

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-25-36

УДК 520.35:004.932.2:631.563

Метод автоматизированной оценки эффективности средств повышения сохранности плодов с помощью акустооптического видеоспектрометра

СВЕТЛАНА СЕРГЕЕВНА БАТАШОВА¹, АНАСТАСИЯ АЛЕКСАНДРОВНА ЗОЛОТУХИНА^{2✉},
АНАСТАСИЯ ВАЛЕНТИНОВНА ГУРЫЛЕВА³, НАТАЛИЯ БОРИСОВНА ПЛАТОНОВА⁴,
ВИКТОРИЯ АЛЕКСЕЕВНА КУНИНА⁵

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

^{1, 2, 3}Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

^{4, 5}Субтропический научный центр Российской академии наук, г. Сочи Краснодарского края, Россия

¹sveta.batashova@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0009-0830-2605>

²zolotukhina.aa@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>

³guryleva.av@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2239-3725>

⁴natali1875@bk.ru <https://orcid.org/0000-0003-2392-8947>

⁵kunina.v@internet.ru <https://orcid.org/0009-0005-2640-4921>

Аннотация

Предмет исследования. Методы и алгоритмы регистрации, обработки и интерпретации спектральных изображений для задач оценки поверхностных дефектов плодов. **Цель работы.** Разработка метода оценки эффективности технологий повышения сохранности плодов на основе автоматического выявления и количественной оценки их поверхностных дефектов средствами видеоспектрометрии. **Метод.** Регистрация спектральных изображений осуществлена акустооптическим видеоспектрометром с рабочим спектральным диапазоном 450–850 нм (ширина полосы пропускания 2,5 нм на длине волны 650 нм) с шагом 5 нм. Для обработки спектральных изображений применены широко апробированные операции и алгоритмы улучшения и анализа данных, в том числе коррекция неравномерности освещенности, пространственной и спектральной неоднородности коэффициента пропускания оптической системы, различные типы фильтрации изображений, пороговая бинаризация, морфологические операции и классификация объектов по спектральным признакам. Апробация предложенного подхода проведена в экспериментальном исследовании по оценке эффективности продления сохранности плодов персика и нектарина с помощью обработки ингибирующим выработку этилена препаратом. **Основные результаты.** Разработана методика регистрации и обработки спектральных изображений, позволяющая в автоматическом режиме обнаруживать и количественно характеризовать поверхностные дефекты плодов. Введен оценочный параметр, определяемый как отношение площади дефекта к общей площади поверхности плода и обеспечивающий сопоставление различных вариантов эксперимента. Апробация подхода показала возможность автоматизированного определения дефектов плода с относительной погрешностью 11%. **Практическая значимость.** Разработанные алгоритмы обработки данных обеспечивают возможность проведения регулярной диагностики образцов и выявления дефектов на ранних стадиях. Методика регистрации и обработки спектральных изображений

может быть распространена на приборы, построенные на других физических принципах получения пространственного распределения спектральных характеристик объектов. Разработанное решение пригодно для дополнения существующих методов оценки технологий продления сохранности плодов и способствует внедрению видеоспектрометрических приборов в рутинную практику агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: видеоспектрометрия, спектральные изображения, цифровая обработка, спектр отражения, классификация, неинвазивный анализ, акустооптика, плодовые культуры, технологии обработки плодов, персики, нектарины

Благодарность: в части разработки схемы эксперимента по хранению и подготовки образцов публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СЦ РАН FGRW-2022-0014, госрегистрация № 123013100006-9. В части разработки методик регистрации и обработки спектральных изображений, интерпретации и статистической обработки данных работа проводилась в рамках выполнения государственного задания НТЦ УИ РАН (проект FFNS-2022-0010).

Ссылка для цитирования: Баташова С.С., Золотухина А.А., Гурyleва А.В., Платонова Н.В., Кунина В.А. Метод автоматизированной оценки эффективности средств повышения сохранности плодов с помощью акустооптического видеоспектрометра // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 25–36. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-25-36>

Коды OCIS: 110.2970, 330.6180

Method for automated assessment of the effectiveness of means to improve fruit safety using an acousto-optical imaging spectrometer

SVETLANA S. BATASHOVA¹, ANASTASIA A. ZOLOTUKHINA^{2✉}, ANASTASIA V. GURYLEVA³, NATALIA B. PLATONOVA⁴, VICTORIA A. KUNINA⁵

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^{1, 2, 3}Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{4, 5}Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Krasnodar region, Russia

¹sveta.batashova@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0009-0830-2605>

²zolutukhina.aa@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>

³guryleva.av@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2239-3725>

⁴natali1875@bk.ru <https://orcid.org/0000-0003-2392-8947>

⁵kunina.v@internet.ru <https://orcid.org/0009-0005-2640-4921>

Abstract

Subject of study. Registration, processing and interpretation methods and algorithms for spectral images aimed at evaluating surface defects in fruits. **Aim of study.** Development of a method for assessing fruit preservation techniques based on automatic detection and quantitative evaluation of their surface defects using imaging spectroscopy. **Method.** Spectral images were acquired using an acousto-optical imaging spectrometer with a spectral range of 450–850 nm (bandwidth of 2.5 nm at wavelength 650 nm) with a 5 nm step. For processing spectral images, well-established operations and algorithms for data enhancement and analysis were employed. This included correction for uneven illumination, correction for spatial and spectral inhomogeneity of the optical system's transmittance coefficient, various image filtering techniques, threshold binarization, object classification based on spectral features. The proposed approach was tested in an experimental study evaluating the effectiveness of peaches and nectarines preservation techniques using a treatment inhibiting ethylene production. **Main results.** A methodology for registering and processing spectral images have been developed. This enables the automated detection and quantitative characterization of surface defects on fruits. An evaluative parameter has been introduced, defined as the ratio of the defect area to the total surface area of the fruit, allowing for the comparison of different experimental conditions.

The testing of the approach demonstrated the possibility of automated determination of the fetal defect size with a relative error of 11%. **Practical significance.** The developed data processing algorithms enable regular diagnostics of samples and the identification of defects at early stages. The methodology for registering and processing data can be extended to devices based on other physical principles for obtaining the spatial distribution of spectral characteristics of objects. The developed solution is suitable for complementing existing methods for assessing fruit preservation techniques and contributes to the integration of imaging spectrometers into the routine practice of the agro-industrial complex.

Keywords: imaging spectroscopy, spectral images, digital processing, reflection spectrum, classification, non-invasive analysis, acousto-optics, fruit crops, fruit preservation technologies, peaches, nectarines

Acknowledgment: in the development of the storage experiment scheme and sample preparation, this publication was prepared as part of the implementation of the state task of the Federal Scientific Center for Research and Development of the Russian Academy of Sciences (FGRW-2022-0014, registration № 123013100006-9). Regarding the development of methods for registering and processing spectral images, interpreting and statistically processing data, this study received support from the Federal State Task Program by Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences (FFNS 2022 0010).

For citation: Batashova S.S., Zolotukhina A.A., Guryleva A.V., Platonova N.B., Kunina V.A. Method for automated assessment of the effectiveness of means to improve fruit safety using an acousto-optical imaging spectrometer [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 7. P. 25–36. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-25-36>

OCIS codes: 110.2970, 330.6180

ВВЕДЕНИЕ

Видеоспектрометрия обеспечивает дистанционную регистрацию пространственного распределения спектральных характеристик исследуемой поверхности и поэтому является ценным диагностическим инструментом в широком круге отраслей, в том числе в сельском хозяйстве [1, 2], биомедицине [3, 4], неразрушающем контроле [5] и др. В основе сбора данных видеоспектрометрами лежат различные физические принципы, однако общим является возможность получения набора спектральных изображений, анализ которых позволяет совместно характеризовать спектральные и морфологические признаки объектов. Одной из практических реализаций указанного подхода является применение видеоспектрометрии для неинвазивной оценки состояния ягодных и плодовых культур, обеспечивающей мониторинг изменений не только химического состава плодов, но и их структуры и внешнего вида [6].

Исследованию возможности использования анализа спектральных изображений для контроля состояния плодов посвящен ряд работ, в которых демонстрируются его преимущества перед традиционными способами диагностики [7]. Так, метод количественного определения химического состава плодов с помощью инстру-

ментальных анализов обладает всеми недостатками рутинных разрушающих техник и не дает оценку состояния наружного слоя плодов [8]. Идентификация поверхностных дефектов, проводимая визуально, отличается субъективным и качественным характером, а также низкой производительностью. Предложена автоматизация визуального осмотра с помощью анализа цветных изображений плодов, однако их широкое цветовое разнообразие даже в пределах одного вида ограничивает надежность такого метода [9]. При этом видеоспектрометрия может обеспечить одновременно неинвазивность, объективность, автоматизированность, высокую производительность, надежность и количественный характер контроля образцов [10]. Указанные преимущества важны как в рутинных задачах мониторинга заложенного на хранение урожая, так и при тестировании технологий повышения срока сохранности плодов при долгосрочном хранении. Разработка и внедрение таких технологий являются активно развивающимся направлением плодородства, однако до сих пор отсутствуют единые критерии и стандарты для оценки их эффективности, а наиболее распространенными методами диагностики для решения указанной задачи являются те же инструментальные анализы и визуальный осмотр [8].

В настоящее время проведен ряд исследований, посвященных разработке методик использования видеоспектральных приборов для контроля параметров плодов. В таких материалах были рассмотрены как особенности работы с конкретными плодами — яблоками [11], цитрусовыми [12], томатами [13] и др., так и общие проблемы получения достоверных данных об исследуемых объектах. Например, алгоритм компенсации искажений освещенности по краям плодов, геометрическая модель отражения фруктов или подходы к получению изображения со всей поверхности плода [14–16]. При этом единой методики обнаружения дефектов плодовых культур методами видеоспектрометрии в известных авторам работах на сегодняшний день не представлено. Остаются открытыми вопросы влияния на результат спектральных и пространственных артефактов, вызванных особенностями конкретной схемы регистрации спектральных изображений и условиями освещения, учета разнообразия характеристик поверхности плодов и расположения дефектов. Кроме того, надежность результатов исследования во многом обеспечивает надлежащая интерпретация регистрируемых спектральных данных, в том числе введение подходящих оценочных параметров для конкретной задачи.

Целью работы, результаты которой представлены в статье, является разработка метода оценки эффективности технологий повышения сохранности плодов на основе автоматического выявления и количественной оценки их поверхностных дефектов средствами видеоспектрометрии.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Перспективным направлением в промышленном садоводстве является выращивание персиков и нектаринов в условиях влажных субтропиков России [17]. При этом плоды персика и нектарина относят к скоропортящимся, поэтому для них особенно актуальны применение технологий повышения срока хранения и оценка их эффективности. В рамках исследования в опытно-технологическом отделе сектора плодовых культур ФИЦ СНИЦ РАН был проведен эксперимент по хранению, в первый день которого были отобраны 16 плодов персика сорта «Редхавен» и 16 плодов нектарины сорта «Сильвер Рома».

Качество персиков и нектаринов соответствовало характеристикам и нормам для высшего товарного сорта по ГОСТ 34340-2017 «Персики и нектарины свежие. ТУ». Диаметр максимального поперечного сечения и масса плодов персика варьировались в пределах 64–67 мм и 120–140 г соответственно, в то время как у плодов нектарина эти параметры составляли 67–72 мм и 150–170 г.

К преждевременной порче плодов приводит начинающаяся сразу после их сбора активная выработка фитогормона этилена. Для ингибирования этилена разработан ряд отечественных химических препаратов, одним из которых является использованный в настоящем исследовании препарат «1-МЦП «Фреш-Форма» [18]. Препарат содержит газ 1-метилциклопропен, инкапсулированный в макромолекулы циклодекстрина, являющегося аналогом пищевого крахмала и признанный безопасным [19]. По результатам отечественных и зарубежных исследователей применение препарата на основе метилциклопропена позволяет продлить сроки хранения, поскольку обработанные им плоды приобретают большую устойчивость к распространению физиологических заболеваний без потери своих товарных качеств [20–22].

Половина образцов (8 плодов персика и 8 плодов нектарина) была обработана сразу после съема плодов в состоянии потребительской зрелости с постепенным понижением температуры фруктов. Обработку проводили в климатической камере с установленной температурой, рекомендованной производителем препарата (12–14 °С). Время экспозиции составило 24 час. Оставшаяся часть плодов (контроль), в которую вошли 8 персиков и 8 нектаринов, обработке не подвергалась. После выдержки в климатической камере обработанные и необработанные плоды были заложены на 10-ти дневное хранение в промышленный холодильный шкаф с установленной температурой +5 °С. Всего было заложено 4 группы плодов по 8 образцов в каждом: обработанные и необработанные персики, обработанные и необработанные нектарины.

Традиционный анализ химического состава плодов не позволяет определить состояние их поверхности в процессе хранения, кроме того, регулярность его проведения ограничена ресурсами лаборатории, поэтому, как правило, лабораторный анализ дополняется визуаль-

ным осмотром и определением количества образцов с дефектами в выборке. При этом отсутствуют единые методики, позволяющие унифицировать визуальный осмотр, что ведет к субъективности оценки и высокой зависимости результата от опыта оператора.

В целях разработки автоматического метода обнаружения дефектов плодов с помощью видеоспектрометрии была проведена спектральная съемка обработанных и контрольных плодов нектарина и персика. Плоды выкладывались по четыре штуки (два сверху и два снизу) на двухэтажную платформу с сохранением положения каждый день наблюдений. Каждая группа включала 8 образцов, для сбора полной информации которых была проведена съемка с обеих сторон плода. В качестве прибора регистрации спектральных данных использовался разработанный в НТЦ

УП РАН акустооптический (АО) видеоспектрометр [23]. Его структурная схема представлена на рис. 1, а технические параметры приведены в таблице. Спектральная фильтрация с помощью АО ячейки основана на дифракции падающего излучения на наведенной в кристаллической среде акустической волной объемной дифракционной решетке. Период этой решетки и зависящую от него длину волны оптического излучения, пропускаемого АО монохроматором, определяет высокочастотный управляющий сигнал, подаваемый на пьезопреобразователь, который установлен на кристалле. Современные приборы построены на основе двойного монохроматора, состоящего из пары идентичных АО ячеек, развернутых относительно друг друга на 180° , что обеспечивает компенсацию пространственных искажений и повышение спек-

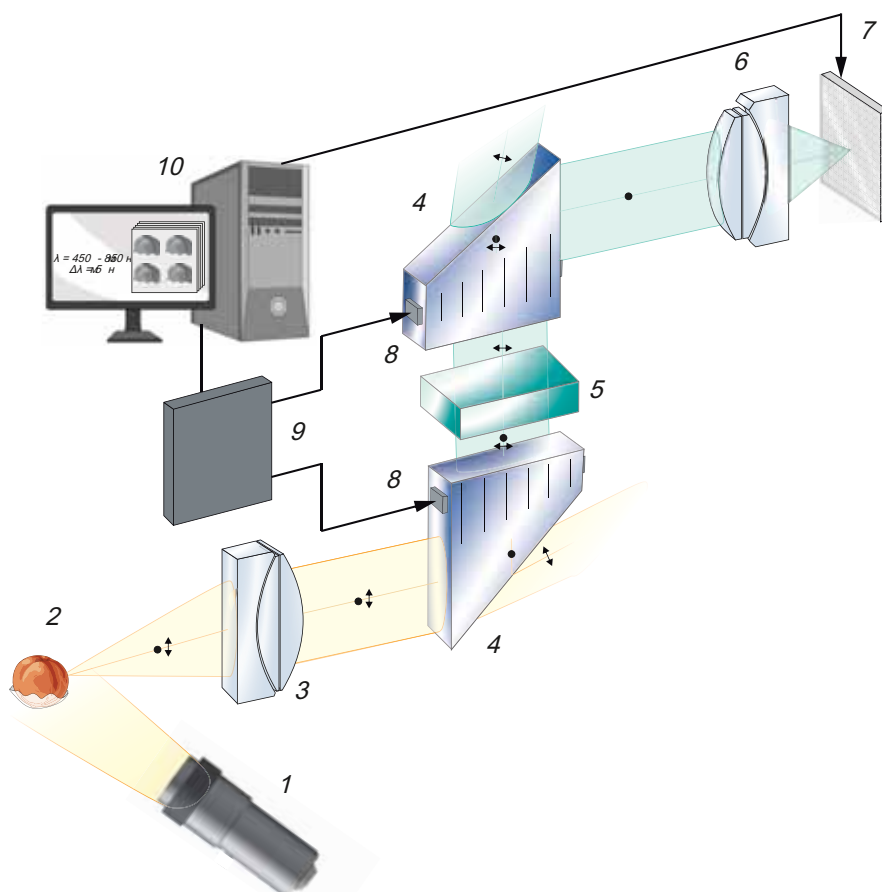


Рис. 1. Структурная схема АО видеоспектрометра. 1 — источник излучения, 2 — объект исследования, 3 — коллиматор, 4 — АО ячейки, 5 — поляризатор, 6 — объектив, 7 — матричный приемник излучения, 8 — пьезопреобразователи, 9 — высокочастотный генератор, 10 — персональный компьютер

Fig. 1. Structural diagram of the acousto-optical imaging spectrometer. (1) Light source, (2) object, (3) collimator, (4) acousto-optical cells, (5) polarizer, (6) objective, (7) sensor, (8) piezoelectric transducers, (9) high-frequency generator, (10) Personal Computer

Технические параметры АО видеоспектрометра
 Technical parameters of the acousto-optical imaging spectrometer

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, нм	от 450 до 850
Спектральное разрешение, нм	2,5 на 450 нм (120 см^{-1}) 3,5 на 532 нм (120 см^{-1}) 9 на 850 нм (120 см^{-1})
Число и положение спектральных каналов	Произвольные в пределах рабочего спектрального диапазона
Размер изображения, пкс	1024×1024
Поле зрения, град	15×20 при использовании объектива
Диапазон ручной фокусировки, м	от 1 до бесконечности

трального разрешения [24]. Такая реализация спектрального сканирования позволяет проводить регистрацию данных с минимальным временем перестройки фильтра, отсутствием пространственных искажений [25] и возможностью адресной перестройки на наиболее информативные спектральные каналы.

В процессе регистрации спектральных данных образцы освещались галогенной лампой. Отраженное от них излучение с помощью коллиматора направляется на вход АО монохроматора, состоящего из двух развернутых на 180° идентичных АО ячеек и расположенного между ними поляризатора. Отличительной особенностью представленной схемы является выделение излучения необходимой поляризации с помощью косоугольной грани АО ячейки без использования дополнительных поляризаторов, что позволяет сократить потери излучения. Изображение, полученное на одной длине волны, фокусируется объективом на сенсор широкополосного матричного приемника излучения. Изменяя частоты акустических волн пьезопреобразователей с помощью высокочастотного генератора, можно перестраивать период дифракционных решеток, создаваемых акустическими волнами, и получать изображение объекта на произвольно задаваемой длине волны. Управление перестройкой длин волн и захват сигнала с камеры реализуются посредством программного обеспечения,

установленного на персональном компьютере. Из-за того что наиболее информативные каналы в задаче обнаружения дефектов персиков и нектаринов не определены, сбор данных включал получение серии спектральных изображений плодов в спектральном диапазоне 450–850 нм с шагом 5 нм. Съемка образцов проводилась в течение 10 дней эксперимента по хранению до появления дефектов на большинстве образцов.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для анализа собраны данные в виде серий спектральных изображений объектов исследования за каждый из 10 дней наблюдения. Серия представляет собой 81 снимок, каждый из которых получен в узком спектральном канале (ширина полосы пропускания 2,5 нм на длине волны 650 нм) в диапазоне 450–850 нм с шагом 5 нм. Положение объектов неизменно в процессе регистрации серий, что позволяет определять их спектральные характеристики в каждом пикселе. За каждой съемкой объектов следует регистрация спектральных изображений референсной пластины с равномерным в пространстве и близким к единице во всем спектральном диапазоне коэффициентом отражения.

В основные этапы автоматического алгоритма выявления дефектов плодов входят предварительная обработка кадров, выделение плодов, сравнение каждого пиксела выделенных областей с ранее полученными спектральными характеристиками дефектов и участков плода, свободных от них, а также классификация пикселей с последующей бинаризацией.

Предварительная обработка данных включает устранение высокочастотных шумов с помощью медианной фильтрации изображений и сглаживание спектральных характеристик гауссовым фильтром. Затем путем попиксельного деления спектральных данных объекта на таковые референса определяется пространственное распределение спектрального коэффициента отражения поверхности образцов. Из-за формы плодов получить равномерную освещенность видимой в кадре части плода невозможно, поэтому в предварительную обработку входит устранение этой неоднородности, а именно осветление теней на краях плодов по алгоритму, описанному в работе [26].

Для автоматического разделения пикселей, относящихся к плодам, их дефектам или фону, необходимо предварительное получение спектральных характеристик отдельных объектов сцены. Такие характеристики определяются усреднением спектральных коэффициентов отражения по пикселям, которые относятся к областям объектов разного рода, выделенным вручную на спектральных изображениях. Таким же образом по сериям изображений определяются спектральные характеристики участков плодов с дефектами и без них. Несколько плодов, участвующих в эксперименте, имели более темную окраску и заметные спектральные отличия от более светлых образцов, несмотря на полное отсутствие признаков начала гниения или механических повреждений. Для того чтобы алгоритм работал одинаково эффективно для всех вариантов окраски плодов с минимальным процентом ложноположительных результатов, в базу спектральных характеристик входят спектры как светлых, так и темных персиков и нектаринов. Так как в период созревания плодов могли произойти изменения их спектрального коэффициента отражения, в эксперименте использовались спектральные данные первого, пятого и десятого дней наблюдения для формирования базы эталонных спектральных характеристик плодов.

Для автоматизации обнаружения дефектов требуется выделение плодов в кадре путем удаления фона со снимков. Спектральные коэффициенты отражения персика и нектарина имеют пики в красной области, в то время как коэффициент отражения фона (платформа, стена, штатив) равномерен во всем спектральном диапазоне. С учетом указанных спектральных особенностей при вычитании двух изображений на длинах волн 715 и 570 нм плоды контрастно выделяются на более темном фоне. Применение бинаризации к такому разностному изображению позволяет выделить образцы среди других частей изображения. Чтобы исключить погрешность определения отражения плода от зеркального покрытия штатива как его области, над бинаризованными изображениями осуществляется морфологическая операция раскрытия [27], приводящая к удалению мелких объектов и тонких линий с изображения с сохранением формы и размера более крупных объектов,

с помощью структурного элемента в виде диска диаметром 10 пикселей.

На следующем этапе автоматического обнаружения дефектов плодов проводится спектральная классификация пикселей, заключающаяся в сравнении спектрального коэффициента отражения каждого пикселя с полученными ранее эталонными спектральными характеристиками. С целью исключения остаточных влияний неравномерности освещенности объектов сравниваемые спектры отражения ограничиваются областью 725–765 нм, в которой наиболее выражены спектральные особенности участков плодов с дефектами и без них, и приводятся к диапазону значений от 0 до 1. Затем по спектральным данным каждого пространственного элемента определяется нормализованный показатель спектрального сходства, сочетающий в себе преимущества спектральных угловых и амплитудных различий в совокупности с высокой производительностью вычислений. Для его расчета используются значения спектрального угла α и нормализованного евклидова расстояния \hat{A} [28]

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\int \rho_r(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda}{\sqrt{\int \rho_r(\lambda)^2 d\lambda} \sqrt{\int \rho_t(\lambda)^2 d\lambda}} \right), \quad (1)$$

$$\hat{A} = (A - A_{\min}) / (A_{\max} - A_{\min}), \quad (2)$$

где $\rho_r(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения участка плода, свободного от дефектов, $\rho_t(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения текущего пространственного элемента спектральных данных, A — евклидово расстояние между сравниваемыми спектральными характеристиками, A_{\min} , A_{\max} — минимальное и максимальное расстояния между сравниваемыми спектральными характеристиками.

Нормализованный показатель определяется следующим выражением:

$$NS3 = \sqrt{\hat{A}^2 + (1 - \cos \alpha)^2}. \quad (3)$$

Для исключения ошибочного определения областей плодов с темной окраской как участков с дефектом вычисляются распределения нормализованного показателя сходства с характеристиками участков, свободных от дефектов плодов — темного и светлого типов

окраски. Затем для полученных карт NS3 проводится бинаризация в двух реализациях. В первом случае обнуляются все значения выше порога $NS3 = 0,40$ для выделения дефектов и участки плода с темной окраской, во втором случае значениям выше порога $NS3 = 0,22$ присваивается нулевое значение, что позволяет получить пространственное распределение темноокрашенных участков здоровых персиков и нектаринов. Пороги бинаризации определяются эмпирически и едины для всех образцов. Последующее вычитание двух полученных бинаризованных изображений позволяет выделить только дефектные участки плодов.

В качестве параметра для оценки эффективности средств повышения сохранности плодов предложена количественная мера поражения плода дефектами p , определяющаяся следующим образом:

$$p = N_{\text{defect}} / N_{\text{fruit}}, \quad (4)$$

где N_{defect} — количество пикселей области плода на изображении, которая в процессе вычислений определяется как дефектная, N_{fruit} — количество пикселей, относящихся на изображении к плоду.

Оценочный параметр p усредняется по всем образцам в группе для каждого из 10 дней проведения эксперимента по хранению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ниже представлены результаты применения предложенной методики видеоспектральной съемки плодов и разработанного алгоритма обработки и интерпретации спектральных данных, собранных в течение всего эксперимента по хранению. Результат автоматического обнаружения дефектных участков плодов продемонстрирован на примере хранения одних и тех же образцов разных групп персиков (рис. 2а) и нектаринов (рис. 2б) в течение 10 дней наблюдения. Обнаружение дефектов плодов при обработке одной серии гиперспектральных изображений занимало менее минуты (параметры вычислительной станции: Intel Core i3-7130U, ОЗУ 6,00 ГБ). По результатам обработки данных всех дней эксперимента была определена динамика изменения предложенного параметра оценки эффективности обработки препаратом персиков (рис. 2в)

и нектаринов (рис. 2г). За два первых дня эксперимента области дефекта плодов не были обнаружены ни визуальным осмотром, ни автоматическим алгоритмом обнаружения, поэтому приведены результаты, начиная с третьего дня.

За период наблюдения площадь покрытия дефектами необработанных персиков оказалась больше, чем обработанных. По результатам эксперимента с нектаринами можно заключить, что обработка практически не повлияла на образование дефектов на них. Разброс значений параметра p в выборке обусловлен различиями спелости образцов, единственным принятым подходом к неинвазивному определению которой является визуальный осмотр.

Для сравнения площадей дефектов, полученных в автоматическом режиме и при визуальном осмотре, являющемся в настоящий момент стандартной процедурой, специалистом был проведен такой осмотр, и с его учетом для каждой серии проводилась разметка дефектов на одном из спектральных изображений. Далее по количеству пикселей выделенной специалистом области по формуле (4) был определен процент дефекта от общей площади плода, значение которого было принято как эталонное. Полученные данные позволили определить относительную погрешность автоматического обнаружения дефектов плодов в сравнении с результатами визуального осмотра. Средняя относительная погрешность определения по всем плодам составила 11%, а статистика ее распределения по данным недельного хранения образцов приведена на рис. 3.

При анализе данных третьего дня эксперимента у трех плодов специалистом не было обнаружено дефектных участков плодов, однако алгоритмом такие области были выделены. При сравнении расположения таких областей с результатами визуального осмотра в более поздние дни эксперимента было установлено, что выделенные алгоритмом зоны располагались вблизи позднее отмеченных оператором дефектов. Такое несоответствие может быть следствием большей чувствительности алгоритма по сравнению с визуальным осмотром к появлению дефектов на ранних стадиях и их развитию. К проявлению этого же свойства можно отнести то, что в подавляющем большинстве случаев в ходе всего эксперимента погрешность носила ложноположительной характер, т.е. в качестве относящихся к дефекту

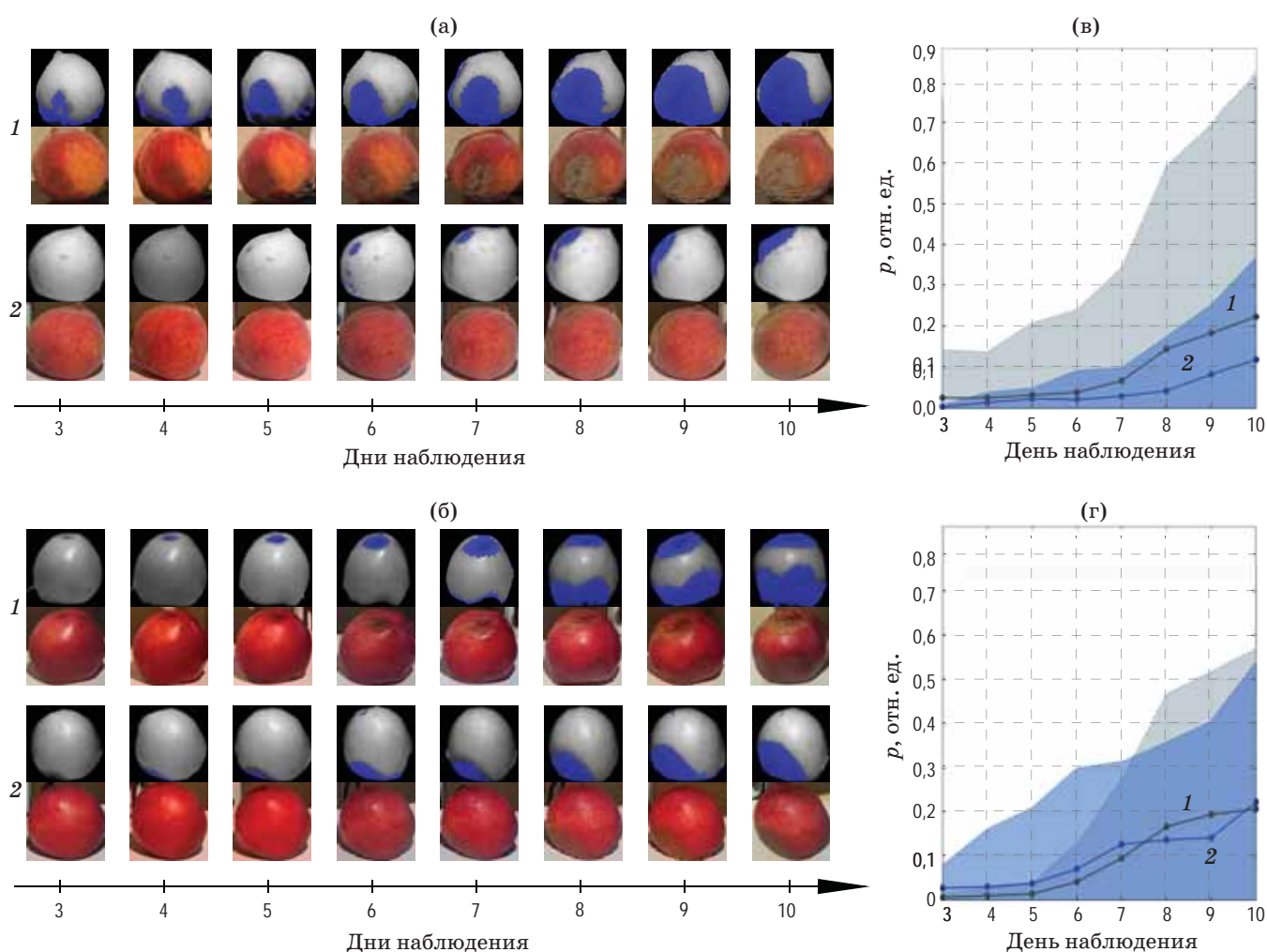


Рис. 2. Результаты применения предложенного алгоритма обнаружения дефектов плодов. Выделение дефектов плодов персика (а) и нектарина (б), изменение оценочного параметра p необработанных (1) и обработанных (2) плодов персика (в) и нектарина (г) в течение эксперимента

Fig. 2. Results of the proposed fruit defect detection algorithm. (a) Highlighting peach and (б) nectarine fruit defects, change in the evaluation parameter p unprocessed (1) and processed (2) fruits of peach (в) and nectarine (г) during the experiment

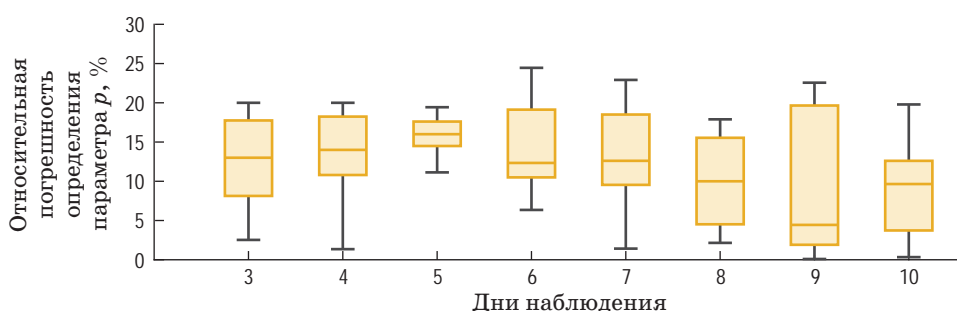


Рис. 3. Относительная погрешность определения площади дефекта с помощью разработанного алгоритма в сравнении с визуальным осмотром. Горизонтальная линия в столбце отмечает медианное значение, рамки столбца охватывают второй и третий квартили выборки, а черные метки указывают на максимальное и минимальное значения в ней

Fig. 3. Defect area determination relative error using the developed algorithm compared to visual inspection. The horizontal line within the column represents the median value, the box encloses the second and third quartiles, and black marks indicate the maximum and minimum values

пикселей выделялись те, которые располагаются за пределами размеченной оператором зоны, однако вблизи ее границ.

Замена осмотра предложенным подходом, обеспечивающим автоматическое определение дефектов с помощью анализа гиперспектральных изображений, позволяет не только ввести объективный оценочный параметр для конкретной задачи, но и увеличить частоту мониторинга состояния плодов как в процессе испытания технологий повышения их сохранности, так и при промышленном хранении урожая. Регулярный мониторинг, помимо прочего, позволит выявлять дефекты на более ранних этапах развития, а значит, проводить более тонкую оценку технологии сохранности плодов и даже сохранить урожай с помощью превентивного удаления поврежденных плодов из общей массы. Несмотря на имеющуюся погрешность определения дефектов относительно результатов визуального осмотра, автоматический алгоритм обеспечивает более стабильный результат обнаружения, в то время как на работу оператора могут влиять усталость, условия освещения, физиологические особенности и др.

Выбор предпочтительной технологии продления сроков хранения может проводиться как по размеру выявленных дефектов, так и по моменту их появления, при этом предпочтение следует отдавать препарату или методу, обеспечивающему наименьшую площадь дефектов, т.е. по значению количественной меры поражения плода дефектами — параметру p . При анализе в настоящей работе рассмотрена динамика изменения параметра p в течение 10 дней, являющаяся комбинацией указанных критериев. Заметные различия в характере изменения значения p обработанных и необработанных плодов персика и сравнительно малое изменение этого показателя у нектаринов показывают большую эффективность рассмотренного препарата для персиков.

Модели распределения значений предложенного оценочного параметра по дням наблюдения, получаемые в результате проведения эксперимента по предложенной схеме, могли бы использоваться для текущей оценки состояния плодов рассмотренного сорта, например, при сравнении характеристик плодов разных сортов или определении свежести коммерчески реализуемой продукции, при

этом следует отметить, что выбор степени полинома модели может являться предметом отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований предложен метод оценки эффективности технологии продления сохранности плодов с использованием видеоспектрометрии, в том числе методика регистрации и обработки спектральных изображений, позволяющая в автоматическом режиме обнаруживать и количественно характеризовать поверхностные дефекты плодов, а также оценочный параметр, служащий для сопоставления различных вариантов эксперимента. Проведенная апробация разработанного решения в эксперименте по продлению сохранности плодов персика и нектарина с помощью обработки ингибирующим выработку этилена препаратом показала возможность автоматизированного выделения дефектов плодов с относительной погрешностью 11%.

Разработанные алгоритмы обработки данных обеспечивают унифицированность рассмотренного подхода, возможность проведения регулярной диагностики образцов и выявления дефектов на ранних стадиях. Кроме того, приведенная методика регистрации и обработки данных может быть распространена на приборы, построенные на других физических принципах получения пространственного распределения спектральных характеристик объектов. При этом особыми преимуществами использования АО видеоспектрометра являются одновременные производительность благодаря произвольной спектральной перестройке и универсальность за счет широкого диапазона рабочих длин волн.

Введенный параметр оценки эффективности технологий повышения сохранности плодов, характеризующий площадь дефекта к общей площади поверхности плода в пикселях, способен дополнить данные анализа химического состава плодов и позволяет объективно и количественно описать состояние наружного слоя образцов и проводить сравнение исследуемых технологий хранения по динамике роста площади дефектов.

Предложенный подход отличается неинвазивным характером, возможностью объектив-

ной, количественной оценки и устойчивостью к значительному цветовому разнообразию поверхности плодов. Кроме того, он может быть применен при работе с плодами большинства культур со схожей с персиками и нектаринами геометрией, а также как в условиях климатической камеры, так и в установках конвейерного типа, благодаря использова-

нию производительного видеоспектрометра и невысокого времени исполнения алгоритма обработки данных. Так, разработанное решение оказывается инструментом, пригодным для дополнения существующих технологий в плодоводстве, и способствует внедрению видеоспектрометрических приборов в рутинную практику агропромышленного комплекса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dristi D., Manoranjan P., Manzur M., et al. Comparative analysis of machine and deep learning models for soil properties prediction from hyperspectral visual band // *Environments*. 2023. V. 10. № 5. P. 77. <https://doi.org/10.3390/environments10050077>.
2. Soucy N., Sekeh S.Y. CEU-Net: Ensemble semantic segmentation of hyperspectral images using clustering // *J. Big Data*. 2023. V. 10. № 1. P. 42. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00718-3>
3. van Vliet-Perez S.M., van de Berg N.J., Manni F., et al. Hyperspectral imaging for tissue classification after advanced stage ovarian cancer surgery — a pilot study // *Cancers*. 2022. V. 14. № 6. P. 1422. <https://doi.org/10.3390/cancers14061422>
4. Jong L.S., de Kruif N., Geldof F., et al. Discriminating healthy from tumor tissue in breast lumpectomy specimens using deep learning-based hyperspectral imaging // *Biomed. Opt. Exp.* 2022. V. 13. № 5. P. 2581–2604. <https://doi.org/10.1364/BOE.455208>
5. Singh T., Garg N.M., Iyengar S.R.S. Nondestructive identification of barley seeds variety using near-infrared hyperspectral imaging coupled with convolutional neural network // *J. Food Process Eng.* 2021. V. 44. № 10. P. e13821. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13821>
6. Garini Y., Young I.T., McNamara G. Spectral imaging: Principles and applications // *Cytometry Part A*. 2006. V. 69A. № 8. P. 735–747. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20311>
7. Fan S., Huang W., Guo Z., et al. Prediction of soluble solids content and firmness of pears using hyperspectral reflectance imaging // *Food Analytical Methods*. 2015. V. 8. № 8. P. 1936–1946. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-0079-1>
8. Juhneva-Radenkova K., Radenkova V., Kundzins K., Seglina D. Effect of ozone treatment on the microstructure, chemical composition and sensory quality of apple fruits // *Food Sci. and Technol. Internat.* 2019. V. 25. № 3. P. 252–267. <https://doi.org/10.1177/1082013218815285>
9. Li J., Chen L., Huang W., et al. Multispectral detection of skin defects of bi-colored peaches based on vis — NIR hyperspectral imaging // *Postharvest Biol. Technol.* 2016. V. 112. P. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.10.007>
10. Manley M. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials // *Chem. Soc. Rev.* 2014. V. 43. № 24. P. 8200–8214. <https://doi.org/10.1039/c4cs00062e>
11. ElMasry G., Wang N., Vigneault C. Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks // *Postharvest Biol. Technol.* 2009. V. 52. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.11.008>
12. Molto E., Blasco J., Gomez-Sanchis J. Analysis of hyperspectral images of citrus fruits // *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*. 2010. P. 321–348. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374753-2.10010-3>
13. Polder G., van der Heijden G. Measuring ripening of tomatoes using imaging spectrometry // *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*. 2010. P. 369–402. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374753-2.10012-7>
14. Qin J., Lu R. Measurement of the optical properties of fruits and vegetables using spatially resolved hyperspectral diffuse reflectance imaging technique // *Postharvest Biol. Technol.* 2008. V. 49. № 3. P. 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.010>
15. Shang M., Xue L., Zhan Y., et al. Full-surface defect detection of navel orange based on hyperspectral online sorting technology // *J. Food Sci.* 2023. V. 88. № 6. P. 2488–2495. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16569>
16. Балабанов П.В., Жиркова А.А., Дивин А.Г. и др. Информационно-измерительная система для управления процессом сортировки овощей и фруктов // *Вестник тамбовского государственного технического университета*. 2022. Т. 28. № 4. С. 526–533. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04.pp.526-533>
17. Балабанов П.В., Жиркова А.А., Дивин А.Г., et al. An information-measuring system to monitor vegetable and fruit sorting process [in Russian] // *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2022. V. 28. № 4. P. 526–533. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04.pp.526-533>
17. Егорович С.Н. Температурный режим и продуктивность сортов персика во влажных субтропиках России // *Новые технологии*. 2018. Т. 13. № 4. С. 230–235.
18. Егорович С.Н. Temperature regime and productivity of peach varieties in humid subtropics of Russia [in Russian] // *New Technologies*. 2018. V. 13. № 4. P. 230–235.
18. Причко Т.Г. Регулирование качества плодов при выращивании, уборке, хранении и переработке // *Садоводство и виноградарство*. 2004. № 6. С. 2–4.
19. Причко Т.Г. Regulation of fruit quality during cultivation, harvesting, storage and processing [in Russian] // *Horticulture and Viticulture*. 2004. № 6. P. 2–4.
19. Zanella A. Control of apple superficial scald and ripening — a comparison between 1-methylcyclopropene and diphenylamine postharvest treatments, initial low oxygen stress and ultra-low oxygen storage // *Postharvest Biol. Technol.* 2003. V. 27. № 1. P. 69–78. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00187-4)
20. Першакова Т.В., Лисовой В.В., Купин Г.А. и др. Способы обеспечения стабильного качества растительного сырья в процессе хранения // *Политемати-*

- ческий сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 116. № 2. С. 205–217.
- Pershakova T.V., Lisovoy V.V., Kupin G.A. et al. Methods of ensuring stable quality of plant raw materials during storage [in Russian] // Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2016. V. 116. № 2. P. 205–217.
21. Уайлд Г., Парадовский А. Коммерческое использование технологии применения ингибитора этилена (1-MCP) за последние 8 лет в США // Тез. докл. междунар. научно-практической конф. — Высокоточные технологии производства, хранения и переработки плодов и ягод. Краснодар, Россия. 07–10 сентября 2010. С. 330–336.
- Wild G., Paradovsky A. Commercial use of ethylene inhibitor (1-MCP) technology in the USA: High-precision technologies for the production, storage and processing of fruits and berries [in Russian] // Internat. Scientific and Practical Conf. — High-precision Technologies for the Production, Storage and Processing of Fruits and Berries (Abstracts of reports). Krasnodar, Russia. September 07–10, 2010. P. 330–336.
22. Омарова З.М., Причко Т.Г., Омаров М.Д. и др. Особенности уборки, переработки и изменения, происходящие в плодах фейхоа (*Acca sellowiana* O. Berg) при хранении // Субтропическое и декоративное садоводство. 2023. № 86. С. 85–96. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2023-86-85-96>
- Omarova Z.M., Prichko T.G., Omarov M.D., et al. Features of harvesting, processing and changes occurring in feijoa fruits (*Acca sellowiana* O. Berg) during storage [in Russian] // Subtropical and Decorative Gardening. 2023. № 86. P. 85–96. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2023-86-85-96>
23. Pozhar V., Gaponov M., Machikhin A., Shirokov S. Hyperspectral monitoring AOTF-based apparatus // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1368. № 2. P. 022046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/2/022046>
24. Мачихин А.С., Пожар В.Э., Батшев В.И. Акустооптический видеоспектрометрический модуль для медицинских эндоскопических исследований // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 7. С. 44–49.
- Machikhin A., Pozhar V., Batshev V. Acousto-optic video spectrometer module for medical endoscopic studies // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. № 7. P. 439–443. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000439>
25. Шарикова М.О., Баландин И.А., Батшев В.И., Козлов А.Б. Пространственно-спектральная коррекция акустооптического видеоспектрометра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 79–89. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-79-89>
- Sharikova M.O., Balandin I.A., Batshev V.I., Kozlov A.B. Spatial and spectral correction of acousto-optical videospectrometer // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 11. P. 00–00. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000000>
26. Shang M., Xue L., Zhang Y., et al. Full surface defect detection of spherical fruit based on hyperspectral online sorting technology // J. Food Sci. 2022. V. 88. № 6. P. 2488–2495. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16569>
27. Anuar M.S.K., Asral J., Nasri S. A study of image processing using morphological opening and closing processes // Internat. J. Control Theory and Applications. 2016. V. 9. № 31. P. 15–21.
28. Nidamanuri R.R., Zbell B. Normalized spectral similarity score (NS3) as an efficient spectral library searching method for hyperspectral image classification // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2011. V. 4. № 1. P. 226–240. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2086435>

АВТОРЫ

Светлана Сергеевна Баташова — студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; <https://orcid.org/0009-0009-0830-2605>; sveta.batashova@yandex.ru

Анастасия Александровна Золотухина — инженер-исследователь, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57724434900; <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>; zolutukhina.aa@ntcup.ru

Анастасия Валентиновна Гурyleва — кандидат технических наук, научный сотрудник, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57212027073; <https://orcid.org/0000-0003-2239-3725>; guryleva.av@ntcup.ru

Наталья Борисовна Платонова — кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, ФИЦ СЦ РАН, г. Сочи Краснодарского края, 354002, Россия; Scopus ID: 57191348192; <https://orcid.org/0000-0003-2392-8947>; natali1875@bk.ru

Виктория Алексеевна Кунина — кандидат биологических наук, научный сотрудник, ФИЦ СЦ РАН, г. Сочи Краснодарского края, 354002, Россия; Scopus ID: 58188493500; <https://orcid.org/0009-0005-2640-4921>; kunina.v@internet.ru

AUTHORS

Svetlana S. Batashova — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; <https://orcid.org/0009-0009-0830-2605>; sveta.batashova@yandex.ru

Anastasia A. Zolotukhina — Engineer Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57724434900; <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>; zolutukhina.aa@ntcup.ru

Anastasia V. Guryleva — PhD (Engineering), Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57212027073; <https://orcid.org/0000-0003-2239-3725>; guryleva.av@ntcup.ru

Natalia B. Platonova — PhD (Agriculture), Researcher, Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the RAS, Sochi, Krasnodar region, 354002, Russia; Scopus ID: 57191348192; <https://orcid.org/0000-0003-2392-8947>; natali1875@bk.ru

Viktoriya A. Kunina — PhD (Biology), Researcher, Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the RAS, Sochi, Krasnodar region, 354002, Russia; Scopus ID: 58188493500; <https://orcid.org/0009-0005-2640-4921>; kunina.v@internet.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2024
Одобрена после рецензирования 05.04.2024
Принята к печати 30.05.2024

The article was submitted to the editorial office 15.01.2024
Approved after review 05.04.2024
Accepted for publication 30.05.2024