

Интеллектуальная рекомендательная система для защиты яблоневых садов в КБР

А. З. Темроков¹, К. Ч. Бжихатлов^{✉2}

¹Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Одним из важных направлений сельского хозяйства является плодовое садоводство, в частности, интенсивные яблоневые сады вносят заметный вклад в сельскохозяйственную отрасль Кабардино-Балкарской Республики. При этом для сохранения урожая необходимо обеспечить своевременное выявление и устранение угроз, связанных с болезнями и вредителями яблок. Учитывая нехватку профильных специалистов, актуальной становится задача разработки автоматизированной системы распознавания болезней и вредителей яблоневых садов. Для этого в рамках исследования была поставлена цель – разработка и оценка применимости интеллектуальной рекомендательной системы для защиты яблоневых садов в КБР. В данной статье описана концепция и приведены результаты разработки системы контроля состояния яблоневых садов, предназначенной для выявления болезней и вредителей на деревьях, а также подбора наиболее подходящего плана защиты растений в зависимости от местоположения сада. Программа представляет собой веб-приложение, созданное на основе фреймворков FastAPI, Vue.js и нейронной сети, отвечающих за распознавание вредителей и болезней яблонь по фотографии и составление оптимального плана их обработки. Приведены результаты обучения нейронной сети на подготовленной выборке фотографий здоровых и зараженных яблок. В качестве основы для нейронной сети использовались различные модели: Roboflow 3.0, RF-DETR, YOLO v11 и YOLO v12. Разработанный сервис позволит диагностировать заболевания яблонь с минимальными задержками по времени, а также обеспечить подбор методов защиты в случае необходимости, что снизит риски потери урожая садоводами. В результате тестирования наилучших показателей достигла модель Roboflow 3.0: mAP составила 91,0 %, precision – 97,5 %, а recall – 88,5 %, что свидетельствует о применимости подхода, но этого недостаточно для внедрения. С целью повышения точности и расширения списка распознаваемых угроз планируется сбор дополнительных фотоматериалов в садах республики, в том числе фотографий листьев и стволов яблоневых деревьев, полученных в различных погодных условиях, и дальнейшее тестирование с участием садоводов республики.

Ключевые слова: распознавание образов, яблоня, заболевания яблок, рекомендательная система, машинное обучение, интернет-сервис

Поступила 10.03.2025, одобрена после рецензирования 07.04.2025, принята к публикации 09.04.2025

Для цитирования. Темроков А. З., Бжихатлов К. Ч. Интеллектуальная рекомендательная система для защиты яблоневых садов в КБР // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 23–36. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-23-36

Intelligent recommendation system for apple orchard protection in the Kabardino-Balkarian Republic

A.Z. Temrokov¹, K.Ch. Bzhikhatlov^{✉2}

¹Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street

²Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. One of the important areas of agriculture is fruit gardening, in particular, intensive apple orchards make a significant contribution to the agricultural sector of the Kabardino-Balkarian Republic. At the same time, to preserve the harvest, it is necessary to ensure timely detection and elimination of threats associated with apple diseases and pests. Given the shortage of specialized specialists, the task of developing an automated system for recognizing diseases and pests of apple orchards becomes urgent. For this purpose, the study set the goal of developing and assessing the applicability of an intelligent recommendation system for the protection of apple orchards in the KBR. This article describes the concept and presents the results of the development of a system for monitoring the condition of apple orchards, designed to identify diseases and pests on trees, as well as select the most appropriate plant protection plan depending on the location of the orchard. The program is a web application created on the basis of the FastAPI, Vue.js frameworks and a neural network, responsible for recognizing pests and diseases of apple trees from a photograph and drawing up an optimal plan for their treatment. The results of training a neural network on a prepared sample of photographs of healthy and infected apples are presented. Various models were used as a basis for the neural network: Roboflow 3.0, RF-DETR, YOLO v11 and YOLO v12. The developed service will allow diagnosing apple tree diseases with minimal time delays, as well as ensuring the selection of protection methods, if necessary, which will reduce the risks of crop loss by gardeners. As a result of testing the model, the Roboflow 3.0 model achieved the best indicators: mAP was 91.0%, precision 97.5%, and recall 88.5%, which indicates the applicability of the approach. In order to expand the list of recognizable threats and improve accuracy, it is planned to collect additional photographic materials in the republic's orchards, including photographs of leaves and trunks of apple trees, and further testing with the participation of gardeners of the republic.

Keywords: image recognition, apple tree, apple diseases, recommendation system, machine learning, internet service

Submitted 10.03.2025,

approved after reviewing 07.04.2025,

accepted for publication 09.04.2025

For citation. Temrokov A.Z., Bzhikhatlov K.Ch. Intelligent recommendation system for apple orchard protection in the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 23–36. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-23-36

ВВЕДЕНИЕ

В современном сельском хозяйстве одной из основных проблем является обеспечение защиты посевов от болезней и вредителей, в частности, эти факторы негативно сказываются как на объеме собираемого урожая в плодовых садах, так и на его качестве. При этом стоит отметить тренд на отток трудовых ресурсов в сельском хозяйстве [1], в результате чего сейчас наблюдается дефицит кадров в области защиты растений. Одним из способов решения перечисленных выше проблем выступает использование интеллектуальных систем в сельском хозяйстве [2, 3]. Учитывая значительную роль яблоневых садов в экономике Кабардино-Балкарской Республики [4], задача автоматизации агротехнических процессов, в частности своевременного определения вредителей и болезней, является

особенно актуальной. Среди основных болезней яблонь можно выделить паршу (*Venturia inaequalis*), мучнистую росу (*Podosphaera leucotricha*), монолиз (*Monilia fructigena*) и последствия бактериального ожога (*Erwinia amylovora*) [5, 6]. Стоит также отметить наличие проблем с рядом вредителей яблони [7, 8]: яблонная моль (*Hyponomeuta malinella*), кровавая тля (*Eriosoma lanigerum*), паутинный клещ (*Tetranychus urticae*) и яблонная плодожорка (*Cydia pomonella*). Внешние признаки основных болезней и вредителей яблонь, распространенных на территории КБР, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Внешние признаки болезней и вредителей яблонь

Table 1. External signs of apple tree diseases and pests

| Тип | Наименование болезни или вредителя | Внешние признаки |
|-----------|--|--|
| Болезни | Парша | Характеризуется появлением темных пятен на листьях, плодах и побегах |
| | Мучнистая роса | Характеризуется появлением белого порошка на плодах и листьях яблонь, вследствие чего листья могут закручиваться и осыпаться |
| | Монилиоз или плодовая гниль | Вызывает покраснение и усыхание листьев и гниение плодов |
| | Бактериальный ожог | Вызывает пожелтение и появление бурой или черной окраски на побегах и листьях |
| Вредители | Яблонная моль или листовертка | После вылупления личинки покрываются паутиной и начинают питаться листьями дерева, сворачивая их и создавая характерные узлы |
| | Кровавая тля | Вызывает увядание и покрытие липкой росой листьев яблони |
| | Паутинный клещ | Паутинные клещи покрывают нижнюю сторону листьев и плодов тонкими «паутинными» нитями |
| | Яблонная плодожорка или яблоневого червь | Гниение плодов яблони |

Существует ряд исследований, посвященных автоматизации процесса обнаружения болезней на яблонях. В работе [9] представлен обзор сверточных нейронных сетей в задачах обнаружения заболеваний растений на примере архитектур CNN, ResNet, DenseNet, MobileNet и EfficientNet. Все рассмотренные архитектуры показали достаточно высокий уровень точности распознавания (не менее 95 %). А в статье [10] приведены результаты анализа нейронных моделей классификации MLP (MultiLayer Perceptrons), RBF (Radial Basis Function) и DNN (Deep Neural Networks) для обнаружения болезней на изображениях яблонь. В работах [11, 12, 13, 14] рассматривались различные архитектуры нейронных сетей для распознавания болезней на изображениях листьев яблони (модели VGG16, ResNet50, SDINet). Результаты позволили распознавать различные заболевания по фото листьев с точностью 95 % и выше. А в [15] для распознавания степени поражения листьев грибом *Alternaria* использовалась интеграция двух нейронных сетей PSPNet (на базе модели MobileNet) и UNet (на базе VGG), что позволило добиться средней точности 96 %. В [16] для этой же задачи используется сеть с архитектурой Yolo, а в [17] описаны методы оптимизации гиперпараметров для данной модели нейронной сети.

Во всех представленных работах исследователи показали применимость нейронных сетей в задаче распознавания вредителей и болезней. Стоит отметить, что уже существует ряд промышленных решений, применимых для автоматизации защиты растений [18]. При этом, учитывая значительное влияние климатических условий и ландшафта на процесс роста и развития деревьев и протекание их заболеваний, наиболее эффективные решения должны строиться на использовании наборов данных для конкретного региона. В данной работе описана разработка сервиса распознавания болезней и подготовки рекомендаций на основе данных по болезням яблонь в Кабардино-Балкарской Республике.

АРХИТЕКТУРА ПРИЛОЖЕНИЯ

С целью обеспечения возможности быстрого определения болезни яблони и подбора рекомендаций по защите разрабатывается сервис контроля состояния яблоневых садов. Для удобства пользователя сервис реализован в виде веб-сайта, а также в виде бота для мессенджера «Telegram». Соответственно, пользователь может подключиться к сервису либо через веб-браузер, либо из приложения мессенджера. В обоих случаях на сервер передается фотография яблока, которая передается в нейронную сеть, обученную распознавать болезни яблोक. Далее результат ее работы передается в нейронную сеть, подбирающую рекомендации. Стоит отметить, что на сервере также есть база данных, хранящая все предыдущие запросы и рекомендации к ним, сгруппированные по садам пользователя. Архитектура разработанного сервиса приведена на рисунке 1 (сиреневые линии – передача изображения, оранжевые – передача промежуточных данных, зеленые – ответ пользователю с рекомендациями).

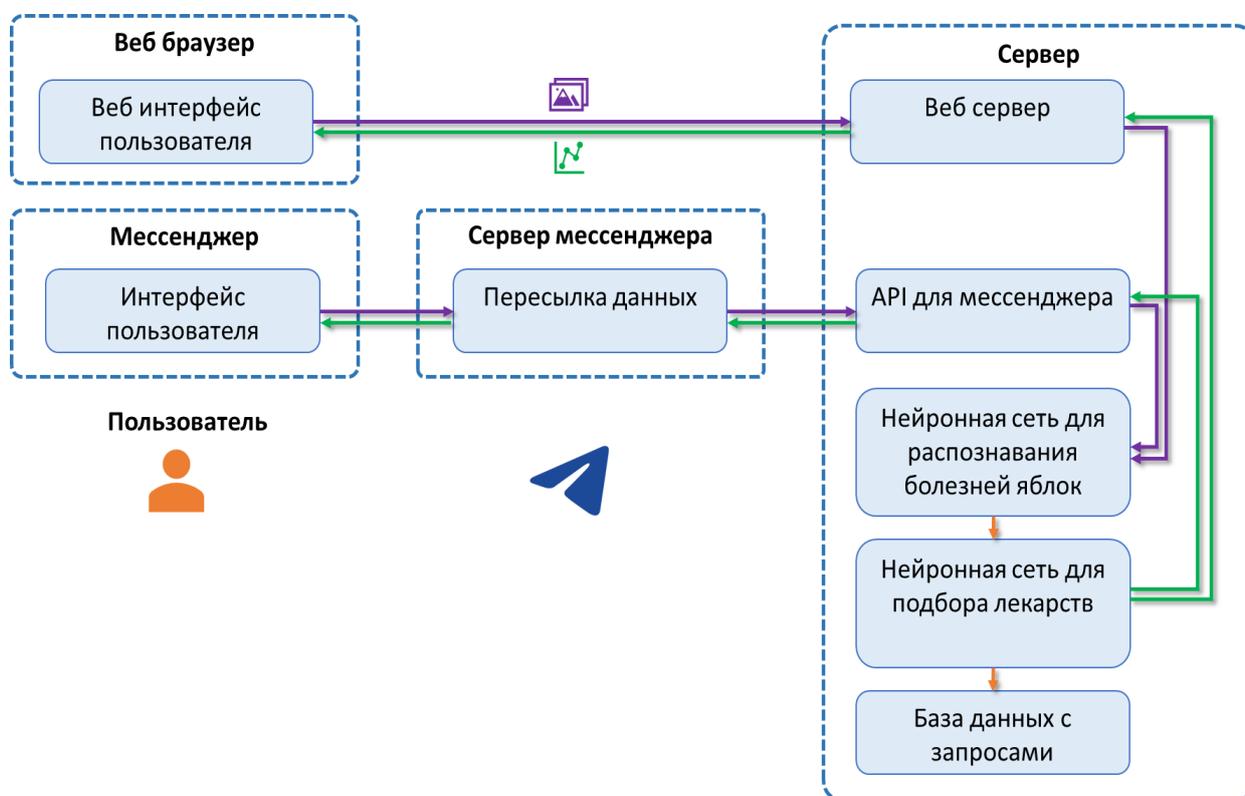


Рис. 1. Архитектура сервиса контроля состояния яблоневых садов

Fig. 1. Architecture of the apple orchard condition monitoring service

Разработанный веб-сервис представляет собой программу, написанную на языке программирования python с использованием FastAPI¹, который представляет собой высокоуровневый веб-фреймворк, что упрощает создание безопасных и масштабируемых веб-приложений. Клиентская часть сервиса использует Vue.js² – JavaScript-фреймворк для создания пользовательских интерфейсов. Отчет об обработке изображения формируется в формате PDF с использованием библиотеки PyPDF³. Внешний вид главной страницы приведен на рисунке 2. На нем доступны ссылки на личный кабинет пользователя и список садов, в основной части располагается приглашение к загрузке изображения. После загрузки изображения сервис сразу выводит результаты – описание болезни (при ее наличии) и рекомендации по защите. Эти данные можно выгрузить в виде pdf-файла. Для зарегистрированных пользователей доступно объединение набора изображений в сад, где ведется учет всех рекомендаций, полученных пользователем (рис. 3). Структура разработанного сайта и базы данных подробнее описаны в [19].

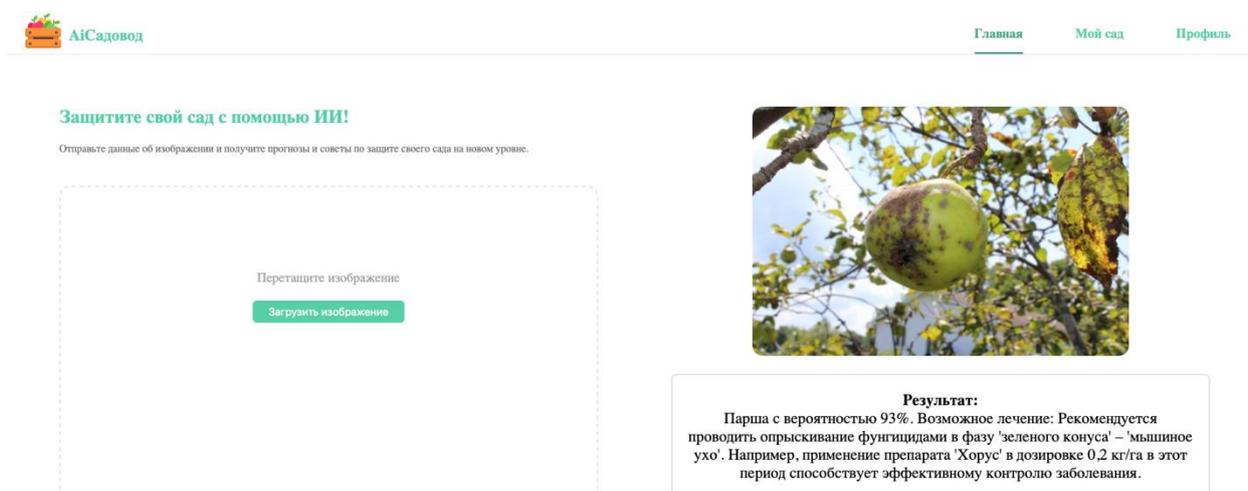


Рис. 2. Пользовательский интерфейс веб-приложения

Fig. 2. User interface of the web application

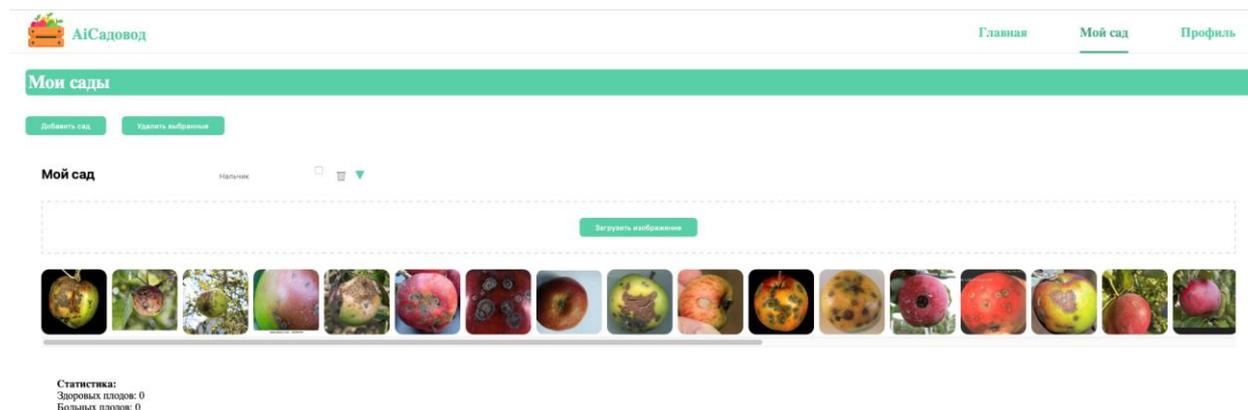


Рис. 3. Интерфейс сада пользователя

Fig. 3. User's garden interface

¹FastAPI documentation. URL: <https://fastapi.tiangolo.com>

²Vue.js documentation. URL: <https://vuejs.org>

³PyPDF documentation. URL: <https://pypdf.readthedocs.io>

В случае работы с мессенджером пользователь должен подключиться к нему и просто отправить изображение, в ответ придет рекомендация (рис. 4). Работа с мессенджером реализована с помощью библиотеки Aiogram⁴.

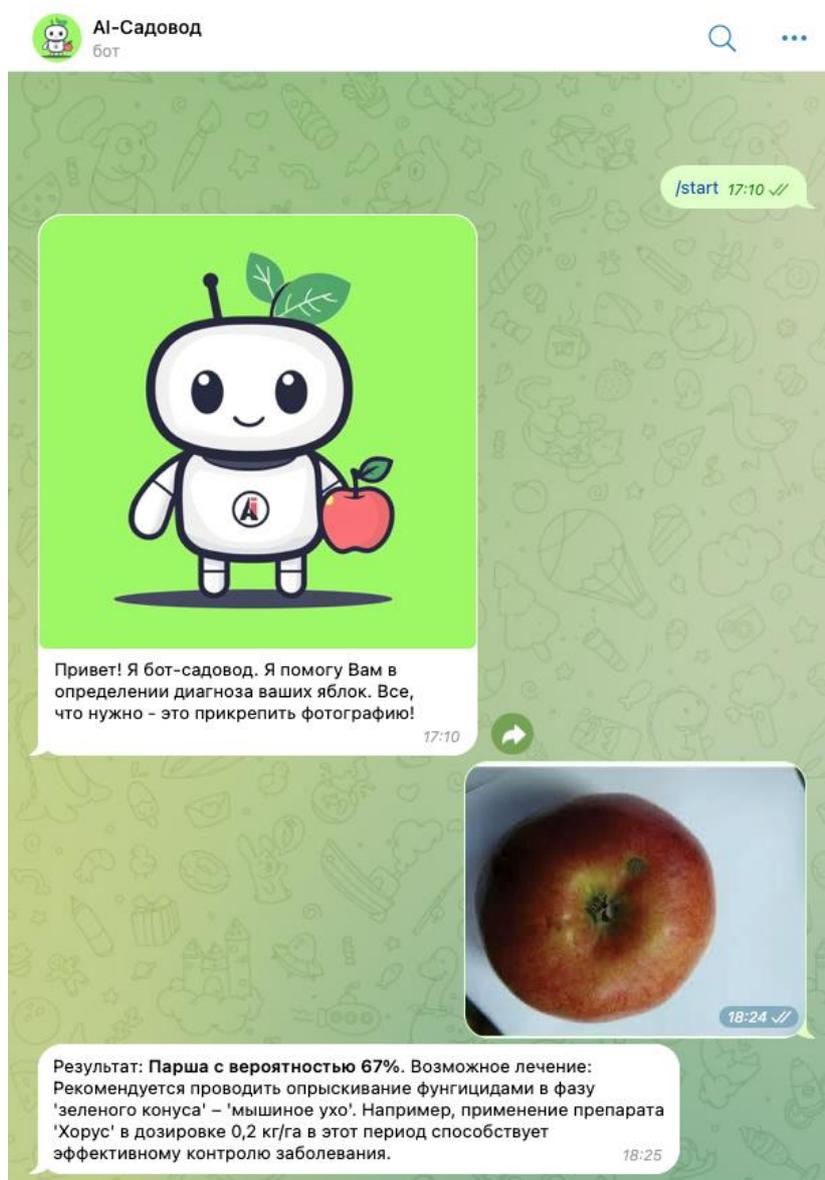


Рис. 4. Работа чат-бота в мессенджере «Telegram»

Fig. 4. Chatbot operation in the Telegram messenger

Подобное решение позволяет максимально упростить взаимодействие пользователя с сервисом. На данном этапе ведется работа по созданию чат-бота для других мессенджеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для обеспечения распознавания яблок рассматриваются различные архитектуры нейронных сетей, в частности, в работе использовался сервис Roboflow и доступные в нем модели нейронных сетей для распознавания изображений: Roboflow 3.0 (Fast), RF-DETR

⁴Aiogram documentation. URL: <https://docs.aiogram.dev>

(base), YOLO v11 и YOLO v12. Для обучения модели было собрано 1500 изображений яблок, деревьев и листьев, полученных за счет фотографий в садах республики и сбора данных из открытых источников. Все изображения были размечены и разделены на 8 классов: здоровые яблоки «healthy» (268 изображений), яблоки с признаками парши «scab» (285), гнилые «rot» (376), пораженные грибковыми заболеваниями «blotch» (252), признаки наличия тли «aphids» (433), цветоеда «flower eater» (122), яблоневой моли «apple moth» (71) и плодовой жоржки «fruit moth» (64). Стоит отметить, что в выборке были яблоки, имеющие признаки двух или трех заболеваний сразу, поэтому количество меток (1871) несколько больше количества изображений. Входной набор изображений имел значительный разброс в размерах и разную ориентацию. Для дальнейшего обучения все изображения автоматически ориентированы в альбомную ориентацию и приведены к размеру 640*640 пикселей. Для увеличения обучающей выборки использовались методы аугментации: поворот изображения на 90 градусов, сдвиг по горизонтали и вертикали и добавление шума, в результате чего количество изображений было увеличено до 3400. Стоит отметить, что полученный набор данных имеет некоторый дисбаланс в классах (явно не хватает изображений с признаками flower eater, apple moth и fruit moth), что может стать причиной низких значений точности распознавания. Пример изображения, используемого для обучения модели, показан на рисунке 5.



Рис. 5. Пример размеченного изображения из набора собранных данных

Fig. 5. Example of a labeled image from the collected dataset

Разметка данных, обучение моделей и их дальнейшее развертывание проводились на сервисе RoboFlow. Для каждой обученной модели определены основные метрики: mean Average Precision или mAP (усредненная точность по всем классам), precision (точность) и recall (полнота). Результаты обучения и тестирования для четырех созданных моделей приведены в таблице 2.

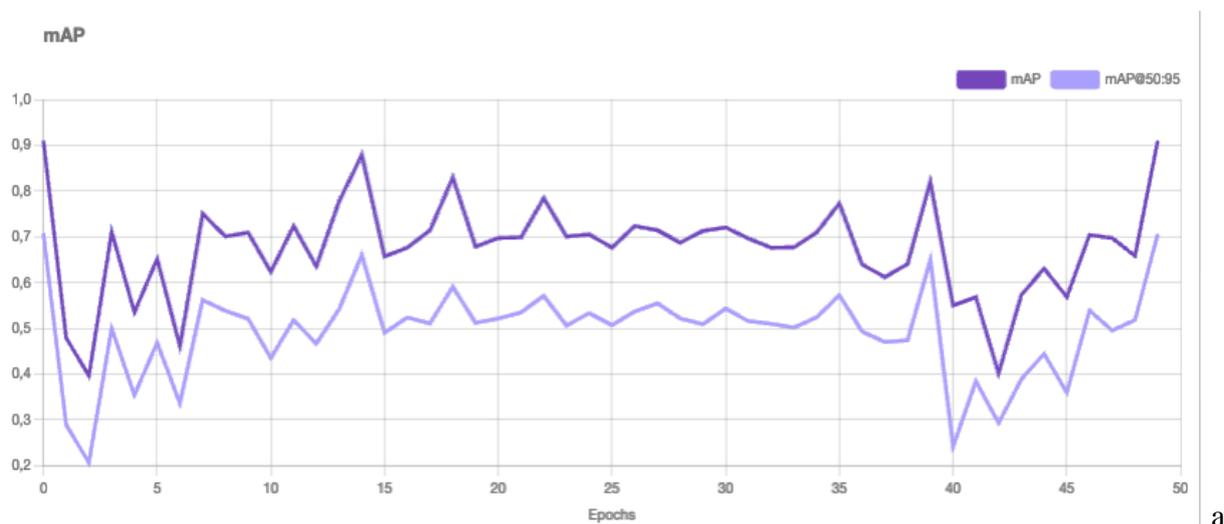
Таблица 2. Результаты обучения и тестирования моделей для распознавания болезней и вредителей на яблоках

Table 2. Results of training and testing models for recognizing diseases and pests on apples

| Модель | Архитектура | Метрики | | |
|---|--------------|---------|--------------|-----------|
| | | mAP, % | precision, % | recall, % |
| apple disease and pest detection ⁵ | Roboflow 3.0 | 91,0 | 97,5 | 88,5 |
| test detection yolov12 ⁶ | Yolo v12 | 82,8 | 82,7 | 75,9 |
| test detection yolov11 ⁷ | Yolo v11 | 86,1 | 86,3 | 81,0 |
| rf detection ⁸ | RF-DETR | 82,4 | 100 | 100 |

Полученные модели позволили определять заболевания и вредителей яблок, причем для моделей на базе архитектуры Yolo метрики достигли достаточно высоких показателей. Лучше всего в задаче распознавания болезней и вредителей яблок себя показала модель «test detection yolov12» на основе Roboflow 3 версии: mAP составила 91,0 %, precision – 97,5 %, а recall – 88,5 %. Подобные показатели позволяют говорить о положительном результате, но для внедрения такого сервиса требования значительно выше. Повышение точности возможно за счет сбора значительного объема фотоматериала в садах республики, причем полученных с различных ракурсов и в различных погодных условиях.

На рисунке 6 приведена зависимость метрики mAP от эпохи обучения каждой модели. Как видно из рисунка, для большинства моделей усредненная точность значительно колеблется, что, вероятно, свидетельствует о малом объеме обучающей выборки. Наиболее стабильный процесс обучения модели наблюдается для Yolo v12 (рисунок 6 б).



⁵Apple Disease & Pest Detection. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/apple_disease_-_pest_detection

⁶Test detection YOLOVv12. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/test_detection_yolov12

⁷Test detection YOLOVv11. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/test_detection_yolov11

⁸RF Detection. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/rf_detection

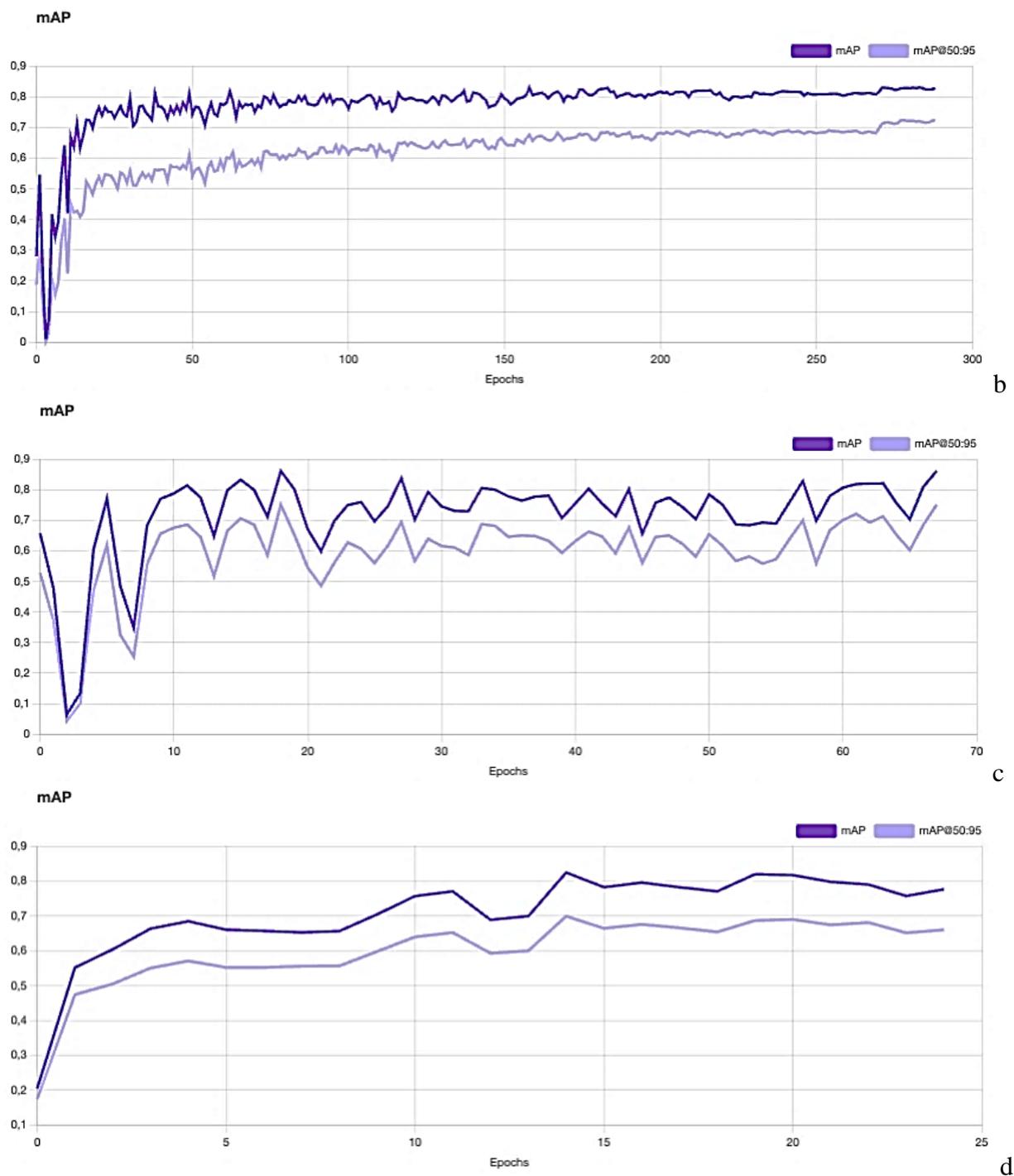


Рис. 6. Зависимость метрики *mAP* от эпохи обучения нейронной сети для моделей на базе Roboflow 3.0 (a), Yolo v12 (b), Yolo v11 (c) и RF-DETR (d)

Fig. 6. Dependence of the *mAP* metric on the neural network training epoch for models based on Roboflow 3.0 (a), Yolo v12 (b), Yolo v11 (c) and RF-DETR (d)

Результаты распознавания заболеваний и вредителей отправляются в другую нейронную сеть, которая подбирает методы защиты деревьев. Подбор рекомендаций основан на использовании библиотеки CatBoost classifier⁹, для дообучения которого необходим набор

⁹CatBoost documentation. URL: <https://catboost.ai/>

данных с указанием распознанного заболевания, расположения, погодных условий и даты фиксации заболевания, а в качестве выходных данных – наиболее эффективные меры защиты сада. Для сбора подобного массива данных необходимо обеспечить автоматическое распознавание болезней и вредителей яблок с помощью данной системы в течение нескольких сезонов. На данный момент в выборке существует лишь набор основных рекомендаций специалистов по болезням и вредителям яблок.

Для дальнейшего увеличения точности работы модели планируется расширение выборки за счет использования изображений, находящихся в широком доступе, а также изображений, собранных самостоятельно и отражающих заболевания и вредителей, характерных для Кабардино-Балкарской Республики. Кроме того, предполагается использование не только данных из изображения, но и информации об условиях в саду (широта, долгота, время года, температура, влажность, инсоляция, сумма активных температур и т.д.).

Как отмечалось выше, сейчас нейронная сеть для обработки изображений развернута на внешнем сервисе. Сейчас сервер отвечает за получение запросов от пользователей, их хранение и передачу изображений на внешнюю нейронную сеть, а также генерацию ответов пользователю. В такой реализации требования к серверу минимальные – скрипт занимает всего 135 Мб оперативной памяти. В процессе тестирования среднее время обработки одного изображения (при отправке с мобильного телефона со средней скоростью загрузки 50 Мбит/с и отправки 25 Мбит/с) составило 4,1 секунды. Дальнейшее развитие сервиса предполагает развертывание нейросети на собственном сервере и независимую работу в онлайн-режиме. В этом случае сервер должен отвечать следующим требованиям: CPU 4-ядерный процессор (Intel Core i5, AMD Ryzen 5 или выше), GPU с поддержкой технологии CUDA и 6 ГБ видеопамяти (NVIDIA GTX 1060 или выше), RAM 16 ГБ, SSD 256 ГБ. Пользователь должен обладать устойчивым интернет-соединением (минимум 10 Мбит/с). Локальное развертывание сервиса связано с рядом трудностей и, по нашему мнению, не является критичным, поскольку большая часть садов республики расположена в регионах со стабильной сотовой связью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный сервис позволит диагностировать заболевания яблонь с минимальными задержками по времени, а также обеспечить подбор методов защиты в случае необходимости. Это должно позволить снизить риски потери урожая садоводами Кабардино-Балкарской Республики. Тестирование программы показало применимость сервиса, в частности обеспечение распознавания базовых заболеваний, характерных для яблони, и выдачу рекомендаций по их защите (в том числе и в формате pdf-файла). Реализация сервиса в виде веб-приложения снимает необходимость портирования системы на различные платформы и максимально упрощает взаимодействие с системой. Применение чат-бота еще больше упрощает интерфейс пользователя.

В работе были обучены и протестированы четыре модели на базе архитектур Roboflow 3.0, Yolo v12, Yolo v11 и RF-DETR. Лучшие результаты показала модель на базе Roboflow 3.0 версии: mAP составила 91,0 %, precision – 97,5 %, а recall – 88,5 %. При этом, несмотря на точность распознавания выше 90 %, собранной выборки фотографий недостаточно для достижения применимости модели. На данном этапе планируется сбор дополнительных фотоматериалов в садах республики, полученных в разных погодных условиях и при разном освещении. А в дальнейшем – расширение выборки с учетом различных климатиче-

ских зон КБР и соседних республик, а также за счет охвата всех распространенных в регионе заболеваний и вредителей. Стоит отметить, что дальнейшее развитие сервиса позволит обеспечить его интеграцию с автономными робототехническими системами ухода за растениями [20], например, с автономным роботом по мониторингу и защите посевов [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов И. А.* Взаимосвязь воспроизводства кадров предприятий и трудовых ресурсов территорий: пример сельского хозяйства России // *Journal of New Economy*. 2021. Т. 22. № 3. С. 161–183. DOI: 10.29141/2658-5081-2021-22-3-9. EDN: FYAPLA
2. *Загазежева О. З., Край К. Ф.* Проблемы и перспективы внедрения роботизированных и интеллектуальных технологий в растениеводство // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021. № 6(104). С. 95–104. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-95-104. EDN: WXLZCP
3. *Yağ I., Altan A.* Artificial intelligence-based robust hybrid algorithm design and implementation for real-time detection of plant diseases in agricultural environments // *Biology*. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 1732. DOI: 10.3390/biology11121732
4. *Балаева С. И.* Состояние и перспективы развития интенсивного садоводства в Кабардино-Балкарской Республике // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова*. 2018. № 1(19). С. 66–70. EDN: YWALOH
5. *Turechek W. W.* Apple diseases and their management // In book: *Diseases of fruits and vegetables*. Vol. 1. Eds: Naqvi S.A.M.H. Dordrecht: Springer. 2004. DOI: 10.1007/1-4020-2606-4_1
6. *Каширская Н. Я., Цуканова Е. М., Каширская А. М.* Защита яблони от вредителей и болезней // *Защита и карантин растений*. 2010. № 5. С. 34–35. EDN: MBCNMJ
7. *Хуламханов И. М.* Влияние климатических факторов на массовый лет яблонной плодовой гнили (*Laspeyresia pomonella L.*) в Кабардино-Балкарской Республике // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2013. № 6-1(56). С. 133–137. EDN: RPXLWV
8. *Jashenko R., Tanabekova G., Lu Z.* Assessment of biological and ecological characteristics of sievers apple tree pests in Trans-Ili Alatau, Kazakhstan // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 14. P. 11303. DOI: 10.3390/su151411303
9. *Шереужева М. А., Шереушев М. А., Альбекова З. М.* Использование сверточных нейронных сетей для задач автоматического обнаружения заболеваний // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023. № 5(115). С. 41–51. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-41-51. EDN: GOUNQN
10. *Boniecki P., Zaborowicz M., Pilarska A.A., Piekarska-Boniecka H.* Identification process of selected graphic features apple tree pests by neural models type MLP, RBF and DNN // *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 6. Pp. 218–227. DOI: 10.3390/agriculture10060218
11. *Qian Y., Yang B., Wang W. et al.* Apple leaf diseases recognition based on an improved convolutional neural network // *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 12. P. 3535. DOI: 10.3390/s20123535
12. *Yu H., Cheng X., Chen C., Heidari A. A. et al.* Apple leaf disease recognition method with improved residual network // *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 7759–7782. DOI: 10.1007/s11042-022-11915-2
13. *Luo Y., Sun J., Shen J. et al.* Apple leaf disease recognition and sub-class categorization based on improved multi-scale Feature Fusion Network // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 95517–95527. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094802
14. *Zhang S., Wang D., Yu C.* Apple leaf disease recognition method based on Siamese dilated Inception network with less training samples // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. P. 108188. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108188

15. Liu B., Fan K., Su W., Peng Y. Two-stage convolutional neural networks for diagnosing the severity of alternaria leaf blotch disease of the apple tree // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 11. P. 2519. DOI: 10.3390/rs14112519
16. Кутырëв А. И. Распознавание и классификация болезней листьев яблони на основе анализа их изображений моделями сверточных нейронных сетей (CNN) // *Вестник Ульяновской ГСХА*. 2023. № 3(63). С. 215–223. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-215-223
17. Lee Y., Patil M. P., Kim J. G. et al. Hyperparameter optimization of apple leaf dataset for the disease recognition based on the YOLOv8 // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025. Vol. 21. No. 9. P. 101840. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101840
18. Канокова М. А. Анализ эффективности применения программных и робототехнических комплексов для защиты посадок сельскохозяйственных культур от болезней, вредителей и сорной растительности // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021. № 6(104). С. 126–136. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-126-136
19. Темроков А. З., Тебуев М. Р., Бжухатлов К. Ч. Концепция системы прогнозирования состояния яблоневых садов // *Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Цифровая трансформация науки и образования» с международным участием*. Нальчик, 2024. С. 102–110. EDN: CSTJRH
20. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. Сравнительный анализ роботов для сбора яблок // *Вестник НГИЭИ*. 2024. № 10(161). С. 33–51. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-10-33-51. EDN: YHIYRS
21. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot // *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. Vol. 362. Pp. 269–278. DOI: 10.1007/978-981-99-4165-0_25

REFERENCES

1. Borisov I.A. The relationship between the reproduction of personnel of enterprises and labor resources of territories: the example of Russian agriculture. *Journal of New Economy*. 2021. Vol. 22. No. 3. Pp. 161–183. DOI: 10.29141/2658-5081-2021-22-3-9. EDN: FYAPLA. (In Russian)
2. Zagazezheva O.Z., Krai K.F. Problems and prospects for the introduction of robotic and intelligent technologies in plant growing. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021. No. 6(104). Pp. 95–104. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-95-104. EDN: WXLZCP. (In Russian)
3. Yağ I., Altan A. Artificial intelligence-based robust hybrid algorithm design and implementation for real-time detection of plant diseases in agricultural environments. *Biology*. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 1732. DOI: 10.3390/biology11121732
4. Balaeva S.I. Status and prospects for the development of intensive gardening in the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2018. No. 1(19). Pp. 66–70. EDN: YWALOH. (In Russian)
5. Turechek W.W. Apple diseases and their management. In book: *Diseases of fruits and vegetables*. Vol. 1. Eds: Naqvi S.A.M.H. Dordrecht: Springer. 2004. DOI: 10.1007/1-4020-2606-4_1
6. Kashirskaya N.Ya., Tsukanova E.M., Kashirskaya A.M. Protection of apple trees from pests and diseases. *Zashchita i karantin rasteniy* [Protection and quarantine of plants]. 2010. No. 5. Pp. 34–35. EDN: MBCNMJ. (In Russian)
7. Khulamkhanov I.M. The influence of climatic factors on the mass flight of the codling moth (*Laspeyresia pomonella* L.) in the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 6-1 (56). Pp. 133–137. EDN: RPXLWV. (In Russian)

8. Jashenko R., Tanabekova G., Lu Z. Assessment of Biological and Ecological Characteristics of Sievers Apple Tree Pests in Trans-Ili Alatau, Kazakhstan. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 14. P. 11303. DOI: 10.3390/su151411303

9. Shereuzheva M.A., Shereuzhev M.A., Albekova Z.M. The use of convolutional neural networks for automatic diseases detection tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 5(115). Pp. 41–51. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-41-51. EDN: GOUNQN. (In Russian)

10. Boniecki P., Zaborowicz M., Pilarska A.A., Piekarska-Boniecka H. Identification Process of Selected Graphic Features Apple Tree Pests by Neural Models Type MLP, RBF and DNN. *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 6. Pp. 218–227. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10060218>

11. Qian Y., Yang B., Wang W. et al. Apple Leaf Diseases Recognition Based on An Improved Convolutional Neural Network. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 12. P. 3535. DOI: 10.3390/s20123535

12. Yu H., Cheng X., Chen C., Heidari A.A. et al. Apple leaf disease recognition method with improved residual network. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 7759–7782. DOI: 10.1007/s11042-022-11915-2

13. Luo Y., Sun J., Shen J. et al. Apple Leaf Disease Recognition and Sub-Class Categorization Based on Improved Multi-Scale Feature Fusion Network. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 95517–95527. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094802

14. Zhang S., Wang D., Yu C. Apple leaf disease recognition method based on Siamese dilated Inception network with less training samples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. P. 108188. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108188

15. Liu B., Fan K., Su W., Peng Y. Two-Stage Convolutional Neural Networks for Diagnosing the Severity of Alternaria Leaf Blotch Disease of the Apple Tree. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 11. P. 2519. DOI: 10.3390/rs14112519

16. Kutyrev A.I. Recognition and classification of apple leaf diseases based on the analysis of their images by convolutional neural network (CNN) models. *Vestnik Ul'yanovskoy GSKHA [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy]*. 2023. No. 3(63). Pp. 215–223. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-215-223. (In Russian)

17. Lee Y., Patil M. P., Kim J. G. et al. Hyperparameter optimization of apple leaf dataset for the disease recognition based on the YOLOv8. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025. Vol. 21. No. 9. P. 101840. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101840

18. Kanokova M.A. Analysis of the effectiveness of the use of software and robotic systems for the protection of agricultural crops from diseases, pests and weeds. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021. No. 6(104). Pp. 126–136. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-126-136. (In Russian)

19. Temrokov A.Z., Tebuev M.R., Bzhikhatlov K.Ch. Concept of a system for forecasting the state of apple orchards. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya» s mezhdunarodnym uchastiyem*. [Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference “Digital transformation of science and education” with international participation]. Nalchik, 2024. Pp. 102–110. EDN: CSTJRH. (In Russian)

20. Kafiev I.R., Romanov P.S., Romanova I.P. Comparative analysis of robots for apple picking. *Vestnik NGIEI [Bulletin NGIEI]*. 2024. № 10(161). Pp. 33–51. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-10-33-51. EDN: YHIYRS. (In Russian)

21. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot. *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. Vol. 362. Pp. 269–278. DOI: 10.1007/978-981-99-4165-0_25

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was conducted without sponsorship.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Темроков Айдемир Залимханович, магистрант 2-го года обучения направления «Информатика и вычислительная техника», Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова; 360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;

temrokovaydemir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2272-475X>, SPIN-код: 4961-2069

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН; 360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-код: 9551-5494

Information about the authors

Aidemir Z. Temrokov, 2nd year Student in the field of Informatics and Computer Science, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

temrokovaydemir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2272-475X>, SPIN-code: 4961-2069

Kantemir Ch. Bzhikhatlov, Candidate of Physics and Mathematics sciences, Head of the Laboratory of Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-code: 9551-5494