

УДК 633.11:632.938

DOI 10.18286/1816-4501-2021-2-109-120

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЖАВЧИНЫ ПШЕНИЦЫ С ПОМОЩЬЮ
ФИТОПАТОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО
ЗРЕНИЯ**

Волкова Галина Владимировна¹, доктор биологических наук, заведующая лабораторией иммунитета зерновых культур к грибным болезням

Ариничева Ирина Владимировна², доктор биологических наук, профессор кафедры высшей математики

Ариничев Игорь Владимирович³, кандидат экономических наук, доцент кафедры теоретической экономики

Матвеева Ирина Петровна¹, научный сотрудник лаборатории иммунитета зерновых культур к грибным болезням

Ким Юрий Сергеевич¹, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории иммунитета зерновых культур к грибным болезням

¹ФГБНУ Федеральный научный центр биологической защиты растений 350039, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, п/о 39; тел.: 89183747678; e-mail: galvol.bpp@yandex.ru

²ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет, 350004, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; тел. 89184428703; e-mail: loukianova7@mail.ru

³ФГБОУ ВО Кубанский государственный университет, 350040, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: iarinichev@gmail.com

Ключевые слова: болезни пшеницы, желтая ржавчина, бурая ржавчина, стеблевая ржавчина, фитосанитарный мониторинг, диагностика, компьютерное зрение.

Пшеница – наиболее экономически важная и ценная продовольственная культура, возделываемая в большинстве регионов мира, значительное влияние на показатели урожайности которой оказывают различные заболевания. Особенное внимание в технологиях защиты пшеницы от фитопатогенов уделяют ржавчинам, поскольку потери урожая, в зависимости от погодных условий сезона и устойчивости высеваемых сортов, могут составить от 30 до 100 %. В статье приведены краткие сведения о ржавчинных заболеваниях пшеницы (желтая, бурая, стеблевая ржавчина), а также о существующих в настоящее время методах их идентификации. Точная и своевременная идентификация возбудителей ржавчины является ключевым этапом при принятии решений о применении средств защиты растений в борьбе с заболеваниями, что позволяет предотвратить дальнейшее их развитие, распространение и возникновение эпифитотий. В статье описан основной метод идентификации и дальнейшего учета желтой, бурой, стеблевой ржавчины – это классическое фитопатологическое исследование, основанное на использовании человеческого ресурса. Достоинством данного метода является точность и универсальность. Среди недостатков следует выделить трудоемкость и потребность в штате квалифицированных специалистов-фитопатологов. Ввиду интенсивного развития компьютерных технологий и цифровизации сельского хозяйства все больший научный и практический интерес приобретает использование машинного зрения, основанного на программировании нейросетей и их обучению идентификации основных возбудителей болезней. Представлен перспективный методический подход идентификации фитопатогенов при проведении фитосанитарного мониторинга и алгоритмы, используемые для обучения нейросетей и применяемые в технологиях машинного зрения.

Исследования проведены при поддержке Кубанского научного фонда, проект №МФИ-20.1/75

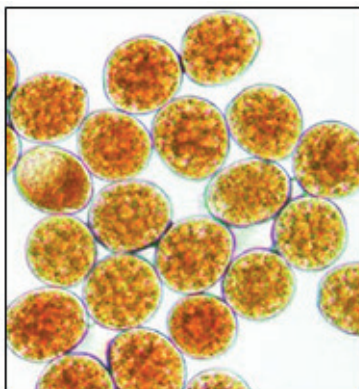


Рис. 1 - Урединиоспоры (слева) с урединиопустулами (справа) желтой ржавчины на пшенице, фаза всходов (ориг.)



Рис. 2 - Листья пшеницы, пораженные желтой ржавчиной: а) урединиопустулы (ориг.); б) урединиопустулы и телеиопустулы [46]



Рис. 3 – Начальная стадия поражения бурой ржавчиной, фаза всходов (ориг.)

Введение

Фитосанитарное состояние агробиоценозов – динамическая изменяющаяся система. Для обоснования проведения своевременных эффективных защитных мероприятий необходим непрерывный мониторинг развития и распространения вредных объектов. Эффективный фитосанитарный мониторинг состоит из четырех элементов: идентификации, систематического наблюдения, прогноза, мероприятий по регулированию вредных объектов [1].

Наибольшее распространение в мировом земледелии получили зерновые культуры, среди которых доля посевных площадей, занимаемая пшеницей, составляет 230 млн. га [2]. 30 % этой площади заняты озимыми формами. В мире крупнейшими странами -производителями зерна являются КНР, Индия, США, Канада [2]. В мировом рейтинге страны СНГ суммарно занимают первое место по посевным площадям и валовым сборам пшеницы [3]. В Российской Федерации посевная площадь пшеницы составляет 25 млн. га, семь из которых занимает озимая пшеница. Краснодарский край – один из крупнейших лидеров по производству зерна, посевные площади составляют 1,3-1,4 млн. га [3].

Одним из важнейших биотических факторов, влияющих на урожайность культуры, являются возбудители заболеваний. В патоккомплексе пшеницы Краснодарского края среди листовых болезней преобладают ржавчины: желтая (*Puccinia striiformis* sp. *tritici* West.), бурая (*Puccinia triticina* sp. *tritici* Erikss.), стеблевая (*Puccinia graminis* sp. *tritici* Pers.) [4].

При идентификации конкретного вида ржавчины нередко возникают трудности, связанные со схожестью в проявлениях заболеваний (например, бурая и стеблевая ржавчина), особенно на ранних стадиях. Качественная диагностика патогена невозможна без знания биологии развития и симптоматики возбудителя болезни.

Желтая ржавчина пшеницы

(*P. striiformis*) проявляется на влагилицах и листьях зерновых. Иногда признаки заболевания обнаруживаются на стеблях, осях, колосовых чешуйках и на выступающих частях зерна [5]. Заражение в осенний период, успешная перезимовка в период мягких зим и развитие в течение вегетационного сезона приводят к поражению растений на 70-100 % и потерям урожая до 40-60 %. Зерно формируется щуплым, теряет ценность, снижается энергия прорастания и дружность всходов [6]. В фазу всходов заболевание проявляется в виде размытых хлорозов, расположенных вдоль жилок листа. Позднее на них формируются желтые урединиопустулы с урединиоспорами (рис. 1), расположенные в хаотичном порядке на всей поверхности листовой пластинки.

На взрослых растениях пшеницы пустулы проявляются в виде вытянутых строчек. В период неблагоприятных условий на месте урединиопустул появляются черные телейтопустулы – зимующая стадия сохранения гриба (рис. 2) [4,7].

Прорастание урединиоспор наблюдается при высокой относительной влажности (100 %) и температуре от + 1°C до + 25°C. Оптимальные условия для развития возбудителя +11+13°C[5] или +10+16°C[8]. Сначала появляется нитевидный росток, он проникает в ткани растений и впоследствии развивается в урединиогрибницу. Инкубационный период заражения при температуре +10+15°C длится 10–11 дней [5].

Бурая ржавчина пшеницы (*P. triticina*) поражает листовые пластинки и листовые влагилица растений. Вначале, преимущественно на верхней стороне листьев, появляются рассеянно (иногда кольцеобразно) ржаво-бурые овальные урединиопустулы длиной 1-2 мм и шириной 0,5 мм (рис. 3).

На растениях сортов с повышенной реакцией вокруг уредопустул образуются хлоротические и некротические пятна. Урединиоспоры (20 мкм) образуют выпуклые, округлые или яйцевидные оранжево-коричневые урединиопустулы (до 1,5 мм в диаметре), которые разбросаны как на верхней, так и на нижней поверхности листьев пшеницы (рис. 4).

Полностью восприимчивые сорта пшеницы имеют большие урединии, не вызывая хлороза или некроза в тканях хозяина. Устойчивые сорта пшеницы характеризуются различной ре-

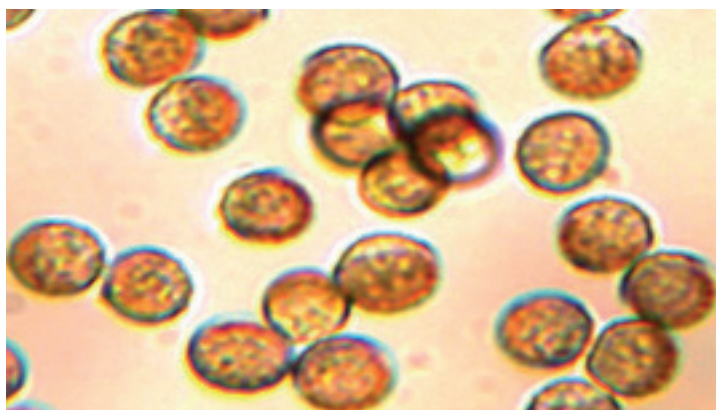


Рис. 4 - Бурая ржавчина пшеницы, внешний вид спор под микроскопом (ориг.)



Рис.5 - Листовая пластинка, покрытая пустулами бурой ржавчины (ориг.)



Рис. 6 - Внешний вид урединиоспор стеблевой ржавчины пшеницы (ориг.)



Рис. 7 - Урединиопустулы стеблевой ржавчины пшеницы: на листовой пластинке в фазу всходов (слева) и на стебле взрослого растения (справа) (ориг.)

акцией - от маленьких гиперчувствительных пятнышек до урединий малого и среднего размера, которые могут быть окружены хлоротичными и / или некротическими зонами [9,10]. При сильном поражении растений почти вся листовая пластинка покрывается уредопустулами (рис.5), что приводит к скручиванию листьев и их быстрому усыханию [9].

Возбудитель листовой ржавчины на территории России зимует, главным образом, в виде урединиомицелия в листьях озимой пшеницы и дикорастущих злаков. Образующиеся рано весной на озимой пшенице урединиоспоры при наличии капельной влаги прорастают и заражают здоровые растения [11].

Стеблевая ржавчина пшеницы (Puccinia graminis) поражает преимущественно стебли и листовые влагалища, реже части колоса и листья. Признаки болезни на злаках появляются после цветения, иногда осенью, на всходах озимых посевов ее можно обнаружить весной [8].

В летнее время на стеблях злаков проявляются порошащие подушечки продолговатой формы ржаво-бурого цвета – урединиопустулы. Урединиоспоры продолговатые, эллиптической формы. Размеры варьируют 20,0–42,0х14,0–22,0 мкм. Оболочка с шипиками, желтая [5] (рис.6).

Овальные пустулы (урединии) с порошкообразными урединиоспорами кирпично-красного цвета прорываются через эпидермис. Под микроскопом споры покрыты тонкими шипами. Это скопления одноклеточных урединиоспор. Подушечки сливаются, в результате чего образуются продольные линии. Пустулы могут быть многочисленными и образовываться как на поверхности листьев, так и на стеблях растения-хозяина (рис. 7).

заяина (рис. 7).

Урединиомицелий формируется в местах внедрения эцидиоспоры. Для прорастания урединиоспоры нужна капельно-жидкая влага и температура от +1 до + 30 °С. Оптимум лежит в пределах +18+ 20 °С. За период вегетации растения-хозяина гриб способен дать несколько поколений [5].

Позднее у инфицированных растений начинают появляться черные телиопустулы[12]. Телиопустулы образуются в конце вегетации в местах развития урединий. Зимуют в растительных остатках. Прорастают весной при температуре от +9 29°С, оптимально +18+ 22 °С при влажности 95 – 100 % [5].

Причина высокого развития заболеваний заключается в биологических особенностях фитопатогенов, благоприятных условиях для их развития, нарушении системы севооборота, с целью посева культуры, более востребованной на рынке. Общая тенденция перенасыщения севооборотов зерновыми культурами, приводит к значительному ухудшению фитосанитарной обстановки [13,14]. Потери урожая от листовых болезней, возбудителями которых являются грибы, могут достигать в эпифитотийно благоприятные годы 65 % и более [15,16].

Проблемы идентификации и мониторинга в целом возможно решить с помощью цифровых технологий, которые востребованы в современном земледелии. Так в Указе Президента Российской Федерации (№ 204 от 07.05.2018) выделено отдельное направление «Цифровая экономика», в рамках которого предусмотрено: создание сквозных цифровых технологий преимущественно на основе отечественных разработок; преобразование приоритетных отраслей экономики, включая образование и сельское хозяйство, посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений[17].

Успех мониторинга возбудителей болезней зерновых культур во многом зависит от правильной идентификации фитопатогенов, поэтому используются как традиционные методы, так и современные подходы и технологии.

Традиционные методы идентификации ржавчин пшеницы включают в себя визуальную диагностику заболевания по симптомам и морфологии возбудителя, микроскопическое исследование, а также сравнительно новый подход – молекулярно-генетическую диагностику с использованием ПЦР-анализа.

По мнению Рязанцева Д. Ю. [18], традиционные методы диагностики не всегда эффек-

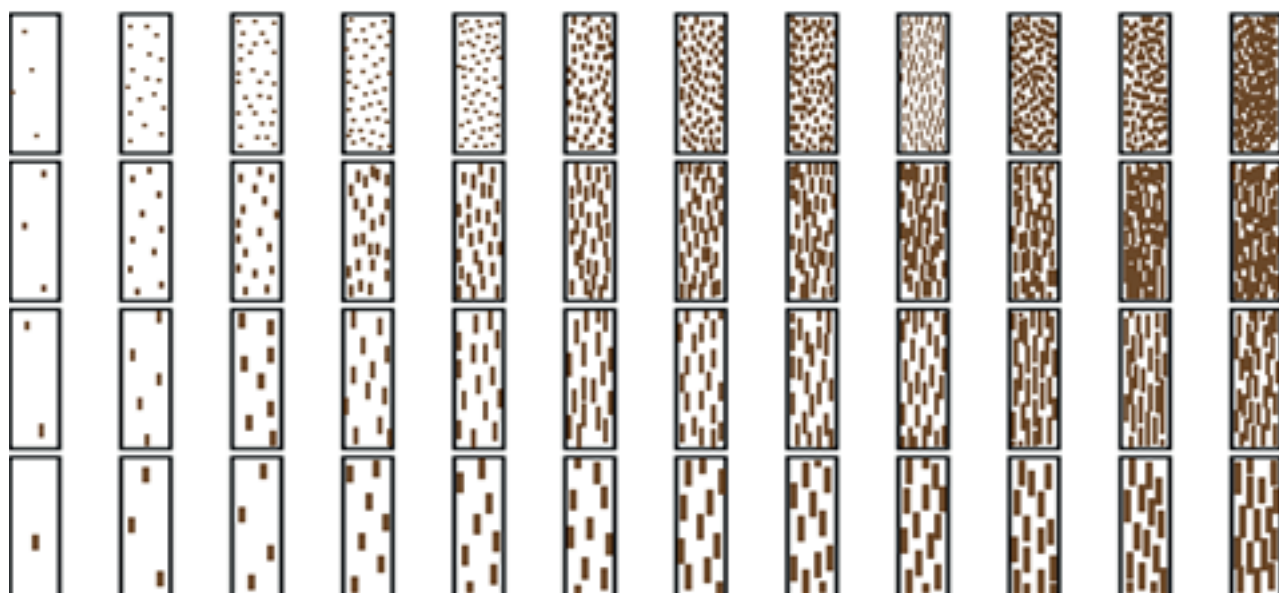


Рис. 8 – Шкала Петрсона, Кэмпбелла и Ханна для учета пораженности зерновых культур видами ржавчины [22].

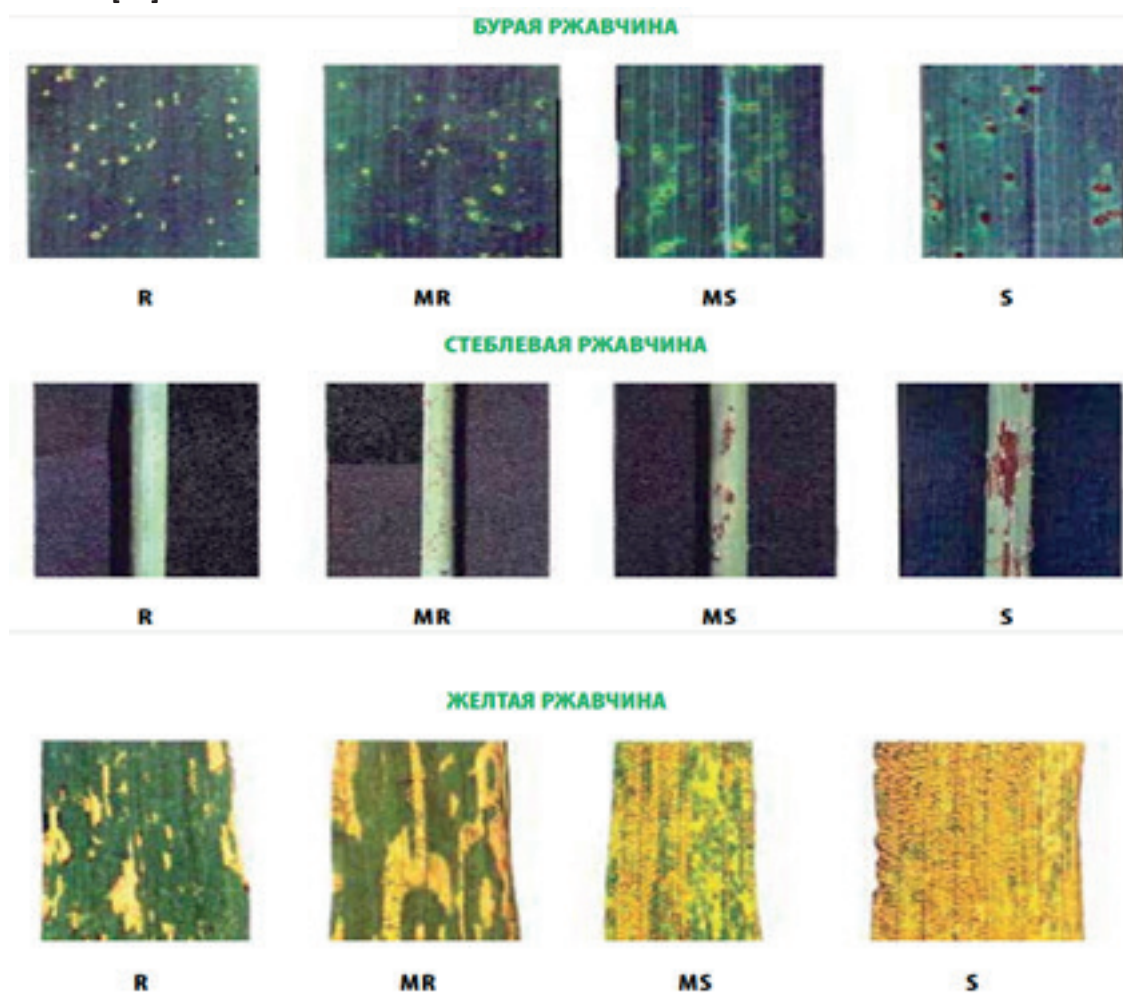


Рис. 9 - Шкала для оценки устойчивости зерновых культур к бурой, стеблевой и желтой ржавчине (СИММУТ) [22]

тивны. Например, методы ИФА и ПЦР достаточно точны, но требовательны к квалификации кадров и финансовым возможностям сельхозпроизводителя. В то время, как перспективный метод иммунохроматографии относительно прост в использовании, но отличается высокой погрешностью к некоторым патогенам [19]. В полевых условиях используют классические методы идентификации возбудителей болезней путем визуального осмотра пораженных растений [20].

При проведении полевых обследований пользуются общепринятыми методиками Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ФГБНУ ВИЗР) и рекомендациями международной организации СИММУТ [21,22]. На каждой опытной делянке просматривают 30 растений, устанавливают процент и степень поражения. Степень поражения листьев (междоузлий) для бурой и стеблевой ржавчины определяют по шкале Петрсона, Кэмпбелла и Ханна (рис. 8). Шкалу СИММУТ используют для ранжирования сортов по степени устойчивости (рис. 9).

Учеты всех видов ржавчин ведут по главному стеблю растения, учитывая уровень поражения каждого листа междоузлия, начиная сверху. Листья, высохшие более чем на $\frac{3}{4}$, не учитывают. На основе полученных данных рассчитывают распространенность и развитие болезней.

Как было отмечено выше, одним из этапов обнаружения болезней на различных сельскохозяйственных культурах остается предварительный визуальный анализ. До того, как отправить образцы в лабораторию, опытный фитопатолог пытается установить внешние симптомы болезни, степень ее развития и распространенность. Этот этап исследования крайне важен, и именно он обладает огромным потенциалом для автоматизации вплоть до полного исключения экспертов-людей и замены их автоматизированными алгоритмами определения требуемых дефектов на растениях [23,24].

Основным инструментом подобной автоматизации в настоящее время является компьютерное зрение - комплекс автоматических и полуавтоматических подходов, основанных на интеллектуальной обработке изображений [25,26]. До недавнего времени здесь широко использовалось так называемое классическое компьютерное зрение, в последние же годы оно уступило место современному, основанному на нейросетевых архитектурах [27,28,29,30]. В ос-

нове нейросетевого подхода к детекции болезней растений лежит довольно простая идея приблизить работу компьютера с изображением к тому, как это делает человеческий глаз. Зрение человека и животных в общих чертах работает следующим образом: когда человек пытается классифицировать объект, находящийся перед ним, он последовательно фокусируется на отдельных частях объекта и сравнивает их с формами, имеющимися в его памяти, причем делает это от более мелких частей к более крупным. Именно этот процесс имитируют сверточные нейронные сети, берущие свое начало с революционной работы LeCun [31]. В последующих работах эти идеи были существенно развиты и в последнее десятилетие сверточные нейронные сети уверенно удерживают лидерство как в соревнованиях по детекции изображений, так и в конкретных прикладных задачах. Качество классификации, которое обеспечивают в настоящее время нейросети, вполне сравнимо с человеческим, а в ряде случаев даже превосходит его.

Особо стоит отметить несколько нейросетевых архитектур, явившихся своеобразными вехами в истории развития этого подхода и которые применяются в настоящей работе для выделения областей поражения риса грибными болезнями. После работы LeCun [31] следующим серьезным прорывом стала архитектура AlexNet. Она примечательна тем, что в 2012 году достигла порога в 84,6 % в задаче о классификации 1.2 М изображений на 1000 различных классов, что является весьма впечатляющим результатом [32]. В 2013 году авторы (He и др., 2016) существенно увеличили вычислительные мощности и изменили архитектуру сети на более тяжеловесную - VGG, достигнув при этом порога качества в 92,7 %, что уже вполне сравнимо с порогом качества человеческого глаза. Далее специалисты задались вопросом, нельзя ли уменьшить модель без потери ее качества. Оказалось, что используя более продуманную модель, объем требуемой для ее хранения памяти можно уменьшить более чем в 20 раз, а качество при этом даже возрастет. В 2014 году была представлена модель GoogLeNetInception, показавшая качество 93,3 % [33] и имевшая всего 6М параметров, вместо 138М у VGG. Последующие улучшения - ResNet [33], SqueezeNet [34] и DenseNet [35] позволили поднять качество классификации до 96,43 %.

Основным достоинством описанных выше моделей является их универсальность, определяемая их архитектурой. Они не могут напря-

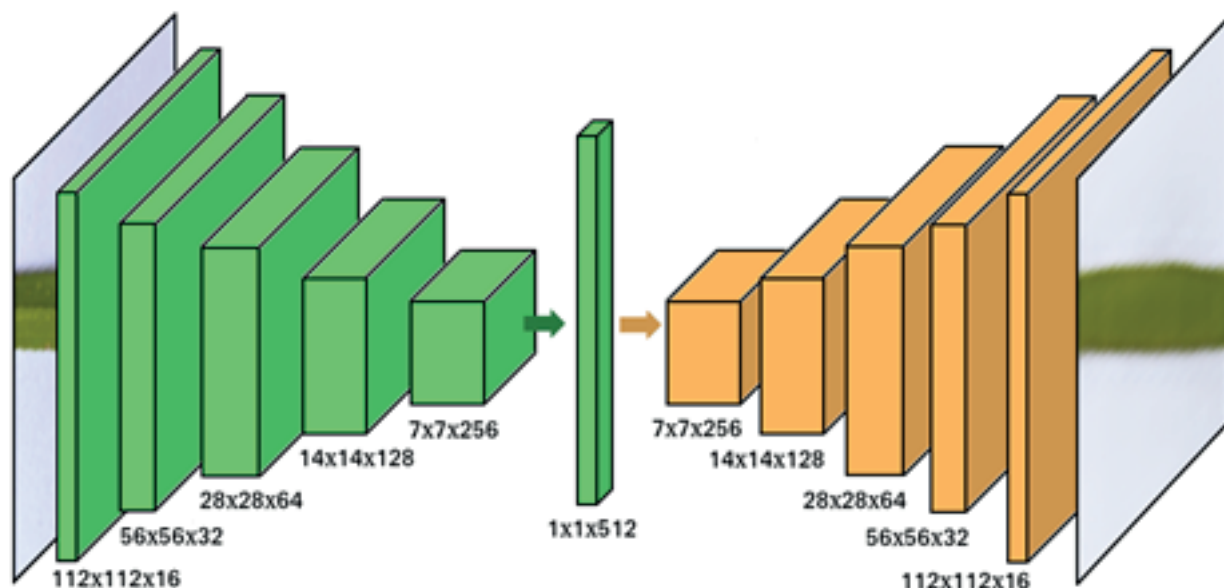


Рис. 10 - Архитектура работы автоэнкодера

мую быть использованы для классификации болезней растений, так как они были обучены для других задач, но их вполне можно обучить под требуемую задачу, показав достаточное количество примеров - изображений здоровых и больных растений. Чем большее количество изображений предъявлено модели, тем точнее будут ее предсказания в будущем. В работах Liu и др. [36], Phadikar и др. [37], Wu и др. [34], GayathriDevi[38] указывается на то, что этап сбора достаточного количества качественных изображений является крайне важным и фактически определяет успех или неудачу решения задачи детекции болезней различных сельскохозяйственных культур. Так, например, если изображения сильно зашумлены, сделаны при недостаточном/избыточном освещении, то это существенно ухудшит общее качество итоговой модели.

Отдельное место среди современных нейросетевых моделей обработки изображений занимают автоэнкодеры - сети специальной архитектуры, представляющие собой фактически пару нейросетей - энкодер и декодер, соединенные между собой тонким перешейком (рис. 10) [39].

Идея, стоящая за автоэнкодерами, состоит в следующем: на вход сети подается некоторое изображение, которое сжимается первой сетью - энкодером в вектор, размерности меньшей, чем размерность исходного изображения, давая его представление. Далее этот вектор подается на вход второй сети - декодера, которая пытается проделать обратное декодирование

его в исходное изображение. Таким образом, на выходе исходное изображение сравнивается само с собой. Если первоначальный вариант достаточно похож на то, что получается на выходе, это дает сразу ряд преимуществ (рис. 10).

Во-первых, это дает своеобразный эффект сжатия: если мы готовы пренебречь некоторой потерей качества изображения, то мы вполне можем заменить изображение на его «denserepresentation» - тем вектором, который дает на выходе энкодера часть сети. В самом деле, в этом случае мы вполне легко можем восстановить (с некоторой точностью) исходное изображение, подав его представление на вход декодера части нейросетевого автоэнкодера.

Во-вторых, мы извлекаем в закодированном виде полезные признаки, полностью или частично характеризующие наше изображение. В этом случае говорят о проекции данных - представлении исходных изображений в пространстве меньшей размерности без существенной потери отраженной на них информации. Если перед нами не стоит задача непосредственной интерпретации этих векторов меньшей размерности, то они вполне могут быть использованы далее в других моделях, например, предсказывающих конкретный тип заболевания, которым поражено растение, либо размер очага поражения.

В-третьих, автоэнкодеры часто применяются для сглаживания шума на изображении. В силу своей специфики автоэнкодер запоминает в «denserepresentation» самые существенные его особенности каждого поданного ему на вход

изображения, а шумы обычно игнорируют.

Именно последняя особенность автоэнкодеров дает данному инструменту некоторые конкурентные преимущества. Можно показать, что автоэнкодер можно обучить таким образом, что он будет убирать с исходного изображения именно очаги поражения болезни. Сравнив, таким образом, изображение на выходе модели с тем, что подавалось на вход, в ряде случаев можно довольно четко автоматически локализовать очаг поражения растения грибковой болезнью.

Стоит, наконец, отметить важность пост-процессинга результатов работы нейросетей в ряде проблем, как, например, в известной задаче детекции объектов в режиме реального времени [40]. Это происходит по ряду причин. Во-первых, используемая для решения задачи нейросеть может иметь слишком мало параметров, и мы можем не хотеть усложнять ее, стремясь к ее простоте и легковесности. Во-вторых, пост-процессинг данных после работы какого-либо алгоритма может диктоваться самой природой задачи, например, физика процесса. Может оказаться, что препроцессинг в виде наложения дополнительных цветных фильтров положительно сказывается на итоговом качестве сегментации болезней растений. В соответствии с общей методологией настройки параметров моделей в машинном обучении, можно оптимизировать параметры дополнительных фильтров на отложенной выборке данных, избегая таким образом их подстройки под текущие данные и повышая обобщающую способность модели.

Сегодня все чаще предлагаются современные решения и платформы, покрывающие наиболее важные части производственного процесса на ферме и включающие в себя модели детекции и классификации болезней, описанных выше [41], а также решения для удаленной визуальной экспертизы сельского хозяйства в реальном времени [42,43,44]. С развитием возможностей беспилотной техники и технологий по распознаванию окружающей среды и способности на нее реагировать они станут способны автономно осуществлять мониторинг условий выращивания сельскохозяйственных культур. Это позволит производителям своевременно реагировать на неожиданные вспышки болезней, появления вредителей или неблагоприятных условия окружающей среды [43].

Таким образом, можно констатировать, что сельское хозяйство находится в процессе перехода от традиционного земледелия. Общая

тенденция во всем мире идет к точному земледелию, дополненному передовыми технологиями, включая робототехнику и IT-технологии [45]. Применение передовых IT-технологий является тем резервом, который позволит повысить урожайность сельскохозяйственных культур.

Библиографический список

1. Яхьяев, Х. К. Автоматизированная система мониторинга «Защита» развития и распространения вредных объектов в Республике Узбекистан / Х. К. Яхьяев, М. Рахимов // Бюллетень науки и практики. Электронный журнал. - 2018. - Т. 4, № 1. - С. 92-96. - URL: <http://www.bulletennauki.com/yakhyaev-rahimov> (дата обращения 15.01.2018)
2. Частная селекция полевых культур : учебник / под редакцией В. В. Пыльнеев. – Санкт-Петербург : Лань, 2016. - 554 с. (ISBN 978-5-8114-2096-4)
3. Вестник научно-технического творчества молодежи Кубанского ГАУ. В 4-х частях / составители А. Я. Барчукова, Я. К. Тосунов ; под редакцией А. И. Трубилина ; ответственный редактор А. Г. Кошчаев. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – Т. 1, вып. 1. – 262 с.
4. Матвеева, И. П. Желтая ржавчина пшеницы. Распространение, вредоносность, меры борьбы (обзор) / И. П. Матвеева, Г. В. Волкова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. -2019. - № 2(46). - С. 102-116.
5. Пересыпкин, В. Ф. Сельскохозяйственная фитопатология / В. Ф. Пересыпкин. - 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1989. - 480 с.
6. Матвеева, И. П. Скрининг источников устойчивости к *Puccinia striiformis* West. среди сортообразцов пшеницы различного географического происхождения / И. П. Матвеева, Ю. В. Шумилов, Г. В. Волкова // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : IX Всероссийская конференция молодых ученых, посвященная 75-летию В.М. Шевцова. Краснодар, 24-26 ноября 2015 года. – Краснодар, 2016. – С.214-215.
7. Mains, E. B. Studies concerning heteroecious rusts / E. B. Mains // Mycologia. - 1933. - № 25. – P. 407-417.
8. Альбом вредителей и болезней сельскохозяйственных культур нечерноземной полосы европейской части СССР / С. М. Волков, Л. С. Зимин, Д. К. Руденко, С. М. Тупеневич. – Москва-Ленинград : Государственное издательство сель-

скохозяйственной литературы, 1955. – 488 с.

9. Андреев, Л. Н. Ржавчина пшеницы: цитология и физиология / Л. Н. Андреев, Ю. М. Плотникова. – Москва : Наука, 1989. – 304 с.

10. Bolton, Melvin D. Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina* / Melvin D Bolton, James A Kolmer, David F Garvin // *Molecular Plant Pathology*. – 2008. – 9(5). – P. 563-75. – DOI: 10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x

11. Кореньюк, Е. А. Исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы с устойчивостью к бурой ржавчине в условиях Омского Прииртышья : спец. 06.01.05 : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук // Кореньюк Екатерина Андреевна ; Сибирский НИИСХ. – Омск, 2015. – 165 с.

12. Schumann, G. L. Stem rust of wheat (black rust) / G. L. Schumann, K. J. Leonard // *The Plant Health Instructor*. – 2000. – DOI: 10.1094/PHI-I-2000-0721-01

13. Влияние севооборотов на развитие болезней пшеницы [Грибные болезни] / В. Б. Лебедев, Д. А. Юсупов, Ю. Ф. Курдюков, Н. И. Стрижков, Л. М. Кудимова // *Агро XXI*. – 2003/2004. – N 7/12. – С. 7-9.

14. Жуков, В. Д. Формирование учения о почвах и их плодородии, исторический опыт классификации почв / В. Д. Жуков, З. Р. Шеуджен // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2016. – № 119. – С. 588-605.

15. Шумилов, Ю. В. Желтая ржавчина пшеницы требует особого внимания / Ю. В. Шумилов, Г. В. Волкова // *Защита и карантин растений*. – 2013. – № 8. – С. 13-14.

16. Агроинвестор. – URL: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/15640-koshmary-zernovykh>

17. Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 (ред. от 19.07.2018) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» – URL: Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс» (дата обращения: 12.12.2018).

18. Рязанцев, Д. Ю. Диагностика карантинных фитопатогенов методом ПЦР в формате FLASH / Д. Ю. Рязанцев, Д. Д. Абрамов, С. К. Завриев // *Сельскохозяйственная биология*. – 2009. – № 3. – С. 114-117.

19. Федоренко, В. Ф. Перспективные технологии диагностики патогенов сельскохозяйственных растений : научно-аналитический обзор / В. Ф. Федоренко, Н. П. Мишуров, Л. А. Не-

менушая. – Москва : ФГБНУ Росинформагротех, 2018. – 68 с.

20. Шамрай, С. Н. Основы полевых исследований в фитопатологии и фитоиммунологии : учебно-методическое пособие / С. Н. Шамрай, В. И. Глушенко. – Харьков : ХНУ им. В.Н. Каразина, 2006. – 64 с. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / ответственный редактор В. А. Долженко. – Санкт-Петербург, 2009. – 379с.

21. Койшыбаев М. Болезни пшеницы. Анкара, 2018. 365 с.

22. Bidaux, J. M. Screening for horizontal resistance to rice blast (*Pyricularia oryzae*) in Africa / J. M. Bidaux, I. W. Buddenhagen, G. J. Persley (Eds.) // *Rice in Africa*. – London : Acad. Press, 1978. – P.159-174.

23. Barbedo, J. G. A. A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images / J. G. A. Barbedo // *Biosyst. Eng.* – 2016. – 144. – P. 52–60. – doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017

24. Application of support vector machine for detecting rice diseases using shape and color texture features / Q. Yao, Z. Guan, Y. Zhou, J. Tang, Y. Hu, B. Yang. – 2009. – DOI: 10.1109/ICEC.2009.73

25. Rice blast recognition based on principal component analysis and neural Network / M. Xiao, Y. Ma, Z. Feng, Z. Deng, S. Hou, L. Shu, Z. Lu // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2018. – 154. – P. 482–490. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.028>

26. Zeiler, M. D. Visualizing and understanding convolutional networks. *CoRR* abs/1311.2901 / M. D. Zeiler, R. Fergus. – 2014. – doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_53

27. Wang, G. Automatic image-based plant disease severity estimation using deep learning / G. Wang, Y. Sun, J. Wang // *Comput. Intell. Neurosci.* – 2017. – P. 2917536. – doi: 10.1155/2017/2917536

28. Can deep learning identify tomato leaf disease? / K. Zhang, Q. Wu, A. Liu, X. Meng // *Adv. Multimedia*. – 2018. – 3. – P.1-10. – doi: 10.1155/2018/6710865

29. A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification / E. C. Too, L. Yujian, S. Njuki, L. Yingchun // *Comput. Electron. Agric.* – 2018. – 161. – P. 272–279. –doi: 10.1016/j.compag.2018.03.032

30. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, L. D. Jackel // *Neural Computation*. – 1989. – 1(4). – P.541-551. – DOI:10.1162/neco.1989.1.4.541

31. The History Began from AlexNet: A Comprehensive Survey on Deep Learning Approaches / Md ZahangirAlom, Tarek M. Taha, Christopher Yakopcic, Stefan Westberg, PahedingSidike, MstShamima Nasrin, Brian C. Van Esesn, Abdul A. S. Awwal, Vijayan K. Asari // arXiv:1803.01164. – 2018.
32. “Deep Residual Learning for Image Recognition” / He Kaiming, Zhang Xiangyu, Ren Shaoqing, Sun Jian // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR): arXiv:1512.03385. - 2016. – P. 770–778. - doi:10.1109/CVPR.2016.90. ISBN 978-1-4673-8851-1.
33. “SqueezeDet: Unified, Small, Low Power Fully Convolutional Neural Networks for Real-Time Object Detection for Autonomous Driving” / Bichen Wu, Alvin Wan, Forrest Iandola, Peter H. Jin, Kurt Keutzer // ArXiv:1612.01051. - 2016.
34. Densely Connected Convolutional Networks / Gao Huang, Zhuang Liu, Laurens van der Maaten, Kilian Q. Weinberger // arXiv: 1608.06993. – 2018.
35. Liu, L. B. Identification method of rice leaf blast using multilayer perception neural network / L. B. Liu, G. M. Zhou // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. - 2009. - 25(S2). - DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.z2.041
36. Phadikar, S. Rice diseases classification using feature selection and rule generation techniques / S. Phadikar, J. Sil, A. K. Das // Computers and Electronics in Agriculture. - 2013. – 90. - P. 76–85. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.11.001>
37. Gayathri, Devi T. Plant Leaf Disease Detection using K means Segmentation / Devi T. Gayathri, P. Neelamegam, A. Srinivasan // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. –Vol. 119, № 15. – P. 3477-3483.
38. Dor Bank, Noam Koenigstein, Raja Giryes Autoencoders. arXiv: 2003.05991. - 2020.
39. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // ArXiv 1506.02640. - 2016.
40. Platform for simulation of automated crop production / M. Hakojärvi, M. Hautala, J. Ahokas, T. Oksanen, T. Maksimow, A. Aspiala, A. Visala // Agronomy Research. - 2010. - 8 (1). – P. 797–806.
41. Solution for remote real-time visual expertise of agricultural objects / V. Komasilovs, A. Zacepins, A. Kviesis, A. Nasirahmadi, B. Sturm // Agronomy Research. - 2018. - 16(2). – P. 464-473. - doi: <https://doi.org/10.15159/AR.18.050>
42. Калинин, Н. В. О технологиях машинного зрения в сельском хозяйстве / Н. В. Калинин // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. - № 3(37). - С. 1-5.
43. Официальный сайт компании «PlantVillage». - URL: <https://plantvillage.psu.edu/> (дата обращения: 11.01.2021)
44. Олешко, Р. Б. Применение машинного зрения в сельском хозяйстве / Р. Б. Олешко, Л. И. Краснопахтова // Синергия наук. - 2017. - № 12. – С. 840-844. – URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0612>
45. InSTePP International Science & Technology Practice & Policy (InSTePP) center at the University of Minnesota. – URL: <https://twitter.com/instepp>

WHEAT RUST IDENTIFICATION USING PHYTOPATHOLOGICAL RESEARCH AND MACHINE VISION TECHNOLOGIES

**Volkova G.V.1, Arinicheva I.V.2, Arinichev I.V.3, Matveeva I.P.1, Kim Yu.S.1,
1FSBSI Federal Scientific Center of Biological Plant Protection 350039, Russia, Krasnodar
Territory, Krasnodar, p / o 39; tel.: 89183747678; e-mail: galvol.bpp@yandex.ru
2FSBEI HE Kuban State Agrarian University, 350004, Russia, Krasnodar Territory, Krasnodar,
Kalinina st., 13; Tel. 89184428703; e-mail: loukianova7@mail.ru
3FSBEI HE Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar Territory, Krasnodar,
Stavropolskaya st., 149, e-mail: iarinichev@gmail.com**

Key words: wheat diseases, yellow rust, brown rust, stem rust, phytosanitary monitoring, diagnostics, computer vision.

Wheat is the most economically important and valuable food crop cultivated in most regions of the world, and various diseases have a significant impact on yield parameters. Particular attention in wheat protection technologies from phytopathogens is given to rust, since yield losses, depending on the weather conditions of the season and the resistance of the sown varieties, can range from 30 to 100%. The article provides brief information on wheat rust diseases (yellow, brown, stem rust), as well as on current methods of their identification. Accurate and timely identification of rust pathogens is a key step in making decisions on application of plant protection products in the battle against diseases, which prevents their further development, spread and the occurrence of epiphytotic. The article describes the main method for identification and further record of yellow, brown, stem rust - this is a classic phytopathological study based on usage of human resources. The advantage of this method is its accuracy and versatility. Among the drawbacks, one should single out the labor intensity and the need for a staff of qualified phytopathologists. In view of intensive development of computer technologies and agriculture digitalization, the possibility of using machine vision based on programming of neural networks and their training in identifying the main causative agents of diseases is acquiring scientific and practical interest. A promising methodological approach to identification of phytopathogens when providing phytosanitary monitoring and algorithms used for training of neural networks and applied in machine vision technologies are presented.

Bibliography:

1. Yakhyayev, Kh. K. Automated monitoring system "Protection" of development and spread of harmful objects in the Republic of Uzbekistan / Kh. K. Yakhyayev, M. Rakhimov // *Vestnik of Science and Practice. Electronic journal*. - 2018. - V. 4, № 1. - P. 92-96. - URL: <http://www.bulletennauki.com/yakhyayev-rahimov> (date of access 15.01.2018)
2. Private selection of field crops: textbook / edited by V. V. Pylnev. - St. Petersburg: Lan, 2016. - 554 p. (ISBN 978-5-8114-2096-4)
3. Vestnik of scientific and technical creativity of youth of Kuban SAU. In 4 parts / compiled by A. Ya. Barchukova, Ya. K. Tosunov; edited by A.I. Trubilin; executive editor A. G. Koshchayev. - Krasnodar: KubSAU, 2016. - V. 1, issue. 1. - 262 p.
4. Matveeva, I.P. Yellow rust of wheat. Distribution, harmfulness, control measures (review) / I.P. Matveeva, G.V. Volkova // *Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. - 2019. - № 2 (46). - P. 102-116.
5. Peresypkin, V.F. Agricultural phytopathology / V.F. Peresypkin. - 4th ed., Rev. and add. - Moscow: Agropromizdat, 1989. - 480 p.
6. Matveeva, I.P. Screening of sources of resistance to Puccinia striiformis West. among varieties of wheat of various geographical origin / I. P. Matveeva, Yu. V. Shumilov, G. V. Volkova // Scientific support of the agro-industrial complex: IX All-Russian conference of young scientists dedicated to the 75th anniversary of V.M. Shevtsov. Krasnodar, November 24-26, 2015. - Krasnodar, 2016. - P. 214-215.
7. Mains, E. B. Studies concerning heteroecious rusts / E. B. Mains // *Mycologia*. - 1933. - № 25. - P. 407-417.
8. Album of pests and diseases of agricultural crops of the non-black soil zone of the European part of the USSR / S. M. Volkov, L. S. Zimin, D. K. Rudenko, S. M. Tupenevich. - Moscow-Leningrad: State Publishing House of Agricultural Literature, 1955. - 488 p.
9. Andreev, L.N. Wheat rust: cytology and physiology / L.N. Andreev, Yu.M. Plotnikova. - Moscow: Nauka, 1989. - 304 p.
10. Bolton, Melvin D. Wheat leaf rust caused by Puccinia triticina / Melvin D Bolton, James A Kolmer, David F Garvin // *Molecular Plant Pathology*. - 2008. -- 9 (5). - P. 563-75. - DOI: 10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x
11. Korenyuk, E.A. Initial material for selection of spring soft wheat with resistance to leaf rust in the conditions of the Omsk Irtysh region: spec. 06.01.05: dissertation for the degree of candidate of agricultural sciences // Korenyuk Ekaterina Andreevna; Siberian Research Institute of Agriculture. - Omsk, 2015. - 165 p.
12. Schumann, G. L. Stem rust of wheat (black rust) / G. L. Schumann, K. J. Leonard // *The Plant Health Instructor*. - 2000. - DOI: 10.1094/PHI-I-2000-0721-01
13. The influence of crop rotations on development of wheat diseases [Fungal diseases] / V.B. Lebedev, D.A. Yusupov, Yu.F. Kurdyukov, N.I. Strizhkov, L.M. Kudimova // *Agro XXI*. - 2003/2004. - N 7/12. - P. 7-9.
14. Zhukov, V.D. Formation of the doctrine of soils and their fertility, historical experience of soil classification / V.D. Zhukov, Z.R. Sheudzen // *Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University*. - 2016. - № 119. - P. 588-605.
15. Shumilov, Yu. V. Yellow rust of wheat requires special attention / Yu. V. Shumilov, G.V. Volkova // *Plant protection and quarantine*. - 2013. - № 8. - P. 13-14.
16. Agroiinvestor. - URL: <https://www.agroiinvestor.ru/technologies/article/15640-koshmary-zernovykh>
17. Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 204 (as amended on 19.07.2018) "On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024" - URL: Access from the reference legal system "Consultant Plus" (access date: 12.12.2018).
18. Ryazantsev, D. Yu. Diagnostics of quarantine phytopathogens by PCR in FLASH format / D. Yu. Ryazantsev, D.D. Abramov, S.K. Zavriev // *Agricultural biology*. - 2009. - № 3. - P. 114-117.
19. Fedorenko, V.F. Promising technologies for diagnostics of pathogens of agricultural plants: scientific and analytical review / V.F. Fedorenko, N.P. Mishurov, L.A. Nemenushchaya. - Moscow: FSBSI Rosinformagrotech, 2018. - 68 p.
20. Shamrai, S. N. Fundamentals of field research in phytopathology and phytoimmunology: teaching aid / S. N. Shamrai, V. I. Glushenko. - Kharkov: KhNU named after V.N. Karazin, 2006. - 64 p. Guidelines for registration tests of fungicides in agriculture / executive editor V. A. Dolzhenko. - St. Petersburg, 2009. - 379p.
21. Koishybaev M. Wheat diseases. Ankara, 2018. 365 p.
22. Bidaux, J. M. Screening for horizontal resistance to rice blast (Pyricularia oryzae) in Africa / J. M. Bidaux, I. W. Buddenhagen, G. J. Persley (Eds.) // *Rice in Africa*. - London: Acad. Press, 1978. - P. 159-174.
23. Barbedo, J. G. A. A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images / J. G. A. Barbedo // *Biosyst. Eng.* - 2016. - 144. - P. 52-60. - doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017
24. Application of support vector machine for detecting rice diseases using shape and color texture features / Q. Yao, Z. Guan, Y. Zhou, J. Tang, Y. Hu, B. Yang. - 2009. - DOI: 10.1109/ICEC.2009.73
25. Rice blast recognition based on principal component analysis and neural Network / M. Xiao, Y. Ma, Z. Feng, Z. Deng, S. Hou, L. Shu, Z. Lu // *Computers and Electronics in Agriculture*. - 2018. - 154. - P. 482-490. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.028>

26. Zeiler, M. D. Visualizing and understanding convolutional networks. *CoRR abs / 1311.2901* / M. D. Zeiler, R. Fergus. - 2014. - doi: 10.1007 / 978-3-319-10590-1_53
27. Wang, G. Automatic image-based plant disease severity estimation using deep learning / G. Wang, Y. Sun, J. Wang // *Comput. Intell. Neurosci.* - 2017. - P. 2917536. - doi: 10.1155 / 2017/2917536
28. Can deep learning identify tomato leaf disease? / K. Zhang, Q. Wu, A. Liu, X. Meng // *Adv. Multimedia.* - 2018. - 3. - P.1-10. - doi: 10.1155 / 2018/6710865
29. A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification / E. C. Too, L. Yujian, S. Njuki, L. Yingchun // *Comput. Electron. Agric.* - 2018. - 161. - P. 272–279. -doi: 10.1016 / j.compag.2018.03.032
30. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, L. D. Jackel // *Neural Computation.* - 1989. - 1 (4). - P. 541-551. - DOI: 10.1162 / neco.1989.1.4.541
31. The History Began from AlexNet: A Comprehensive Survey on Deep Learning Approaches / Md ZahangirAlom, Tarek M. Taha, Christopher Yakopcic, Stefan Westberg, PahedingSidike, MstShamima Nasrin, Brian C. Van Esesn, Abdul AS Awwal, Vijayan K. Asari // *arXiv: 1803.01164.* - 2018.
32. "Deep Residual Learning for Image Recognition" / He Kaiming, Zhang Xiangyu, Ren Shaoqing, Sun Jian // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR): *arXiv: 1512.03385.* - 2016. - P. 770-778. - doi: 10.1109 / CVPR.2016.90. ISBN 978-1-4673-8851-1.
33. "Sque ezeDet: Unified, Small, Low Power Fully Convolutional Neural Networks for Real-Time Object Detection for Autonomous Driving" / Bichen Wu, Alvin Wan, Forrest landola, Peter H. Jin, Kurt Keutzer // *ArXiv: 1612.01051.* - 2016.
34. Densely Connected Convolutional Networks / Gao Huang, Zhuang Liu, Laurens van der Maaten, Kilian Q. Weinberger // *arXiv: 1608.06993.* - 2018.
35. Liu, L. B. Identification method of rice leaf blast using multilayer perception neural network / L. B. Liu, G. M. Zhou // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.* - 2009. - 25 (S2). - DOI: 10.3969 / j.issn.1002-6819.2009.z2.041
36. Phadikar, S. Rice diseases classification using feature selection and rule generation techniques / S. Phadikar, J. Sil, A. K. Das // *Computers and Electronics in Agriculture.* - 2013. - 90. - P. 76–85. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.11.001>
37. Gayathri, Devi T. Plant Leaf Disease Detection using K means Segmentation / Devi T. Gayathri, P. Neelamegam, A. Srinivasan // *International Journal of Pure and Applied Mathematics.* - 2018. –Vol. 119, No. 15. - P. 3477-3483.
38. Dor Bank, Noam Koenigstein, Raja Giryes Autoencoders. *arXiv: 2003.05991.* - 2020.
39. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // *ArXiv 1506.02640.* - 2016.
40. Platform for simulation of automated crop production / M. Hakojärvi, M. Hautala, J. Ahokas, T. Oksanen, T. Maksimow, A. Aspiala, A. Visala // *Agronomy Research.* - 2010. -- 8 (1). - P. 797–806.
41. Solution for remote real-time visual expertise of agricultural objects / V. Komasilovs, A. Zacepins, A. Kviesis, A. Nasirahmadi, B. Sturm // *Agronomy Research.* - 2018. -- 16 (2). - P. 464-473. - doi: <https://doi.org/10.15159/AR.18.050>
42. Kalinin, N.V. About machine vision technologies in agriculture / N.V. Kalinin // *Scientific electronic journal Meridian.* - 2020. - № 3 (37). - P. 1-5.
43. Official site of "PlantVillage" company. - URL: <https://plantvillage.psu.edu/> (accesse date: 11.01.2021)
44. Oleshko, R.B. Application of machine vision in agriculture / R.B. Oleshko, L.I. Krasnoplakhtova // *Synergy of Sciences.* - 2017. - № 12. - P. 840-844. - URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0612>
45. InSTePP International Science & Technology Practice & Policy (InSTePP) center at the University of Minnesota. - URL: <https://twitter.com/instepp>