяет оценивать предельную

чувствительность данного способа трехракурсного сканирования и математического метода реконструкции физической плотности объекта.

## **Резюме по результатам базового математического моделирования томографического ИДК (три ракурса)**

Можно констатировать, что в результате проведенного базового математического моделирования трехракурсного ИДК, приблизились к достоверному решению данной некорректной математической задачи. Выбрана подходящая форма стоимостной функции, итеративная минимизация которой позволяет выносить булевский вердикт с достаточной степенью достоверности к истинному решению с учетом априорной информации, что может обеспечить достоверное обнаружение ВВ по цифровой пункции по критерию эффективный атомный номер – плотность.

Алгебраическая реконструкция - ресурсоемкий метод, требующий значительных вычислительных мощностей, однако метод позволяет заранее провести расчет системного матричного оператора (проекционной матрицы), который определяется выбранной оптической схемой сканирования, и может быть сохранен в виде заранее рассчитанной референс-таблицы. При этом собственно итеративная реконструкция сцен при математическом моделировании на рабочей станции занимала пяти итераций – несколько десятков секунд, что делает возможным быструю процессорную обработку и использование метода в составе ИДК при сохранении одновременно высокой пропускной способности.

Необходимо использовать всю полноту априорной информации, исходя из наиболее вероятных моделей угроз и безусловно использовать строго математический вероятностный подход по Байесовской теории деления вероятностей. В идеологии данного трехракурсного ИДК нет необходимости точного восстановления сечения объекта досмотра с высоким пространственным и плотностным разрешениями, и создания высокоточного трехмерного изображения объекта сканирования, которое потребует огромного количества времени сканирование, сбор данных, реконструкцию и анализ. В результате автоматизированной/автоматической работы аппаратно-программного комплекса подобного ИДК при сканировании за один проход (до 25 транспортных средств в час в случае стационарного и до 120 транспортных средств в час в случае портального ИДК), нужно принять только одно булевское решение (Вердикт) – либо ДА (наличие ВВ), либо НЕТ (отсутствие ВВ).

И это – одна из ключевых предпосылок к Успеху данной Задачи и Проекта.

## **Методы глубокого обучения для ИДК («Искусственный Интеллект»)**

Специалисты Скантроник Системс провели ряд инициативных НИР по использованию методов глубокого обучения («Искусственный Интеллект») для решения задач по автоматическому/автоматизированному обнаружению объектов-угроз и лиц, незаконно перемещающихся через инспекционно-досмотровые комплексы, на рентгеноскопических изображениях.

В ходе выполнения НИР были получены хорошие и многообещающие результаты по эффективности обнаружения и быстродействию.

Так, в частности, разработанный в рамках НИР алгоритм автоматического поиска лиц, незаконно перемещающихся через инспекционно-досмотровые комплексы на основе методов глубокого обучения реализован в виде функции автоматического обнаружения в ПО станции анализа изображений Скантроник и уже внедрен в мобильных ИДК СТ-2630М и порталных ИДК СТ-2630П с высокой пропускной способностью, размещенных на пунктах пропуска РФ МАПП Тагиркент-Казмаляр и МАПП Петухово в интересах профильных ведомств.

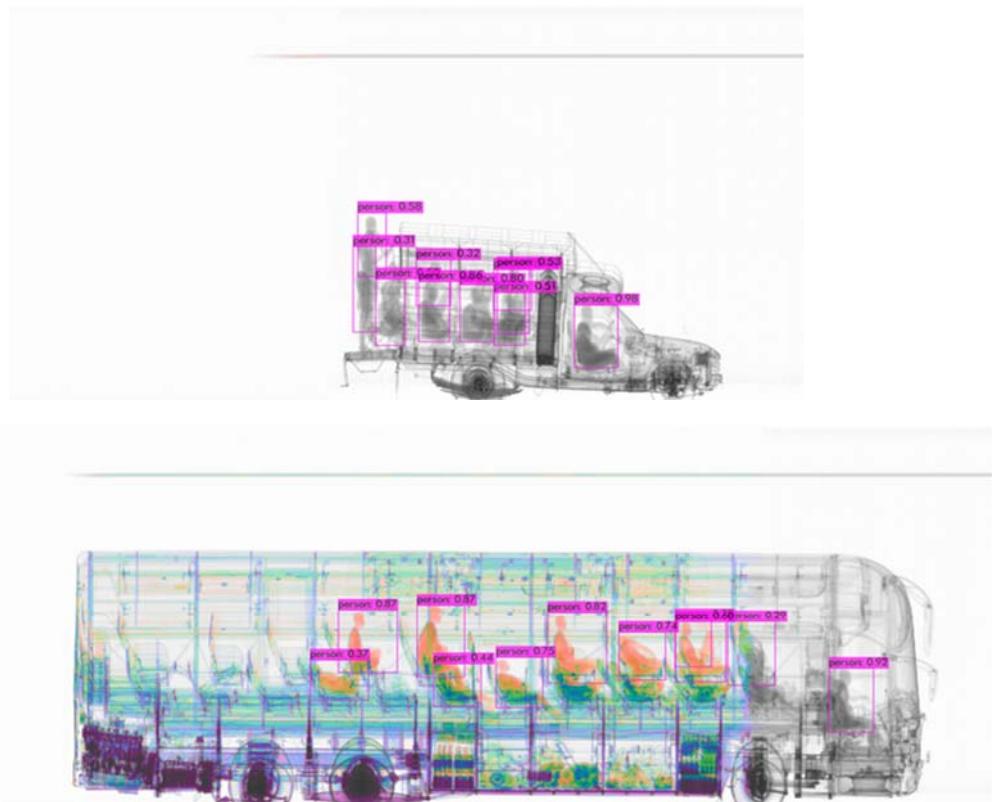


Рис. 7 а,б. Автоматическое обнаружение лиц, незаконно перемещающихся через ИДК Скантроник.

Специалисты Скантроник Системс продолжают работы по повышению эффективности работы нейросетевых алгоритмов, однако для этой цели требуется обеспечить получение расширенного набора рентгеноскопических изображений для обучения, в том числе по наиболее актуальным объектам-угрозам.

Очевидно, что для эффективной тренировки программного обеспечения автоматического обнаружения необходимо провести работы по сбору достаточно большой репрезентативной выборки рентгеноскопических изображений объектов-угроз на действующих ИДК, причем розыгрыш конкретной сцены по актуальным моделям угроз, а также разметку полученных рентгеноскопических изображений, необходимо проводить на площадке размещения комплексов с привлечением специалистов профильных ведомств, а обучение и генерацию нейросетевой модели в центре компетенции Скантроник Системс.

### **Натурные или синтетические рентгеноскопические образы:**

#### **PRO et CONTRA**

К вопросу - **Quo vadis ?** при разработке и стратегии тренировки методов глубокого обучения на обнаружение объектов-угроз.

Действительно, для генерации и сбору достаточно большой натурной репрезентативной выборки рентгеноскопических изображений объектов-угроз, количество которых может измеряться сотнями лишь для одного объекта, на действующих ИДК, либо на специальном, предназначенном для этого полигоне, требуется существенное время, а также очень большой и затратный технический и человеческих ресурсы, требуемые для розыгрыша многочисленных сцен по актуальным моделям угроз, а также затрачиваемые на обработку и разметку полученных данных.

Нетрудно оценить приблизительный тайминг только на сбор минимального объема рентгеноскопических данных для одного объекта-угрозы для тренировки нейросетевой модели:

Условно для расчета количества ракурсов за основу берем углы Эйлера [12] с шагом 30 градусов (см. рис. 9а, б). Тогда имеем:

- Количество ракурсов по углу нутации  $[0..30..180] = 6$
- Количество ракурсов по углу прецессии  $[0..30..360]=12$
- Количество ракурсов по углу чистого вращения  $[0..30..360]=12$

Где полное количество ракурсов для отработки одного объекта-угрозы:  
 $12 \times 12 \times 6 = 864$  (!)

Допустим, что для сканирования одного объекта-угрозы прямо/реверс (два файла для надежности) и перестроения позиционирования робота на другой угол = 2 мин.

Тогда  $864 \times 2[\text{мин}]/60 = 28.8$  [час] или за 8ч смену = 3.6 рабочих дня на сбор данных одного объекта-угрозы достаточно сложной формы (АКМ, снайперская винтовка, и т.п.).

Откуда следует, что для тренировки нейросетевой модели на 20-30 наиболее актуальных объектов угроз потребуется приблизительно 3-4 месяца интенсивного сбора данных и обработки. Это довольно много и достаточно трудоемко.

А если предусмотреть более репрезентативную выборку, уменьшив шаг по углам Эйлера в два раза, с шагом 15 градусов, то имеем для отработки одного объекта-угрозы:  $24 \times 24 \times 12 = 6912$  (!!!), что переводит подобную задачу с практическим применением в разряд сугубо нереалистичных!

Очевидно, что на действующем на пункте пропуска или объекте критической инфраструктуры ИДК использование такого тайминга не представляется возможным, и отсюда вытекает необходимость создания полномасштабного полигона – стационарного ИДК, обеспечивающего высокое качество рентгеноскопических изображений, а также оснащенного специальным роботизированным технологическим оборудованием.

При этом данная работа неизменно будет иметь ряд ограничений, в первую очередь, по допустимым массогабаритам объектов-угроз, а также необходимо будет сопряжена с высокой степенью риска из-за присутствия в разыгрываемых сценах реальных объектов-угроз с содержащимися в них опасными взрывчатыми веществами.

Не отменяя полезность реализации полигона, Скантроник Системс предлагает альтернативный путь тренировки нейросетевых моделей на объекты-угрозы и в инициативном порядке проводит НИР по генерации синтетических рентгеноскопических 2D образов объектов и использованием прецизионного аппарата математической физики для создания математического программного

обеспечения для моделирования данных и обучения нейросетевых моделей на основе 3D моделей объектов-угроз.

Создание математического программного приложения для моделирования данных для создания нейросетевой модели, основанной на полноте синтетических данных – основной ключ к успеху при реализации методов глубокого обучения для автоматического/автоматизированного обнаружения объектов-угроз.

В Скантроник Системс разработано математическое программное обеспечение, позволяющее сгенерировать неограниченное количество синтетических данных объектов-угроз с любым угловым шагом. Полнота нейросетевой модели будет условно лишь ограничена только временем, затраченным на генерацию (майнинг) выборки чистых синтетических рентгеноскопических образов в проекции верного пучка, полученных сбором лучевых сумм с полихроматизмом без квантового шума, джиттера пучка электронов ускорителя и шума чувствительных элементов системы детектирования.

Твердотельные 3D модели (см. например, рис. 8) объектов-угроз возможно использовать как в готовом виде с доработкой для использования в специальном программном обеспечении, так и создавать вручную с использованием различных САПР [13, 14].



Рис. 8. Твердотельная 3D модель АКМ, взятая в качестве исходных данных для тренировки нейросетевой модели Скантроник [15].

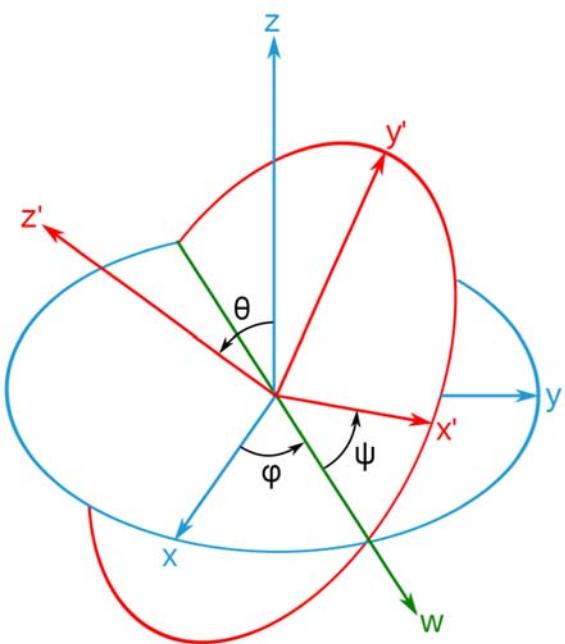


Рис. 9а. Локальная угловая система координат с углами Эйлера: нутации, прецессии и чистого вращения.  
[\[https://ru.wikipedia.org/Углы\\_Эйлера\]](https://ru.wikipedia.org/Углы_Эйлера)

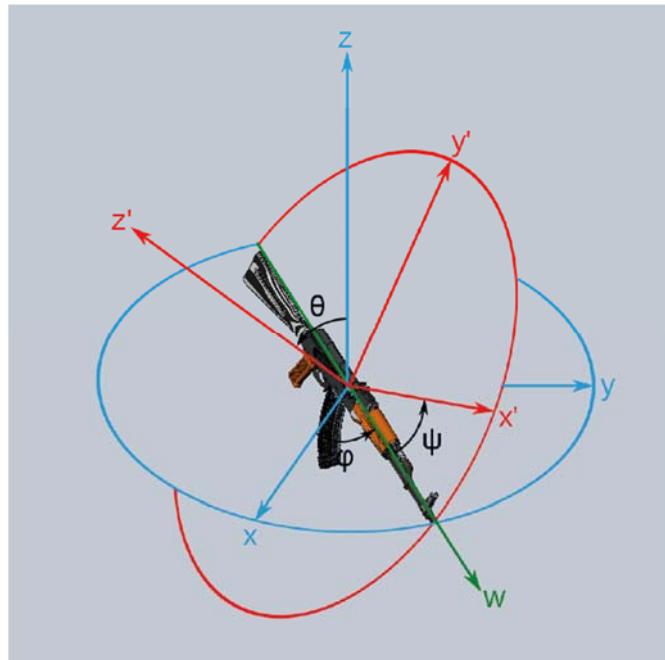


Рис. 9б. Локальная угловая система координат с углами Эйлера и объектом-угрозой - АКМ.

### **Математическое моделирование генерирования синтетических рентгеноскопических образов**

Для проверки концепции было проведено математическое моделирование для генерации синтетических рентгеноскопических образов объектов на основе твердотельных CAD моделей.

За основу расчетов была взята конфигурация и оптическая схема мобильного комплекса Скантроник, в частности, по причине того, в распоряжении имеется расширенный набор натурных рентгеноскопических изображений полученный в рамках работ, проведенных на МИДК СТ-2630М в2020 №014 и любезно предоставленных ФТС, и который содержит репрезентативный набор изображений типовых объектов-угроз и различных типов грузов, полученных с помощью ИДК разработки и производства Скантроник Системс, так и иных производителей.

В качестве реперного объекта расчетов был выбран автомат Калашникова модернизированный (АКМ).

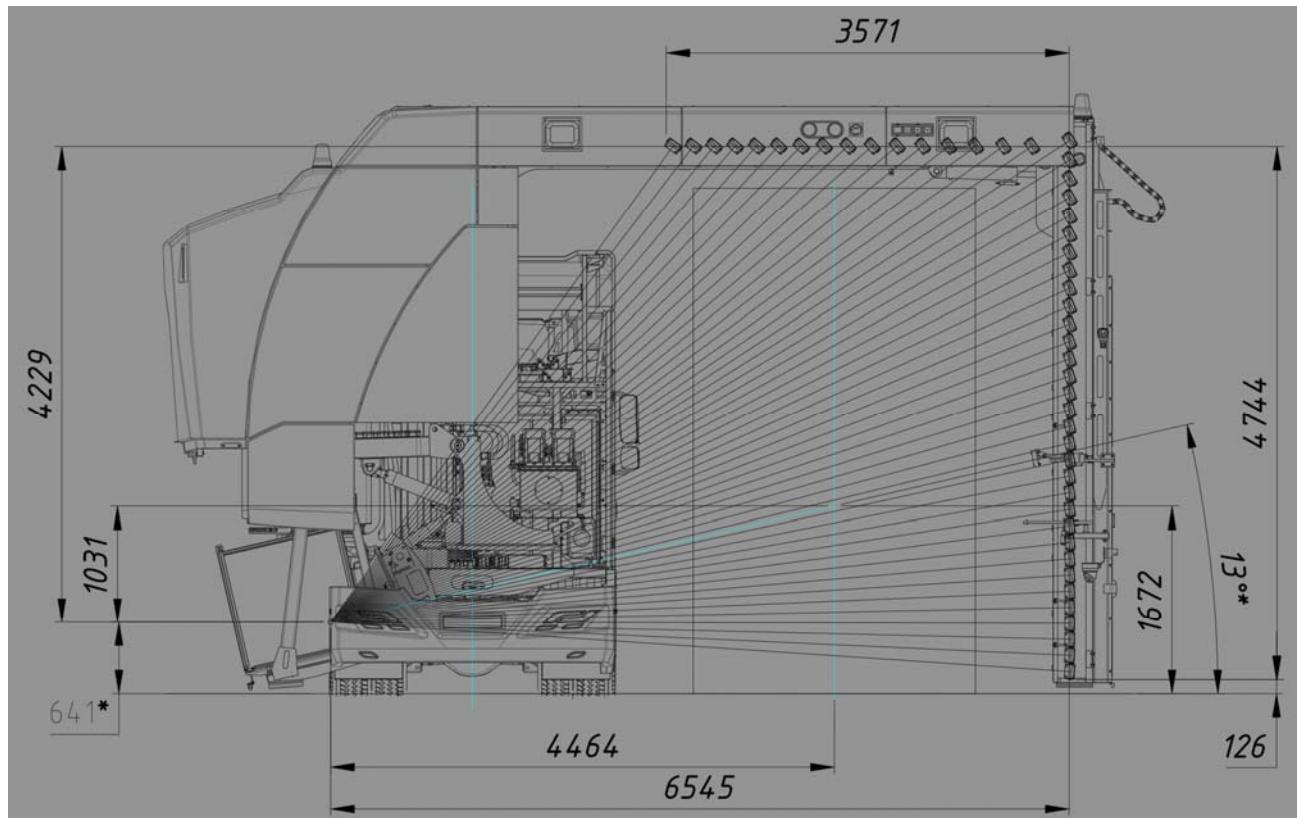


Рис. 10. Оптическая схема МИДК СТ-2630М в2020 [ЦРПК.412225.019Л3 Схема оптическая МИДК].

При цифровом проецировании чувствительные детекторные элементы, их вертикальный шаг, фокусное пятно излучателя линейного ускорителя электронов располагались в геометрических положениях, точно соответствующем реальной оптической схеме сканирования МИДК, на которой были получены реальные рентгеноскопические изображения объектов-угроз, в частности АКМ.

Цифровое проецирование и создание синтетического рентгеноскопического образа – достаточно ресурсоемкий вычислительный процесс, требующий, в частности, достаточно большого объема оперативной памяти, поэтому цифровое пространственное разрешение оптимизировалось.

В результате моделирования в итоге были получены две выборки по уникальным углам с шагом 30 градусов – 744 синтетических образа, и с шагом 15 градусов – 6372 синтетических образа, автоматически отмасштабированных, как по пространству (domain), так и гистограмме (range).

Выбранные характерные образцы проекционных 2D образы с 3D модели АКМ, доработанной, с присвоением типов материалов тем или иным частям цифровой модели, приведены на рис. 11 а-з.

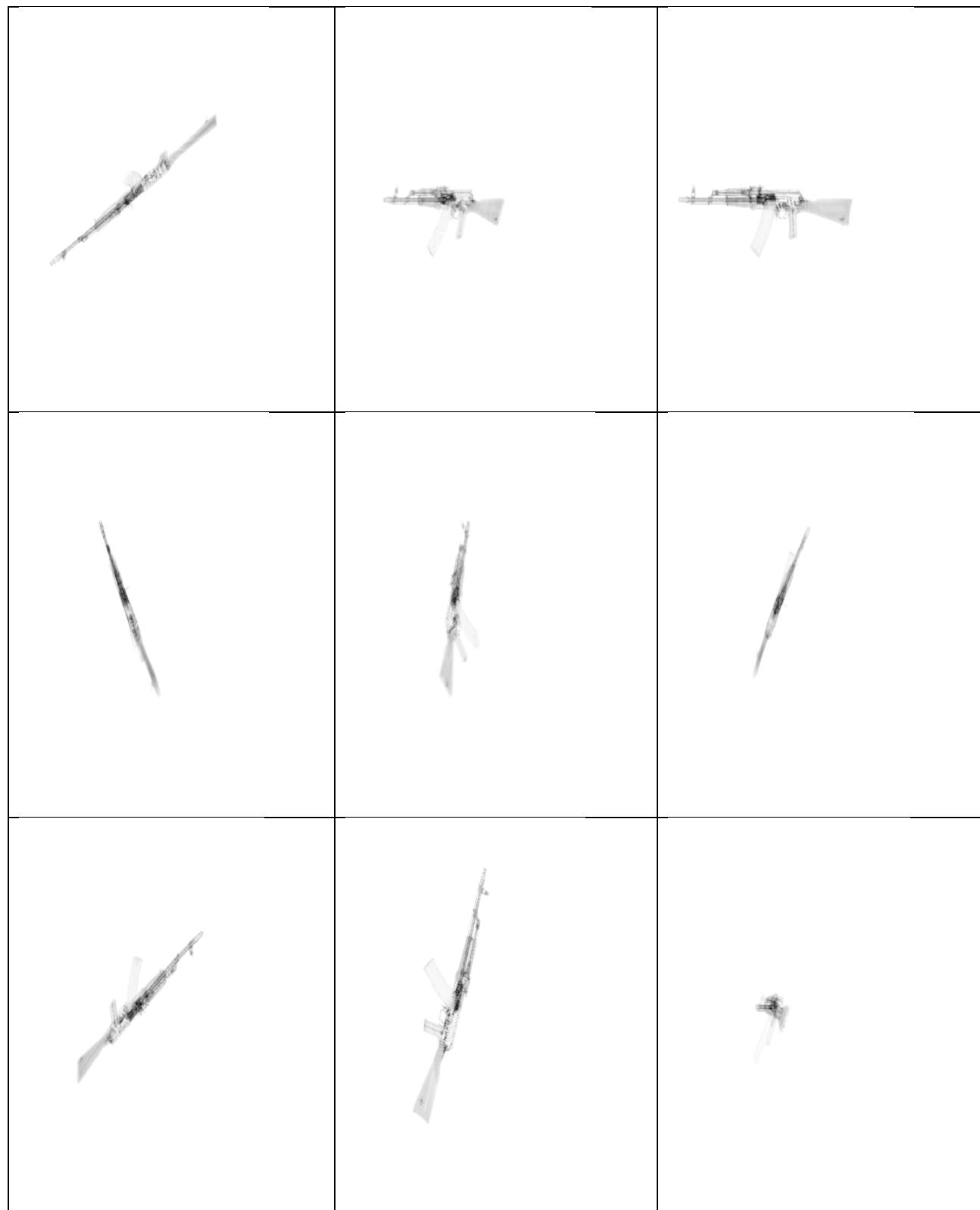


Рис. 11 а-з. Характерные образцы проекционных 2D образов с 3D модели АКМ.

Генерация рентгеноскопических синтетических образов – крайне ресурсоемкий вычислительный процесс. Так на создание одного полного рентгеноскопического образа на CPU с процессором i5, в среднем затрачивалось до 30 минут.

В рамках проведенной НИР был произведен анализ эффективности работы нейросетевых моделей, обученным по синтетическим данным на примере АКМ, в применении к натурным рентгеноскопическим изображениям, которые наличествуют в достаточном количестве, в наборе, предоставленным ФТС (рис. 13 а-г).

### **Результат проверки эффективности обнаружения в концепции обучения по синтетическим образам**

В результате генерации были получены и применялись две выборки синтетических образов модели АКМ с разной полной, которые автоматически были размечены и использовались в качестве входных данных в обучаемую нейросетевую модель на основе YOLOv11 [16] (см. рис. 12).

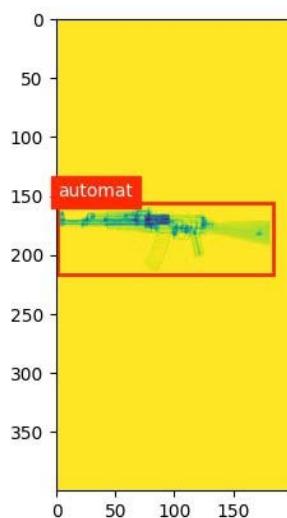
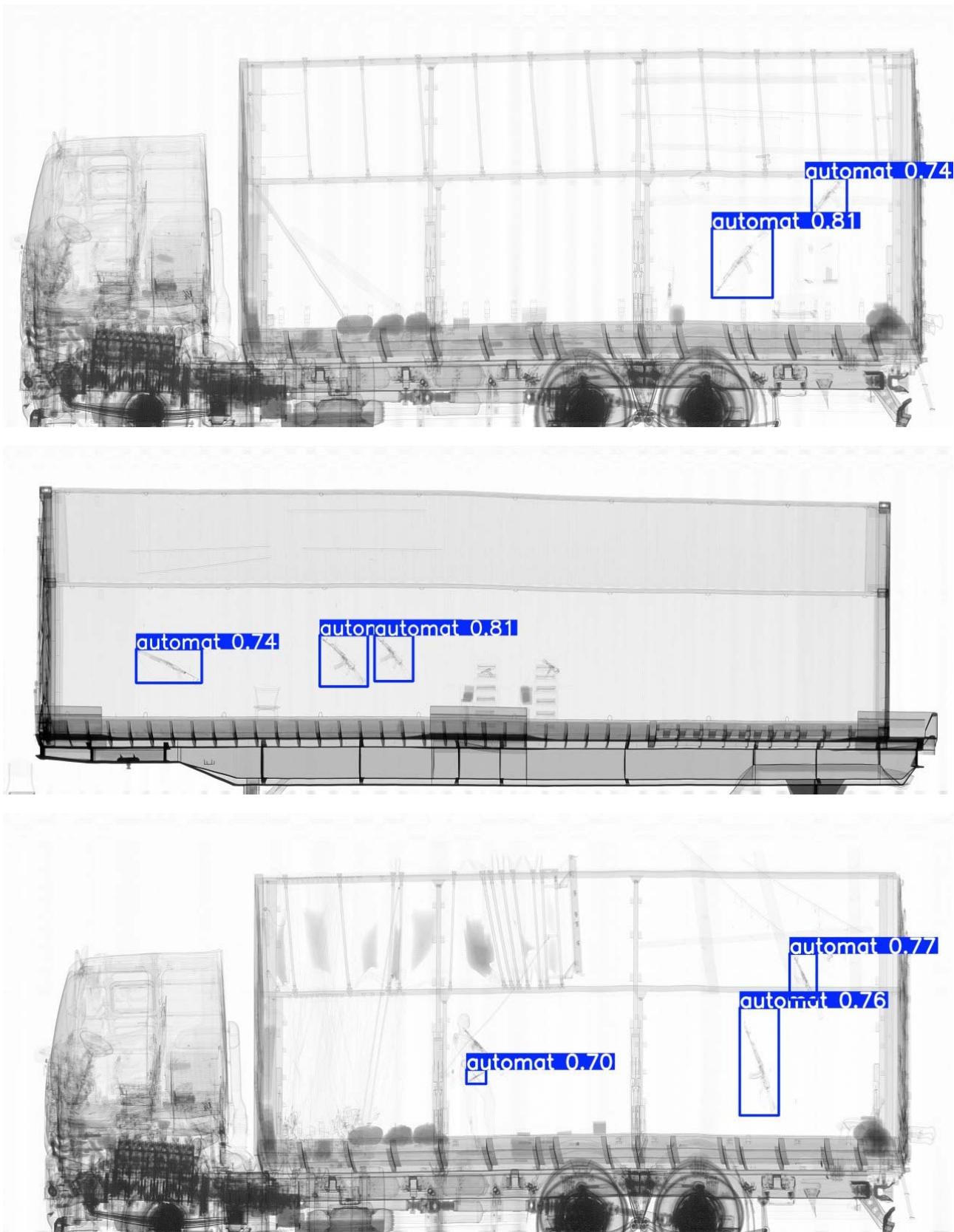


Рис. 12. Автоматическая разметка синтетических рентгеноскопических изображений АКМ.

Применение обученной нейросетевой модели по всей сгенерированной выборке синтетических изображений к натурным рентгеновским изображениям показало следующие многообещающие результаты по автоматическому

обнаружению, при этом выборка с увеличенной полнотой с угловым шагом 15 градусов обеспечила более эффективный результат обнаружения.



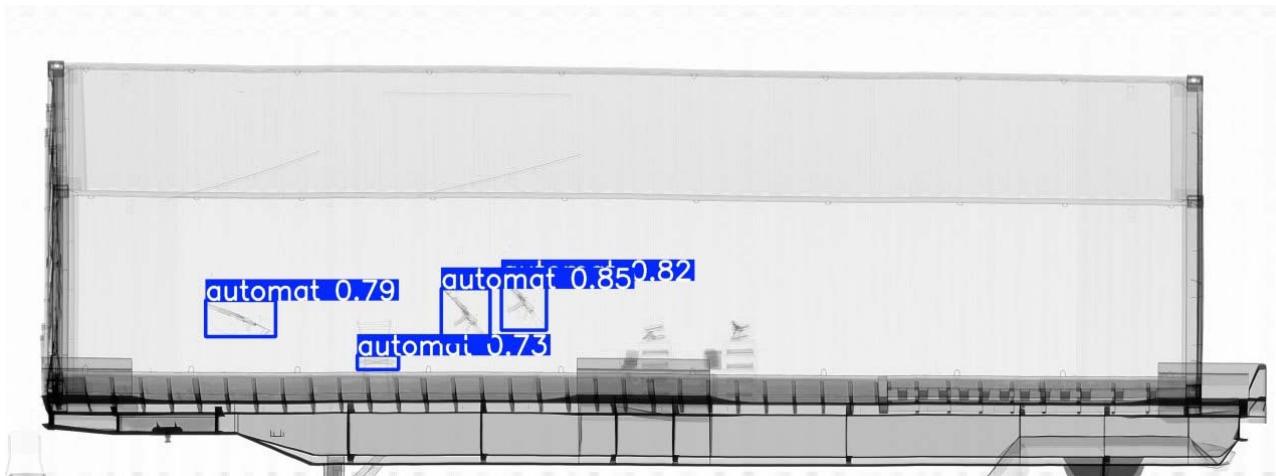


Рис. 13 а-г. Результаты автоматического обнаружения АКМ на натурных рентгеноскопических изображениях с использованием нейросетевой модели на основе YOLO v11, обученной исключительно на синтетических рентгеноскопических образах АКМ.

### **Обсуждение результатов эффективности обнаружения в концепции обучения по синтетическим образам**

Первые результаты НИР по математическому моделированию, позволяет заключить, что предлагаемый метод будет достаточно эффективен, так как разработанный математический аппарат основан на строгом научном подходе.

В продолжение работ, планируется провести дополнительные натурные эксперименты на гибридном ИДК типа СТ-2635ПГ [17], размещенном в ЯНАО и позволяющем проводить сканирования как в стационарном режиме с полной частотой выборки при генерации натурного рентгеноскопического изображения, так и в портальном, с увеличенной частотой выборки 2x300 Гц, при этом подготовив набор типовых объектов угроз, включая АКМ, с их точными цифровыми моделями, и производить их закладки в сканируемые транспортные средства по различным согласованным сценариям моделей угроз.

После проведения натурных экспериментов с апробацией предложенного подхода разработки и внедрения методов глубокого обучения на основе математического моделирования, следующим шагом будет генерация колоссального объёма данных - создание расширенного, необходимого и достаточного (по углам Эйлера) набора синтетических рентгеноскопических образов наиболее актуальных объектов-угроз, чистых цифровых образов в

проекции в верном пучке оптической схемы ИДК, основанных на сборе лучевых сумм с полихроматизмом, без квантового шума и джиттера электронного пучка, в строгом соответствии теорией прохождения и ослабления тормозного излучения в веществе.

При этом будет произведена автоматическая (сокращение влияния человеческого фактора в процесс ручной разметки и обучения моделей) разметка и обучение нейросетевой модели по цифровым синтетическим образом, а затем ее использование в функционале ПО Сканtronик для целей автоматизированного/автоматического обнаружения в составе полевых ИДК разных типов и классов, эксплуатирующихся в интересах профильных ведомств.

Побочным, и также положительным, результатом данной работы будет возможность наложения синтетических образов объектов-угроз на натурные рентгеноскопические изображения и создания специализированного математического программного обеспечения для тренировки и проверки бдительности операторов, при этом визуально отличие рентгеноскопических образов, натурных, полученным с использованием ИДК, и синтетических, полученных с использованием предложенного метода, будет возможно только при скрупулезном анализе изображений, что называется «под лупой» (см. рис. 14 а, б).

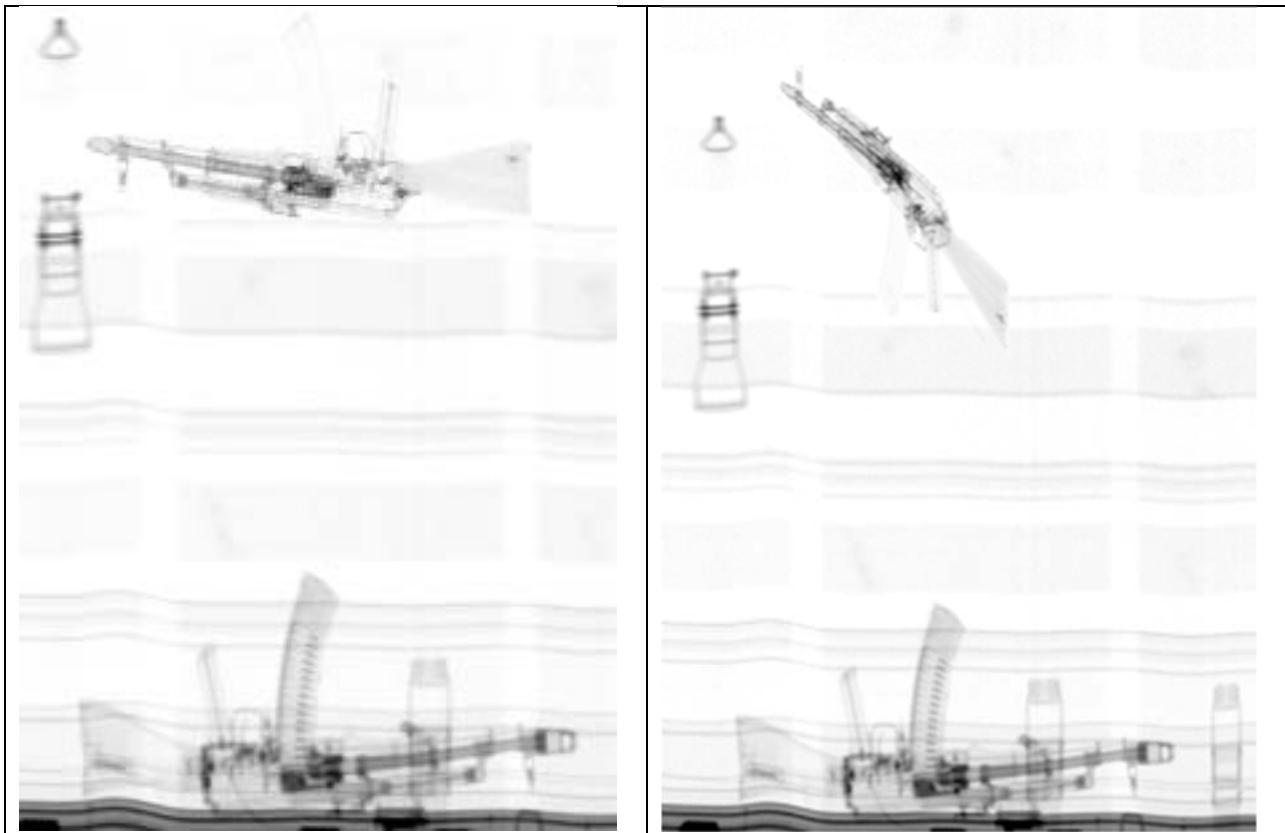


Рис. 14 а, б. Фрагменты натурных рентгеноскопических изображений транспортного средства с объектом-угрозой АКМ и наложенным синтетическим объектом-угрозой - АКМ.

### Резюме

Генерация синтетических образов как для тренировки методов глубокого обучения, так и для малоракурсной томографической реконструкции базируется на едином строгом научном подходе с использованием математической физики, и является существенно ресурсоемким методом, требующим значительных вычислительных мощностей. Так повышение в два раза пространственного разрешения при оцифровке модели объекта-угрозы или модели угроз приведет к 4-х кратному увеличению проекционной матрицы и, соответственно, 4-х кратному возрастанию расчетного времени.

Тем не менее, математический метод позволяет заранее провести расчет системного матричного оператора (проекционной матрицы), который определяется выбранной оптической схемой сканирования, и может быть

сохранен в виде заранее рассчитанной референс-таблицы, что позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на расчет и итеративную реконструкцию.

Необходимо проводить математическое моделирование с использованием вычислительных мощностей, оптимизированных под использование матричных вычислений, например, мощных графических процессоров, а также целесообразно использовать программные библиотеки, оптимизированных под матричные вычисления.

Первичное базовое математическое моделирование трехракурсной досмотровой системы и апробация методов глубокого обучения автоматического обнаружения на синтетических образах завершено. Можно сказать, что с определённым выраженным успехом.

Рассмотренный подробно математический метод реконструкции плотности не является панацеей на все случаи жизни, однако будет являться достаточно мощным инструментом, обеспечивающим автоматизированное/автоматическое обнаружение ВВ и, в случае реализации в ИДК, будет являться аппаратно-программной функцией, дополняющей мощный программный функционал, разработанный для анализа рентгеноскопических изображений оператором.

Необходимо иметь ввиду, что в таком трехракурсном ИДК независимую работу, отдельно по каждому из трех ракурсов, по автоматическому анализу рентгеноскопических данных на предмет наличия объектов-угроз в ближайшей перспективе будет вести обученная по синтетическим образам нейросетевая модель (Искусственный Интеллект), что позволит, по крайней мере, в одном из трех ракурсов раскрыть рентгеноскопический образ объекта-угрозы таким образом, что ее обнаружение станет действительно очень высокоэффективным и высоковероятным.

В оптической схеме трехракурсного ИДК предусмотрены классические два ракурса: боковой и вертикальный, которые позволяют также проводить качественный визуальный анализ оператором с хорошей степенью восприятия (perceptual) рентгеноскопического изображения с распознаванием материалов и высоким пространственным разрешением, что дополнительно позволит повысить достоверность вердикта в случае неоднозначностей в рассматриваемом автоматическом алгоритме обнаружения, особенно касаясь вопросов обнаружения листовых ВВ в грузе.

Применение метода автоматизированного/автоматического обнаружения взрывчатых веществ в совокупности с методами глубокого обучения по

автоматическому поиску объектов-угроз в перспективных ИДК, в том числе, порталльных, обеспечат высокую обнаружительную способность и автоматизацию процесса принятия Вердикта с минимальным участием операторов.

Шансы на Успех в реализации двух направлений развития Технологии ИДК есть, если целеустремленно идти по этому пути к выбранной Цели – созданию перспективного трехкурсного ИДК с функционалом автоматического обнаружения объемных ВВ и объектов-угроз. Это в любом случае, стимулирует отечественную Технологию ИДК, которая уже на сегодняшний день на острие прогресса и технологической гонки, точно Cutting Edge, и это даст, в том числе, и много положительных побочных эффектов.

Проведение работ в данном направлении, позволит создать инновационные Продукты – Стационарный и/или Портальный ИДК, не имеющие аналогов в мире, способные существенно повысить эффективность контроля автотранспортных средств и грузов на пунктах пропуска, а также в рамках транспортной и инфраструктурной безопасности [18-20], создать отечественный научно-технологический задел на длительную перспективу со значительным опережением зарубежных разработчиков.

Данная начатая в инициативном порядке работа и ее эффективное завершение в ближнесрочной/среднесрочной перспективе - один из главных призов в технологической гонке среди мировых лидеров-производителей ИДК.

Сканtronик Системс осознанно и ответственно начал движение и движется по этому Пути.

#### *Библиографический список:*

1. <https://www.nuctech.com/>
2. <https://www.rapiscansystems.com/>
3. <https://www.smithsdetection.com/>
4. <https://scantronicsystems.com/>
5. Ogorodnikov S A, Petrunin V I., Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition, Physical Review Special Topics|Accelerators and Beams, 2002, 5(104701): 1|11
6. V.I. Shvedunov et al, Electron accelerators design and construction at Lomonosov Moscow State University, Radiation Physics and Chemistry, 159 (2019) 95-100
7. S. Carmignato, Wim Dewulf, R. Leach, Editors, Industrial X-Ray Computed Tomography, © Springer International Publishing AG, 2018

8. С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская, «Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей», СПб.: Питер, 2018.
9. S. Singh and M. Singh, Explosives Detection Systems (EDS) for Aviation Security: a Review, Department of Computer Science, University of Exeter, Exeter EX4 4PT, UK
10. W. Fang, L. Li, Z. Chen, C. Zong, First Commercial Dual-energy MeV CT for Container Imaging: Experimental Results, The 6<sup>th</sup> International Conference on Image Formation in X-Ray Computed Tomography, Regensburg, Germany, 2020.
11. M.S. Kaczmarz, Angenaeherte Aufloesung von Systemen linearer Gleichungen, Bulletin III. A. 1937. III
12. I.N. Bronshtein, K.A. Semendyayev, G. Musiol, H. Mühlig, Handbook of Mathematics, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015
13. <https://www.solidworks.com/>
14. <https://www.ptc.com/en/products/creo/pro-engineer>
15. <https://grabcad.com/>
16. <https://yolo11.com/>
17. <https://scantronicsystems.com/catalog/gibridnyy-avtomobilnyy-inspeksionno-dosmotrovyy-kompleks-st-2636pg/>
18. <https://customs.gov.ru>
19. <http://ps.fsb.ru/>
20. <https://mintrans.gov.ru/>