

Научная статья
УДК 004.932:678.06
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-56-68>
EDN КНРЕОВ

Кроссплатформенное приложение для защиты многоассортиментной продукции от фальсификации

*Кирилл Андреевич Захаренко,
Тамара Балабековна Чистякова, Андрей Николаевич Полосин*[✉]

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия, polosin-1976@sapr.lti-gti.ru*[✉]

Аннотация. Описано приложение, разработанное для защиты многоассортиментной продукции от фальсификации путем кодирования и идентификации полимерных пленок, применяемых для упаковки продукции и содержащих кодирующие элементы (люминофоры, случайным образом внедряемые в пленки при их изготовлении). Кодирование – это формирование электронной цифровой подписи упаковки путем обработки ее цифрового изображения. Цифровая подпись является эталонной, если она сформирована производителем пленки. Идентификация заключается в проверке совпадения цифровой подписи упаковки, сформированной потребителем продукции, с эталонной подписью и определении подлинности или поддельности упаковки. Ключевой особенностью приложения является его кроссплатформенный характер, позволяющий использовать единую кодовую базу, компилируемую для различных программно-аппаратных платформ. Приложение представляет собой программный комплекс, имеющий клиент-серверную архитектуру, настраиваемый на различные типы упаковок, работающий на компьютерах под управлением операционных систем Windows, Linux и мобильных устройствах с операционными системами Android, iOS. Серверная подсистема включает базу данных упаковок, устройств пользователей и эталонных цифровых подписей, модули кодирования и идентификации. Они реализуют метод оценки углов треугольников, построенных по наиболее ярким точкам на фотографии пленки (при обработке которой учитываются дисторсия и угол наклона камеры устройства), и метод оценки времен затухания свечения люминофора до заданных уровней по видеозаписи свечения, полученной после возбуждения люминесценции. Методы выбираются в зависимости от типа упаковки, требований к точности и времени кодирования и идентификации. Тестирование приложения на примерах промышленных образцов упаковочных пленок на основе поливинилхлорида с различными люминофорами при использовании смартфонов разных моделей подтвердило его работоспособность. Применение приложения позволяет уменьшить объем фальсификата и расходы на реализацию защиты, существенно расширить аудиторию пользователей и повысить степень их доверия к системе защиты вследствие использования в ней собственных устройств пользователей, к которым предъявляются минимальные требования.

Ключевые слова: защита продукции от фальсификации, кроссплатформенное приложение, клиент-серверная архитектура, электронная цифровая подпись, математические методы обработки изображений, метод оценки углов треугольников, метод оценки времен затухания свечения, упаковочные полимерные пленки, люминофоры для кодирования упаковок, мобильные устройства

Для цитирования: Захаренко К. А., Чистякова Т. Б., Полосин А. Н. Кроссплатформенное приложение для защиты многоассортиментной продукции от фальсификации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 1. С. 56–68. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-56-68>. EDN КНРЕОВ.

Original article

Cross-platform application for protection of a wide range of products from counterfeiting

Kirill A. Zakharenko, Tamara B. Chistyakova, Andrey N. Polosin[✉]

*Saint-Petersburg State Institute of Technology,
Saint Petersburg, Russia, polosin-1976@sapr.lti-gti.ru*[✉]

Abstract. The article describes an application developed to protect a wide range of products from counterfeiting. Protection is achieved by encoding and identifying polymeric films used for product packaging and containing coding elements (luminophores randomly introduced into the films during their production). Encoding is the formation of an electronic digital signature of the package by processing its digital image. A digital signature is a reference if it is generated by the film manufacturer. Identification consists of checking the coincidence of the digital signature of the package generated by the consumer of the product with the reference signature and determining the authenticity or counterfeit of the package. The key feature of the application is its cross-platform nature, which allows using a single code base compiled for various software and hardware platforms. The application is a software package with a client-server architecture, adjustable to various types of packages, working on computers running Windows, Linux operating systems and mobile devices running Android, iOS operating systems. The server subsystem includes a database of packages, user devices and reference digital signatures, encoding and identification modules. They implement a method for estimating the angles of triangles constructed based on the brightest points on a film photograph (during processing of which the distortion and tilt angle of the device camera are taken into account), and a method for estimating the times of luminophore glow decay to specified levels based on a video recording of the glow obtained after excitation of luminescence. The methods are selected depending on the type of package, requirements for the accuracy and time of encoding and identification. Testing the application on examples of industrial samples of packaging films based on polyvinyl chloride with various luminophores using smartphones of different models has confirmed its operability. Using the application allows us to reduce the volume of counterfeit products and the costs of implementing protection, significantly expand the audience of users and increase their level of trust in the protection system due to the use of the users' own devices, to which minimal requirements are imposed.

Keywords: protection of products from counterfeiting, cross-platform application, client-server architecture, electronic digital signature, mathematical methods of image processing, method of estimating the angles of triangles, method of estimating the decay times of luminescence, packaging polymeric films, luminophores for package coding, mobile devices

For citation: Zakharenko K. A., Chistyakova T. B., Polosin A. N. Cross-platform application for protection of a wide range of products from counterfeiting. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2025;1:56-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-56-68>. EDN KHPEOV.

Введение

В настоящее время проблема фальсификации различных видов продукции приобрела индустриальный характер, т. к. объем фальсификата в отдельных отраслях хозяйственной деятельности сравним с объемом легальной продукции. Например, доля фальсификата российского и зарубежного производства в нашей стране по отдельным видам пищевой продукции составляет от 35 до 90 %. Особенно остро эта проблема стоит в производстве мясных и молочных продуктов (около 60–70 %), а также рыбной и кондитерской продукции (около 50 %) [1]. На российском фармацевтическом рынке доля фальсификата может достигать 12 % (в разных странах она составляет от 1 до 30 %) [2]. В целом ежегодный доход от реализации фальсифицированной продукции в мире составляет порядка 600 млрд долл. США. Применение фальсификата (особенно контрафактных лекарств и продуктов питания) может нанести непоправимый вред здоровью и жизни людей (вплоть до смертельного исхода), т. к. эта продукция не проходит контроль безопасности и качества, предусмотренный при изготовлении легальной продукции.

Анализ методов и программно-аппаратных комплексов для защиты продукции от фальсификации показал, что элементы защиты (метки со штрих-кодами, голограммы, радиочастотные и химические метки, магнитные жидкости, нанокристаллы и пр.) внедряются в защищаемую продукцию или ее упаковку [3–11]. Повышение эффективности защиты (уменьшение вероятности воспроизведения эле-

ментов защиты при фальсификации) обеспечивается за счет уникальности и случайности метки для каждого образца продукции. Недостатками существующих систем защиты являются их высокая стоимость, ограниченность применения при изготовлении крупнотоннажной многоассортиментной продукции (МАП) и, прежде всего, лекарственных средств, продуктов питания, кодирование и идентификация которых должны выполняться без нарушения целостности и внешнего вида упаковок, а элементы защиты могут внедряться только в структуру упаковочного материала. В работах [12, 13] описан такой способ защиты с применением люминофоров, случайным образом распределяемых в полимерной пленке (ПП) толщиной в основном 40–500 мкм при ее изготовлении методом экструзии или каландрования. Преимуществами ПП являются способность к термоформованию для изготовления тароупаковочных изделий, в том числе с большой глубиной вытяжки, высокие термоусадочные характеристики (степень усадки до 80 %) и барьерные свойства (относительно низкая проницаемость кислорода и водяного пара), возможность окрашивания в различные цвета. Пленкообразующий полимер, люминофор, средний эквивалентный диаметр частиц которого составляет 10–50 мкм, и другие технологические добавки (стабилизатор, смазки, краситель, наполнитель, модификатор) перемешиваются с применением сухого метода смешения. Полученная смесь пластицируется (расплавляется и разогревается до температуры формования при одновременном равномерном распределении добавок

в расплаве полимера) и формуется в ПП в экструдере с плоскощелевой/кольцевой головкой или агрегате «смеситель-пластикатор экструзионного типа – каландр» [14, 15]. Среднее количество частиц люминофора на площади ПП, равной 1 см^2 , составляет 1–10. Выбор люминофоров в качестве элементов защиты обусловлен их безопасностью для целевой продукции, высокой стабильностью свечения, малой концентрацией в ПП (до 0,01 %), небольшой стоимостью. Уникальным идентификатором упаковки является ее электронная цифровая подпись (ЭЦП), основу которой составляют числовые значения параметров геометрических фигур (углов треугольников или радиусов окружностей), построенных по наиболее ярким точкам на цифровом изображении ПП, соответствующим частицам люминофора [16]. Применение данного способа требует изготовления специального оборудования для активации частиц люминофоров (путем освещения ультрафиолетовым или инфракрасным излучением с определенной длиной волны) и получения цифровых изображений упаковочных ПП достаточного качества для последующей обработки. Это приводит к существенному удорожанию системы защиты. Чтобы сократить затраты, расширить аудиторию пользователей и повысить степень их доверия к результатам идентификации, нами было предложено применять мобильные устройства (телефоны, планшеты) и разработанное для них проблемно-ориентированное программное обеспечение (ПО). Это ПО реализует оригинальные математические методы и алгоритмы кодирования и идентификации упаковочных ПП [17]. Мобильное приложение работает под управлением операционных систем (ОС) Android и iOS. Однако санкции привели к существенным трудностям при установке приложения на мобильные устройства с ОС iOS. Для преодоления этих трудностей, уменьшения требований к вычислительной мощности устройств пользователей и расширения программно-аппаратной платформы (кроме мобильных устройств, компьютеры с ОС Windows, Linux) необходимо использовать кроссплатформенный подход к созданию приложения для защиты МАП от фальсификации. Данный подход позволяет уменьшить совокупное время разработки приложения и упростить его поддержку по сравнению с разработкой и поддержкой множества нативных приложений, каждое из которых предназначено для использования на определенном устройстве под управлением конкретной ОС [18]. Кроме того, кроссплатформенное приложение, работающее на привычном для пользователя устройстве, экономит его время в связи с отсутствием необходимости осваивать новое оборудование. Поэтому актуальна разработка кроссплатформенного приложения, которое отличается тем, что настраивается на различные типы и модели устройств пользователей и реализует оригинальные методы решения задач кодирования и идентификации на основе оценки расположения

частиц люминофора и его физических свойств для упаковочных материалов из ПП широкого ассортимента с внедренными люминофорами различных типов. Такая разработка повышает удобство и функциональность системы защиты для пользователей разных категорий – производителей ПП и потребителей упакованной в них продукции, которым достаточно иметь мобильный телефон или ноутбук с встроенной камерой (для получения цифровых изображений ПП) и доступом в сеть Интернет.

Целью исследования является повышение эффективности защиты МАП от фальсификации за счет создания кроссплатформенного приложения, клиентская подсистема которого позволяет получить и сохранить цифровые изображения упаковочных ПП для МАП, содержащих частицы люминофоров, настроить приложение на типы ПП и люминофоров, типы и модели устройств пользователей, требования к точности идентификации, выбрать методы и отобразить результаты работы алгоритмов кодирования и идентификации, реализованных в серверной подсистеме.

Постановка задач кодирования и идентификации упаковочных материалов

Базовой операцией процессов кодирования и идентификации упаковочных материалов при защите МАП от фальсификации является формирование ЭЦП E ПП G методом M :

$$E = \{p_i, i = \overline{1, N_C}, G, D, M, P_M\},$$

где p_i – числовое значение параметра i -го кодирующего элемента (КЭ), тип которого определяется методом кодирования и идентификации M ; N_C – количество КЭ; $G = \{P, L, F, t_E\}$ – вектор параметров, характеризующих тип упаковочного материала (тип P и наименование производителя F ПП, тип люминофора L , дата формирования ЭЦП t_E); $D = \{T_D, M_D\}$ – вектор характеристик устройства пользователя, применяемого для получения цифрового изображения I упаковочного материала (тип T_D и модель M_D); P_M – вектор настраиваемых параметров метода M .

При кодировании, выполняемом на заводе-изготовителе упаковочных ПП, формируется и сохраняется в базе данных (БД) эталонная ЭЦП E_c каждого типа изготовленного упаковочного материала G (ЭЦП подлинной упаковки), содержащая эталонные значения параметров КЭ $p_i^e, i = \overline{1, N_C}$. При идентификации, которая осуществляется потребителем упакованной продукции, формируется текущая ЭЦП E упаковочного материала, сравниваемая с эталонными ЭЦП. Если при сравнении обнаруживается совпадение текущей ЭЦП с ЭЦП из БД эталонных ЭЦП, то упаковка признается подлинной, что свидетельствует и о подлинности продукции в ней. В противном случае упаковка (а значит, и про-

дукция) считается фальсифицированной.

Таким образом, постановка задач кодирования и идентификации упаковочных материалов при защите МАП от фальсификации имеет следующий вид:

– этап кодирования: для цифрового изображения I упаковочного материала G , полученного производителем ПП с помощью устройства D , сформировать выбранным методом M с заданными параметрами P_M эталонную ЭЦП E_c , являющуюся уникальной характеристикой подлинности материала G , и сохранить ее в БД эталонных ЭЦП;

– этап идентификации: для цифрового изображения I упаковочного материала G , полученного потребителем упакованной МАП с помощью устройства D , сформировать, применяя заданный метод M с параметрами P_M , текущую ЭЦП материала E и путем проверки ее совпадения с ЭЦП E_c сформировать сообщение R о результате идентификации упаковки;

– $R =$ «Упаковочный материал является подлинным», если

$$\forall i = \overline{1, N_C} : \Delta p_i \leq \Delta E, \quad (1)$$

где $\Delta p_i = \left| \frac{p_i^e - p_i}{p_i^e} \right| 100$ – отклонение параметра p_i из ЭЦП E от эталонного значения p_i^e ; ΔE – предельно допустимое отклонение ЭЦП для признания упаковочного материала подлинным, зависящее от типа материала (P, L_i);

– $R =$ «Упаковочный материал является фальсифицированным», если неравенство (1) не выполняется хотя бы для одного КЭ.

Архитектура кроссплатформенного приложения для защиты МАП от фальсификации

Для решения поставленных задач кодирования и идентификации разработано кроссплатформенное приложение, использующее клиент-серверное взаимодействие. Архитектура приложения представлена на рис. 1.

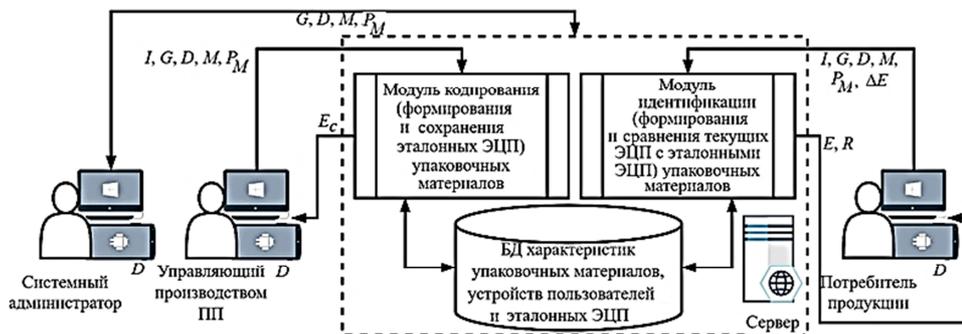


Рис. 1. Архитектура приложения для кодирования и идентификации упаковочных ПП

Fig. 1. Application architecture for coding and identification of packaging PF

Клиентская подсистема взаимодействует с серверной подсистемой при помощи браузера или специального приложения, которое представляет собой браузер с дополнительным функционалом, реализованным под это приложение. Хранение данных осуществляется преимущественно на сервере, обмен данными происходит по сети Интернет [19].

Реализация операций обработки цифрового изображения упаковочного материала I и формирования его ЭЦП E на устройстве пользователя предъявляет повышенные требования к объему оперативной памяти и вычислительной мощности процессора устройства, что приводит к росту стоимости системы защиты. Поэтому устройство пользователя применяется для получения цифрового изображения упаковочного материала, а все необходимые вычисления осуществляются на высокопроизводительном сервере. Данное решение позволило существенно снизить требования к устройству пользователя до вполне приемлемых для любого пользователя: наличие камеры, позволяющей сделать фото/видео-съемку упаковочного материала достаточного каче-

ства для кодирования и идентификации, и доступ в сеть Интернет для отправки цифрового изображения материала на сервер с целью его обработки и формирования ЭЦП материала. Клиентская подсистема реализует интерфейс, с помощью которого пользователь задает тип упаковочного материала G , характеристики своего устройства D , выбирает метод кодирования и идентификации M и настраивает его параметры P_M , формирует запросы на сервер, содержащие выполняемые действия, получает сообщения о сформированной ЭЦП E , подлинности/поддельности материала R . Серверная подсистема получает запросы от клиентской подсистемы, определяет состояние подключения к БД упаковок, устройств пользователей, эталонных ЭЦП и преобразует пользовательские запросы в управляющие команды для последующей отправки по сети Интернет (с использованием протокола HTTPS) результатов работы модулей кодирования и идентификации упаковок клиентской подсистеме в формате JSON. Применение такого подхода упростило разработку за счет снижения необходимости обновлять клиент-

ское приложение для исправления проблем (например, добавление поддержки нового типа, модели устройства пользователя не требует установки обновления приложения со стороны пользователя).

Кроссплатформенное приложение поддерживает работу на различных типах устройств пользователей (компьютеры, мобильные телефоны, планшеты) с ОС Windows, Linux, Android, iOS. В качестве сервера применяется компьютер, подключенный к сети Интернет, с установленным на нем кроссплатформенным сервером Kestrel, все необходимые функции для реализации и работы которого поддерживает большинство современных ОС. Приложение разработано на платформе .NET Core [20]. Она позволяет создавать проблемно-ориентированное ПО (веб-приложения, мобильные приложения) для различных ОС на единой кодовой базе, когда один и тот же код автоматически компилируется под все ОС с учетом их особенностей при сохранении всех функциональных возможностей ПО. Логика приложения, отвечающая за выполнение процессов кодирования и идентификации упаковочных материалов, реализована на языке объектно-ориентированного программирования C#. Интерфейсы приложения разработаны с использованием следующего стека технологий: язык разметки HTML, интерпретируемый браузерами; язык описания внешнего вида документов, написанных с использованием языка раз-

метки, CSS; язык программирования JavaScript, обеспечивающий интерактивность на веб-странице; библиотека JQuery языка JavaScript, предоставляющая программный интерфейс для более простого взаимодействия с элементами веб-страницы, а также функции для использования технологии AJAX, реализующей «фоновый» обмен данными браузера с сервером.

Информационное и математическое обеспечение кроссплатформенного приложения

Серверная подсистема включает БД характеристик упаковочных материалов, устройств пользователей, эталонных ЭЦП упаковок и подсистемы, реализующие методы кодирования и идентификации. База данных содержит 6 сущностей (люминофор, ПП, упаковка, эталонная ЭЦП, метод кодирования и идентификации, устройство пользователя), которые имеют атрибуты, определенные при составлении формализованного описания процессов кодирования и идентификации. Сущности связываются отношениями «один-ко-многим» (1 : M), когда одному экземпляру родительской сущности соответствуют M экземпляров зависимой сущности, и «один-к-одному» (1 : 1), когда экземпляру одной сущности соответствует только один экземпляр связанной сущности. Концептуальная модель БД в виде диаграммы «сущность – связь» показана на рис. 2.

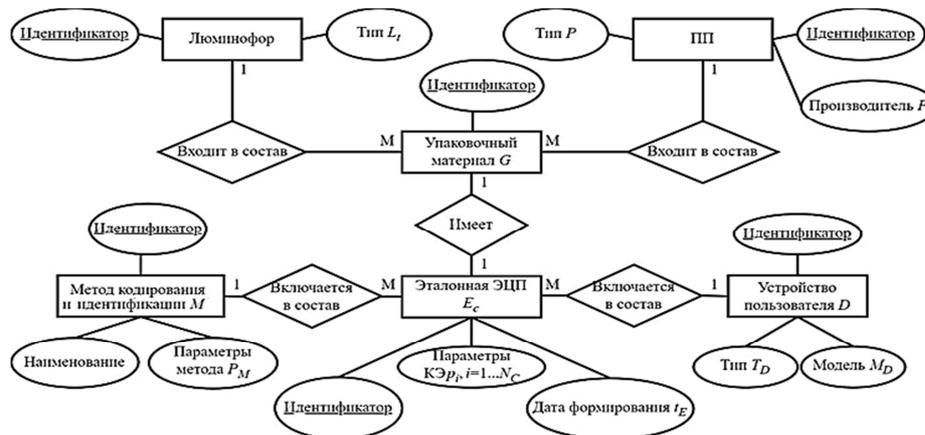


Рис. 2. Концептуальная модель описания данных упаковок, устройств и эталонных ЭЦП

Fig. 2. Conceptual model for describing data from packaging materials, devices and reference EDS

Примером отношения «один-ко-многим» является связь между сущностями «Люминофор» (родительская сущность) и «Упаковочный материал» (зависимая сущность), т. к. люминофор каждого типа применяется в упаковках многих (M) типов. Аналогичным отношением связаны сущности «Метод кодирования и идентификации» и «Эталонная ЭЦП», т. к. один метод позволяет сформировать множество ЭЦП (для упаковок многих типов). Связь «один-к-одному» имеется между сущ-

ностями «Упаковочный материал» и «Эталонная ЭЦП», т. к. упаковка каждого типа характеризуется уникальной эталонной ЭЦП.

База данных реализована на основе реляционной модели данных в клиент-серверной СУБД SQL Server. Выбор СУБД обоснован максимальной совместимостью с ПО, созданным на платформе .NET, поддержкой многопользовательского доступа к БД и максимальным объемом БД, равным 525 ПБ. Последнее необходимо для создания хра-

нилища большого количества (миллионов и более) ЭЦП, учитывая многоассортиментность упаковок.

Математическое обеспечение приложения составляют следующие методы кодирования и идентификации: метод оценки углов треугольников (метод 1); метод оценки времен затухания свечения люминофора (метод 2). В методе 1 КЭ являются треугольники, которые строятся по центрам окружностей, описанных вокруг T_p наиболее ярких замкнутых контуров (изображений частиц люминофора) на фотографии материала I_1 , а параметрами КЭ, включаемыми в ЭЦП, являются наибольшие углы A_i , T_i треугольников, имеющих максимальную площадь: $p_i = A_i$, $i = \overline{1, N_C}$, $N_C = T_i$. Выбор треугольников с наибольшей площадью позволяет уменьшить отклонения значений углов при сдвигах вершин треугольников в текущей ЭЦП по сравнению с эталонной ЭЦП. Это способствует повышению точности идентификации. В методе 2 КЭ является кривая затухания свечения люминофора, предварительно активированного в течение времени T_f , например светом фонарика мобильного устройства, а параметрами КЭ – времена затухания свечения t_i до N_L уровней L_i , задаваемых в процентах от максимального уровня: $p_i = t_i$, $i = \overline{1, N_C}$, $N_C = N_L$. Для построения кривой затухания свечения используется видеозапись свечения I_2 , снятая в течение времени T_s . Из нее выбираются m кадров через интервал времени T_n ($m = T_s / T_n + 1$). Величины T_p , T_b , T_f , T_s , T_n , L_i , $i = \overline{1, N_L}$ являются настраиваемыми параметрами P_M методов.

Выбор метода зависит от типа упаковки и требований к точности и времени кодирования и идентификации. Так, метод 1, характеризующийся меньшим временем получения, обработки изображения и определения подлинности упаковочного материала (не более 30 с при хранении в БД до одного миллиона эталонных ЭЦП) по сравнению с методом 2 (~ 1–3 мин), рекомендуется применять при защите продукции крупнотоннажных производств, например фармацевтической и пищевой промышленности. Метод 2, требующий фиксации и изоляции камеры устройства пользователя от внешнего освещения на время съемки видеозаписи, но нечувствительный (в отличие от метода 1) к дисторсии изображения и углу наклона камеры, подходит для защиты уникальных и дорогостоящих изделий.

Обобщенный алгоритм формирования и проверки ЭЦП упаковочного материала представлен на рис. 3.

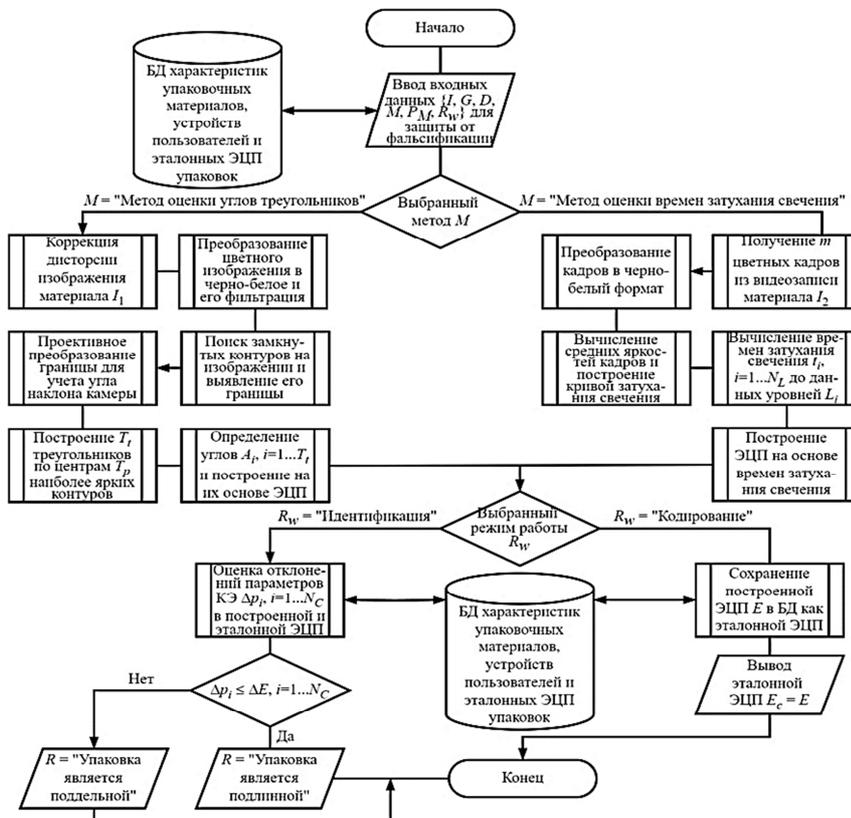


Рис. 3. Обобщенный алгоритм формирования и проверки ЭЦП упаковочного материала

Fig. 3. Generalized algorithm for generating and verifying of package EDS

Для построения КЭ по методу 1 выполняется обработка фотографии, первым этапом которой является коррекция дисторсии, необходимая вследствие зависимости площадей и углов треугольников от координат пикселей-вершин. Она заключается в том, что координаты x , y каждого пикселя изображения с искажением, вызванным дисторсией линз камеры устройства пользователя, изменяются на величины смещения пикселя по осям абсцисс и ординат Δx , Δy :

$$x^* = x - \Delta x; \quad y^* = y - \Delta y, \quad (2)$$

где x^* , y^* – координаты пикселя изображения, не искаженного дисторсией.

Отклонения координат пикселя Δx , Δy , вызванные радиальной дисторсией, вычисляются путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений, получаемой из полиномиальной модели дисторсии Брауна – Конради [21], в которой учтен только коэффициент радиальной дисторсии первого порядка k_{rd1} , что является достаточным, т. к. позволяет определить дисторсию изображения с погрешностью не выше 0,1 пикселя [22, 23]:

$$A_i = \max_{j=1,3} \{\alpha_{i,j}\}; \quad \alpha_{i,j} = f_j(x_{i,j}^*, y_{i,j}^*, j = \overline{1,3}); \quad i = \overline{1, T_i},$$

где $\alpha_{i,j}$ – угол при j -й вершине i -го треугольника, которая имеет координаты $x_{i,j}^*$, $y_{i,j}^*$, вычисленные по формулам коррекции дисторсии изображения (2).

Для построения КЭ по методу 2 вычисляется и нормируется (делением на максимальную яркость) средняя яркость каждого кадра, полученного из видеозаписи свечения люминофора и предварительно преобразованного в монохромное изображение. По полученным значениям строится кривая затухания свечения – график зависимости относительной средней яркости изображения \bar{p} от времени t . Для каждого заданного уровня затухания свечения L_i осуществляется линейная интерполяция функции затухания на участке, включающем значение, равное $L_i/100$ [17]. В зависимости от вычисленных коэффициентов уравнений интерполирующих прямых оцениваются времена затухания свечения t_i до всех N_L уровней, включаемые в ЭЦП E :

$$t_i = \varphi_t(L_i, k_{Si}, b_i); \quad k_{Si} = \varphi_k(t_l, \bar{p}_l, t_{l-1}, \bar{p}_{l-1}); \\ b_i = \varphi_b(t_l, \bar{p}_l, k_{Si}); \quad i = \overline{1, N_L},$$

где k_{Si} , b_i – угловой коэффициент и коэффициент сдвига интерполирующей прямой, проходящей через точки с координатами t_l , \bar{p}_l и t_{l-1} , \bar{p}_{l-1} ; l – номер кадра, снятого в момент времени t_l , относительная средняя яркость которого \bar{p}_l не превосходит уровень L_i .

$$\begin{cases} k_{rd1}(x - \Delta x)[(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2] = \Delta x; \\ k_{rd1}(y - \Delta y)[(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2] = \Delta y. \end{cases}$$

Коэффициент k_{rd1} определяется по координатам контрольного пикселя на изображениях, получаемых при каждом перемещении камеры в горизонтальном направлении на заданный шаг.

После коррекции дисторсии изображение преобразуется в монохромное, фильтруется для подавления цифрового шума, на нем определяются замкнутые контуры, среди них выявляется граница изображения, представляющая собой прямоугольный контур, проективное преобразование которого позволяет учесть угол наклона камеры [17]. По центрам первых T_p контуров, суммарная яркость пикселей которых является максимальной, строятся все возможные треугольники. Для этого применяется триангуляция Делоне, модификация алгоритма которой способствует повышению экономичности за счет уменьшения времени построения множества треугольников [24–26]. У первых T_i треугольников с максимальной площадью определяются наибольшие углы A_i , включаемые в качестве параметров КЭ p_i в ЭЦП упаковки E :

При выборе пользователем (производителем ПП) режима кодирования сформированная ЭЦП упаковочного материала сохраняется в БД как эталонная ЭЦП: $E_c = E$. Если пользователь (потребитель продукции) выбрал режим идентификации, то осуществляется проверка совпадения сформированной ЭЦП с ЭЦП из БД (проверка выполнения неравенства (1)). В зависимости от ее результата формируется сообщение R для пользователя о подлинности или поддельности ПП.

Разработанное информационное и математическое обеспечение позволяет решить задачи кодирования и идентификации многоассортиментных упаковочных материалов на основе ПП, содержащих люминофоры, с использованием устройств пользователей различных типов и моделей, включая как компьютеры, так и мобильные устройства, при обеспечении требуемой точности кодирования и идентификации за приемлемое время.

Пользовательские интерфейсы и тестирование кроссплатформенного приложения

Кодирование и идентификация выполняются пользователем с помощью интерфейса веб-приложения (для компьютеров и мобильных устройств на платформе iOS) или интерфейса мобильного приложения. В первом варианте пользователь по ссылке, полученной от системного администратора, загружает веб-интерфейс (рис. 4).

The screenshot shows a web form with the following fields and values:

- Image:** Выберете файл IMG_0046.JPG
- Polymer:** PVC
- Luminophore:** Aluminium Particles
- Method:** Triangles
- Device:** iPhone7
- Mode:** Encode

Below the form is a **Submit** button. The result of the encoding is displayed as:

Film succesfully encoded as
 9cd7984f-29a2-4f9b-8d42-a3fbe74a7a2f
[Back](#)

Рис. 4. Веб-интерфейс приложения для ввода данных и отображения идентификатора ЭЦП

Fig. 4. Web interface of the application for entering data and displaying EDS identifier

На нем выбирается файл с изображением упаковочного материала I (Image), задаются типы ПП P (Polymer) и люминофора L_r (Luminophore), метод M (Method) и его параметры P_M , модель устройства M_D , с помощью которого получено изображение I (Device), и режим работы приложения R_w (Mode). После нажатия кнопки подтверждения (Submit) отображается результат кодирования (E_c) или идентификации (R), сформированный серверной подпиской

стемой веб-приложения. Во втором варианте мобильное устройство применяется для получения фотографии I_1 (рис. 5) или видеозаписи свечения I_2 (рис. 6) упаковочного материала (в зависимости от метода M), ввода входных данных G , D , M , P_M , R_w и отображения идентификатора эталонной ЭЦП или результата проверки подлинности упаковочного материала.

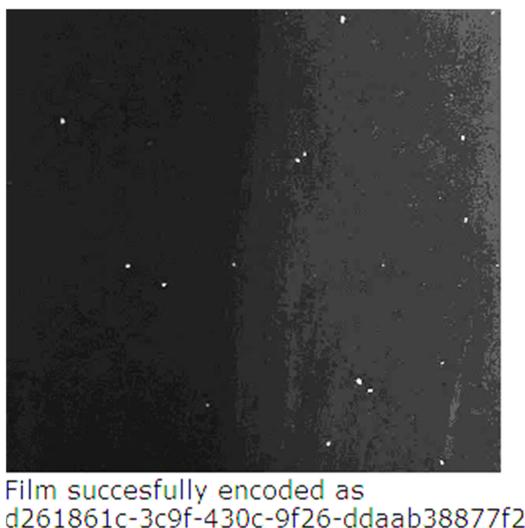


Рис. 5. Фотография упаковочной ПП с люминофором и результат ее кодирования по методу 1

Fig. 5. Photograph of a packaging PF with a luminophore and the result of its coding using method 1

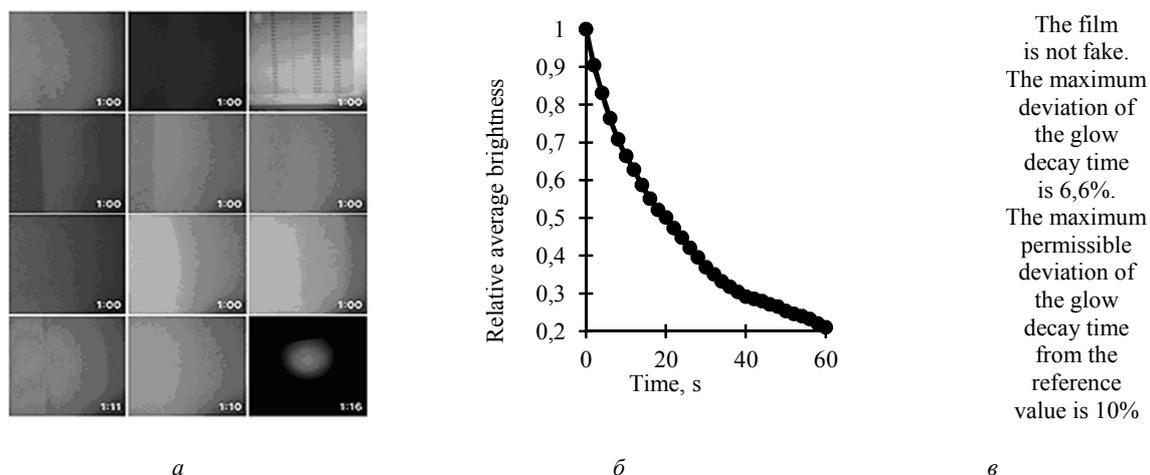


Рис. 6. Кадры видеозаписи свечения люминофора в упаковочной ПП (а), кривая затухания свечения (б) и результат идентификации ПП по методу 2 (в)

Fig. 6. Video footage of the luminophore glow in the packaging PF (a), the glow decay curve (b) and the result of PF identification using method 2 (v)

Функциональное тестирование кроссплатформенного приложения выполнено с использованием образцов жестких ПП на основе поливинилхлорида для упаковки МАП, содержащих люминофоры различных типов с разной концентрацией и предоставленных промышленными партнерами из России и Германии. В качестве недорогих мобильных устройств, камеры которых позволяют получать изображения упаковочных материалов, пригодные для дальнейшей обработки, применялись смартфоны Samsung Galaxy A50 (ОС Android 10, тыловая

камера с разрешающей способностью 25 мегапикселей) и iPhone 7 (ОС iOS 15, тыловая камера с разрешающей способностью 12 мегапикселей). Для тестирования метода 1 получены фотографии образцов ПП черного цвета с алюминиевыми частицами при различных углах наклона камеры смартфона. Пример результатов кодирования и идентификации приведен на рис. 7 (параметры метода 1: $T_p = 5$, $T_t = 3$, $\Delta E = 5\%$).

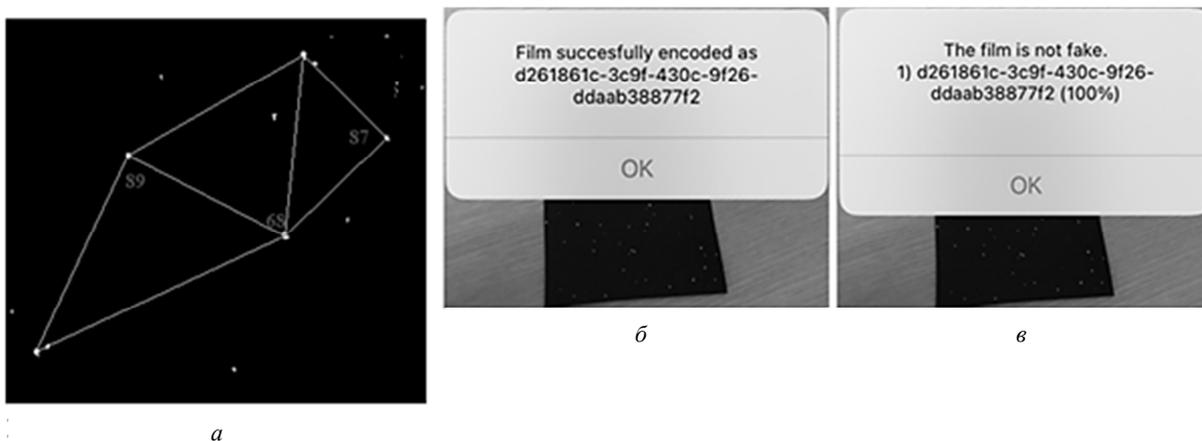


Рис. 7. Кодирование элементов и результаты кодирования и идентификации ПП по методу 1: а – рассчитанные углы треугольников; б – идентификатор эталонной цифровой подписи упаковки, сформированной в результате кодирования и сохраненной в базе данных приложения; в – сообщение о подлинности проверяемой упаковки, идентификатор ЭЦП из базы данных и степень совпадения с ней цифровой подписи упаковки

Fig. 7. Coding elements and the results of encoding and identifying PF using method 1: a – calculated triangle angles; б – identifier of the reference digital signature of the package formed as a result of encoding and stored in the application database; в – message about the authenticity of the package being checked, identifier of the reference digital signature from the database and the degree of coincidence with it the digital signature of the package

Отклонения наибольших углов треугольников, входящих в ЭЦП проверяемого упаковочного материала, от их эталонных значений ΔA_i , $i = \overline{1, T_i}$ не превышают 3,5 %, что меньше предельно допустимого значения ΔE , поэтому приложение формирует сообщение о подлинности материала, что соответствует действительности (истинно-положительный результат идентификации).

Для тестирования метода 2 получены видеозаписи свечения люминофора, нанесенного на образцы прозрачных ПП и создающего излучение зеленого цвета. Пример кривой затухания свечения и результата идентификации представлен на рис. 6 (параметры метода 2: $T_f = T_s = 60$ с, $T_n = 2$ с, $N_L = 3$, $\Delta E = 10$ %). Наибольшее из отклонений времен затухания свечения, входящих в ЭЦП идентифицируемого материала, от их эталонных значений Δt_i , $i = \overline{1, N_L}$ составляет 6,6 %, не превосходя предельно допустимое значение ΔE , поэтому материал, изготовленный на заводе-производителе упаковочных ПП, признан подлинным.

Применение разработанного приложения обеспечивает требуемую точность идентификации многоассортиментных упаковочных материалов при приемлемом времени получения и обработки их изображений и стоимости устройств потребителей, являющихся аппаратным обеспечением клиентской подсистемы приложения.

Заключение

Разработано кроссплатформенное клиент-серверное приложение, которое позволяет решать задачи кодирования и идентификации упаковочных материалов, изготавливаемых из ПП, содержащих люминофоры, для обеспечения защиты упакованной МАП от фальсификации с применением устройств пользователей (прежде всего потребителей МАП), в том числе мобильных устройств. Уникальным идентификатором упаковочного материала является ЭЦП, которая формируется путем обработки цифрового изображения материала и вычисления параметров КЭ, зависящих от расположения частиц люминофора в ПП (метод оценки углов треугольников) или от физических свойств люминофора (метод оценки времен затухания свечения). При обработке изображений выполняется коррекция радиальной дисторсии и учитывается угол наклона камеры

устройства, создающего изображение, к поверхности упаковочного материала. Приложение настраивается на различные программно-аппаратные платформы (компьютеры с ОС Windows и Linux, мобильные устройства с ОС Android и iOS), что обеспечено применением при его разработке кроссплатформенного подхода и соответствующих информационных технологий, позволяющих создавать код на одном языке программирования с последующей компиляцией под разные программно-аппаратные платформы. База данных позволяет настраивать приложение на различные типы ПП и люминофоров, модели устройств пользователей, требования к точности идентификации упаковочных материалов. Функциональное и нагрузочное тестирование приложения, выполненное для различных типов упаковочных материалов и моделей мобильных устройств, подтвердило его работоспособность, обеспечивающую заданную точность идентификации многоассортиментных упаковок при приемлемом времени формирования и проверки ЭЦП.

Приложение для защиты от фальсификации внедрено в опытно-промышленную эксплуатацию на заводе по производству жестких каландрированных ПП для упаковки фармацевтических препаратов и пищевых продуктов в Санкт-Петербурге. Приложение применимо для кодирования и идентификации широкого ассортимента массово выпускаемых изделий из ПП, к которым относятся как тароупаковочные средства, так и пластиковые карты различного назначения.

Повышение эффективности защиты МАП от фальсификации с использованием созданного кроссплатформенного приложения обеспечивается за счет снижения издержек, связанных с выпуском фальсификата под известными торговыми марками, необходимостью приобретения дополнительного оборудования (для возбуждения свечения люминофоров, получения цифровых изображений упаковок) и его доставки до точек производства упаковок и реализации МАП. Кроме того, применение в системе защиты собственных устройств пользователей, к которым предъявляются минимальные требования (наличие камеры и доступа в сеть Интернет), способствует расширению пользовательской аудитории приложения и повышению доверия пользователей к результатам проверки подлинности упаковок МАП.

Список источников

1. Власов В. А., Новикова А. Ю., Кочергина Ю. В. Фальсифицированные пищевые продукты: понятие, признаки, виды // *Аграрное и земельное право*. 2020. № 11. С. 207–210.
2. Пожилова Е. В., Новиков В. Е., Гусева Е. С., Савченко А. В. Фальсифицированные лекарственные средства и борьба с ними в Российской Федерации // *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2020. Т. 18. № 1. С. 63–70.
3. Симонов М. В. Современные технические методы защиты продукции от фальсификации // *Партнеры и конкуренты*. 2006. № 5. С. 13–16.
4. Гарькушев А. Ю., Ларионова Е. В., Захаренко Е. А. Комплексная система защиты изделий от контрафакта как дополнительная степень обеспечения информационной безопасности предприятия // *Вопр. оборон. техники*.

Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 7–8. С. 106–109.

5. Богданов В. Н., Блудов Д. А., Вихлянец П. С., Головкин В. А., Симонов М. В. Технологии защитной маркировки продукции для защиты рынка от контрафакта и подделок (обзор российских и зарубежных технологий) // Защита информации. Инсайд. 2013. № 2. С. 74–80.

6. Макаров А. В., Фирсов А. В. Использование технологий RFID и QR-кодирования с целью защиты от контрафакта продукции текстильных предприятий // Инженер. вестн. Дона. 2015. № 3. С. 46–51.

7. Новиковский Н. М., Разномазов В. М., Величко Ю. И., Сарычев Д. А., Лосев В. Н., Полуянова Г. И. Метод микроэлементного кодирования как способ защиты от контрафакта // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 496–502.

8. Плащенко В. В., Белихин А. В., Питерцев М. Э. Способ междисциплинарной защиты продукции от фальсификации с использованием радиочастотных меток и электронной подписи // Вестн. Череповец. гос. ун-та. 2017. № 2. С. 40–44.

9. Готлиб В. А., Елохин В. А., Коржавин И. Н. Машинночитываемая высокозащищенная маркировка как средство противодействия незаконному обороту контрафактной электронной компонентной базы // Петерб. журн. электроники. 2017. № 2–3. С. 54–70.

10. Сокол Л. Р., Гарипов Р. М., Сокол А. И. Исследование способов формирования защиты печатной продукции от фальсификации на стадии допечатной подготовки // Вестн. Технолог. ун-та. 2018. Т. 21. № 11. С. 171–176.

11. Нечитайлов А. А. Материалы и методы маркировки нефтепродуктов (обзор) // Журн. техн. физики. 2024. Т. 94. № 5. С. 687–698.

12. Kohlert C., Kohlert M., Chistyakova T., Ivanov A., Sadykov I. Counterfeit-proofing based on the principle of randomness // Kunststoffe International. 2010. V. 100. N. 7. P. 32–35.

13. Pat. DE 102008032781. Verpackungsfolie für Produktauthentifizierung, Authentifizierungsverfahren und -system / Kohlert C., Schmidt B., Egenolf W., Chistyakova T. / Anmeldetag 11.07.2008; Veröff. 21.01.2010.

14. Полимерные пленки / под ред. Е. М. Абдель-Бари. СПб.: ЦОП Профессия, 2010. 352 с.

15. Kohlert C., Chistyakova T. Innovationen in der Fo-

lienherstellung – Beispielhaft an der Kalandertechnologie / Unter Mitwirkung von H. Welbers, A. Polosin, M. Kohlert, F. Kleinert. Kindle: Kohlert-Consulting, 2024. 329 s.

16. Чистякова Т. Б., Садыков И. А., Колерт К., Иванов А. Б. Методы кодирования и идентификации упаковок фармацевтической продукции для защиты от фальсификации // Информационные технологии. 2011. № 7. С. 52–57.

17. Захаренко К. А., Чистякова Т. Б., Полосин А. Н., Власов Р. Э. Математические методы и алгоритмы кодирования и идентификации упаковочных полимерных материалов для защиты многоассортиментной продукции от фальсификации на основе люминофоров с помощью мобильных устройств // Изв. Санкт-Петерб. гос. технолог. ин-та (техн. ун-та). 2024. № 69. С. 85–95.

18. Колтыгин Д. С., Седельников И. А. Разработка кроссплатформенного приложения для управления робототехническим комплексом // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 17–25.

19. Умрихин Е. Д. Разработка веб-приложений с помощью ASP.Net Core MVC. СПб.: БХВ, 2023. 416 с.

20. Прайс М. C# 8 и .NET Core. Разработка и оптимизация. СПб.: Питер, 2021. 816 с.

21. Глаголев В. М. Описание и программное устранение дисторсии объектов // Изв. Туль. гос. ун-та. Техн. науки. 2017. Вып. 9. Ч. 2. С. 188–194.

22. Волков Д. А., Панищев В. С., Труфанов М. И. Метод коррекции дисторсии в задачах обработки изображений этикеток // Изв. Юго-Запад. гос. ун-та. 2019. Т. 23. № 3. С. 135–147.

23. Мясников С. Е., Ежова К. В. Исследование методов коррекции геометрических искажений на видеоизображении // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 3. С. 45–49.

24. Скворцов А. В. Построение триангуляции Делоне за линейное время // Изв. высших учебных заведений. Физика. 1999. Т. 42. № 3. С. 120–126.

25. Майоров А. А., Нгуен Т. К. Эффективный алгоритм построения триангуляции Делоне // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 1. С. 105–108.

26. Теплов А. А., Майков К. А. Модифицированный алгоритм триангуляции Делоне // Системный администратор. 2017. № 10. С. 91–95.

References

1. Vlasov V. A., Novikova A. Yu., Köchergina Yu. V. Fal'sificirovannyye pishchevyye produkty: ponyatie, priznaki, vidy [Adulterated food products: concept, signs, types]. *Agrarnoe i zemel'noe pravo*, 2020, no. 11, pp. 207-210.

2. Pozhilova E. V., Novikov V. E., Guseva E. S., Savchenko A. V. Fal'sificirovannyye lekarstvennyye sredstva i bor'ba s nimi v Rossijskoj Federacii [Counterfeit medicines and their control in the Russian Federation]. *Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoj terapii*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 63-70.

3. Simonov M. V. Sovremennyye tekhnicheskyye metody zashchity produktsii ot fal'sifikatsii [Modern technical methods to protect products from counterfeiting]. *Partnery i konkurenty*, 2006, no. 5, pp. 13-16.

4. Gar'kushev A. Yu., Larionova E. V., Zaharenko E. A. Kompleksnaya sistema zashchity izdelij ot kontrafakta kak dopolnitel'naya stepen' obespecheniya informacnoy bezopasnosti predpriyatiya [A comprehensive product protec-

tion system against counterfeiting as an additional degree of information security for the enterprise]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskyye sredstva protivodejstviya terrorizmu*, 2012, no. 7-8, pp. 106-109.

5. Bogdanov V. N., Bludov D. A., Vihlyancev P. S., Golovko V. A., Simonov M. V. Tekhnologii zashchitnoj markirovki produktsii dlya zashchity rynka ot kontrafakta i poddelok (obzor rossijskih i zarubezhnyh tekhnologij) [Protective labeling technologies for protecting the market from counterfeiting (review of Russian and foreign technologies)]. *Zashchita informacii. Insajd*, 2013, no. 2, pp. 74-80.

6. Makarov A. V., Firsov A. V. Ispol'zovanie tekhnologij RFID i QR-kodirovaniya s cel'yu zashchity ot kontrafakta produktsii tekstil'nyh predpriyatij [The use of RFID and QR-coding technologies to protect against counterfeit products of textile enterprises]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2015, no. 3, pp. 46-51.

7. Novikovskij N. M., Raznomazov V. M., Velichko Yu. I.,

Sarychev D. A., Losev V. N., Poluyanov G. I. Metod mikroelementnogo kodirovaniya kak sposob zashchity ot kontrafakta [Microelement coding method as a way to protect against counterfeiting]. *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 496-502.

8. Plashenkov V. V., Belihin A. V., Pitercev M. E. Sposob mezhdisciplinarnoj zashchity produkcii ot fal'sifikacii s ispol'zovaniem radiochastotnyh metok i elektronnoj podpisi [A method of interdisciplinary protection of products from falsification using radio frequency tags and electronic signatures]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 2, pp. 40-44.

9. Gotlib V. A., Elohin V. A., Korzhavin I. N. Mashinoschityvaemaya vysokozashchishchennaya markirovka kak sredstvo protivodejstviya nezakonnomu obrotu kontrafaktnoj elektronnoj komponentnoj bazy [Machine-readable, highly secure marking as a means of countering the illicit trafficking of counterfeit electronic components]. *Peterburgskij zhurnal elektroniki*, 2017, no. 2-3, pp. 54-70.

10. Sokol L. R., Garipov R. M., Sokol A. I. Issledovanie sposobov formirovaniya zashchity pechatnoj produkcii ot fal'sifikacii na stadii dopechatnoj podgotovki [The study of ways to form the protection of printed products from falsification at the stage of prepress preparation]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2018, vol. 21, no. 11, pp. 171-176.

11. Nechitajlov A. A. Materialy i metody markirovki nefteproduktov (obzor) [Materials and methods of labeling petroleum products (overview)]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2024, vol. 94, no. 5, pp. 687-698.

12. Kohlert C., Kohlert M., Chistyakova T., Ivanov A., Sadykov I. Counterfeit-proofing based on the principle of randomness. *Kunststoffe International*, 2010, vol. 100, no. 7, pp. 32-35.

13. Kohlert C., Schmidt B., Egenolf W., Chistyakova T. *Verpackungsfolie für Produktauthentifizierung, Authentifizierungsverfahren und -system*. Patent DE 102008032781. Anmelde tag 11.07.2008; Veröff. 21.01.2010.

14. *Polimernye plenki* [Polymer films]. Pod redakciej E. M. Abdel-Bari. Saint Petersburg, COP Professiya Publ., 2010. 352 p.

15. Kohlert C., Chistyakova T. *Innovationen in der Folienherstellung – Beispielhaft an der Kalandertechnologie*. Unter Mitwirkung von H. Welbers, A. Polosin, M. Kohlert, F. Kleinert. Kindle, Kohlert-Consulting, 2024. 329 s.

16. Chistyakova T. B., Sadykov I. A., Kohlert C., Ivanov A. B. Metody kodirovaniya i identifikacii upakovok farmacevticheskoy produkcii dlya zashchity ot fal'sifikacii [Methods of coding and identification of pharmaceutical production to provide a protection against forgery]. *Informacionnye tekhnologii*, 2011, no. 7, pp. 52-57.

17. Zakharenko K. A., Chistyakova T. B., Polosin A. N.,

Vlasov R. E. Matematicheskie metody i algoritmy kodirovaniya i identifikacii upakovochnyh polimernyh materialov dlya zashchity mnogoassortimentnoj produkcii ot fal'sifikacii na osnove lyuminoforov s pomoshch'yu mobil'nyh ustrojstv [Mathematical methods and algorithms for encoding and identifying polymeric packaging materials to protect multi-assortment products from counterfeiting based on luminophores using mobile devices]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, no. 69, pp. 85-95.

18. Koltygin D. S., Sedel'nikov I. A. Razrabotka kross-plattformennogo prilozheniya dlya upravleniya robototekhnicheskim kompleksom [Development of a cross-platform application for controlling a robotic complex]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2024, no. 3, pp. 17-25.

19. Umrihin E. D. *Razrabotka veb-prilozhenij s pomoshch'yu ASP.Net Core MVC* [Web application development using ASP.Net Core MVC]. Saint Petersburg, BHV Publ., 2023. 416 p.

20. Prajs M. *C# 8 i .NET Core. Razrabotka i optimizaciya* [C# 8 and .NET Core. Development and optimization]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2021. 816 p.

21. Glagolev V. M. Opisaniye i programmnoye ustraneniye distorsii ob'ektivov [Description and software elimination of lens distortion]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, iss. 9, part 2, pp. 188-194.

22. Volkov D. A., Panishchev V. S., Trufanov M. I. Metod korrekcii distorsii v zadachah obrabotki izobrazhenij etiketok [A method for correcting distortion in label image processing tasks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 135-147.

23. Myasnikov S. E., Ezhova K. V. Issledovanie metodov korrekcii geometricheskikh iskazhenij na videoizobrazhenii [Investigation of methods for correcting geometric distortions in a video image]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 45-49.

24. Skvorcov A. V. Postroeniye triangulyacii Delone za linejnoye vremya [Building a Delaunay triangulation in linear time]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 1999, vol. 42, no. 3, pp. 120-126.

25. Majorov A. A., Nguen T. K. Effektivnyj algoritm postroeniya triangulyacii Delone [An efficient algorithm for constructing the Delaunay triangulation]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2011, no. 1, pp. 105-108.

26. Teplov A. A., Majkov K. A. Modificirovannyj algoritm triangulyacii Delone [Modified Delaunay triangulation algorithm]. *Sistemnyj administrator*, 2017, no. 10, pp. 91-95.

Статья поступила в редакцию 20.10.2024; одобрена после рецензирования 10.12.2024; принята к публикации 14.01.2025
The article was submitted 20.10.2024; approved after reviewing 10.12.2024; accepted for publication 14.01.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Кирилл Андреевич Захаренко – аспирант, ассистент кафедры систем автоматизированного проектирования и управления; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); kzhakharenko95@outlook.com

Kirill A. Zakharenko – Postgraduate Student, Lecturer of the Department of Computer-aided Design and Control; Saint-Petersburg State Institute of Technology; kzhakharenko95@outlook.com

Тамара Балабековна Чистякова – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); nov@spbti.ru

Tamara B. Chistyakova – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Computer-aided Design and Control; Saint-Petersburg State Institute of Technology; nov@spbti.ru

Андрей Николаевич Полосин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и управления; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); polosin-1976@sapr.lti-gti.ru

Andrey N. Polosin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Computer-aided Design and Control; Saint-Petersburg State Institute of Technology; polosin-1976@sapr.lti-gti.ru

