

4.1.3. АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ
(СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 632.951:632.764

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_4_55

EDN: IUFITV

Формирование резистентности популяции колорадского жука к неоникотиноидам в условиях лесостепи Воронежской области**Владимир Федорович Рукин^{1✉}, Юрий Васильевич Попов²,
Александр Иванович Илларионов³**^{1,2} Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
Рамонь, Воронежская область, Россия³ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия¹ r011265vf@yandex.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследований, проведенных с целью выявления и оценки устойчивости колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say.) к инсектицидам химического класса неоникотиноидов в конкретных условиях лесостепи Воронежской области. Дана оценка биологической эффективности инсектицидов на основе тиаметоксама и имidakлоприда в борьбе с колорадским жуком, позволяющая судить о ее снижении. Описаны изменения фенологии развития фитофага в течение вегетации, произошедшие в последние годы под их воздействием. В лабораторных условиях подтверждены данные полевых наблюдений и опытов по усилению резистентности колорадского жука к действующим веществам тиаметоксам и имidakлоприду, установлены высокие количественные показатели резистентности. Наблюдения за основным вредителем картофеля и биологической эффективностью инсектицидов разных химических классов ведутся на протяжении длительного времени. С 2000 г. посадки картофеля при однократной обработке неоникотиноидами в период вегетации были практически свободными от вредителя. По полученным данным, срок защитного действия тиаметоксама с биологической эффективностью не менее 75% сохранялся в течение 3 недель. После 2010 г. неоникотиноидами практически повсеместно стали обрабатываться и семенные клубни, и растения. Под общим их воздействием в популяции колорадского жука происходили изменения чувствительности к этим инсектицидам. К 2015 г. 100% гибель личинок колорадского жука от тиаметоксама при обработке растений наблюдалась значительно реже. В 2018 г. произошло более заметное снижение биологической эффективности препаратов этого класса. В 2021–2022 гг. в лабораторных условиях получены количественные данные, свидетельствующие о значительном увеличении устойчивости этого вредителя картофеля к тиаметоксаму и имidakлоприду. Показатели резистентности исследуемой популяции по отношению к чувствительной популяции за 2 года испытаний составили для тиаметоксама 788–900, для имidakлоприда – 1120.

Ключевые слова: вредные организмы, защита картофеля, колорадский жук, неоникотиноиды, инсектициды, тиаметоксам, имidakлоприд, резистентность

Для цитирования: Рукин В.Ф., Попов Ю.В., Илларионов А.И. Формирование резистентности популяции колорадского жука к неоникотиноидам в условиях лесостепи Воронежской области // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 4(83). С. 55–69. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_4_55-69.

4.1.3. AGRICULTURAL CHEMISTRY, AGRONOMIC SOIL SCIENCE,
PROTECTION AND QUARANTINE OF PLANTS (AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

Development of resistance of Colorado potato beetle population to neonicotinoid insecticides in the conditions of the forest-steppe of Voronezh Oblast**Vladimir F. Rukin^{1✉}, Yuriy V. Popov², Aleksandr I. Illarionov³**^{1,2} All-Russian Research Institute of Plant Protection, Ramon, Voronezh Oblast, Russia³ Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia¹ r011265vf@yandex.ru✉

Abstract. The results of studies conducted to identify and evaluate the resistance of Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say.) to insecticides of the chemical class of neonicotinoids in specific conditions of the forest-steppe of Voronezh Oblast are presented. The authors estimated biological efficiency of insecticides based on thiametoxam and imidacloprid against potato beetle, suggesting its decrease, and described changes of

phenology of development of a phytophagan during the vegetation, descended in last years under their influence. In a laboratory environment the data of field observations and experiments was confirmed revealing intensifying resistance of Colorado potato beetle to active substances of tiametoksam and imidocloprid. Basic potato plant pest observations, as well as biological efficiency of insecticides of different chemical classes are being conducted throughout the long time. Since 2000, potato plantings at single neonicotinoid application during vegetation were almost free from pests. By the data obtained, protective action of tiametoksam with biological efficiency not less than 75% lasted for 3 weeks. After 2010, practically everywhere both seed tubers and potato plantings were treated with neonicotinoids. Under their general influence in Colorado potato beetle population sensitivity changes to these insecticides. To the year 2015, 100% potato beetle larvae destructrion when applying tiametoksam was registered much less frequently. In 2018, more appreciable decrease in biological efficiency of substances of this class was noticed. In 2021-2022, in a laboratory environment the authors obtained the quantitative data indicating substantial growth of stability of this potato pest to tiametoksam and imidocloprid. Indicators of resistance of investigated population in relation to sensitive one for 2 years of tests varied: in case with tiametoksam it was equal to 788-900, and with imidocloprid - 1120.

Keywords: noxious organisms, potato protection, Colorado potato beetle, neonicotinoid, insecticides, tiame-toksam, imidocloprid, resistance

For citation: Rukin V.F., Popov Yu.V., Illarionov A.I. Development of resistance of Colorado potato beetle population to neonicotinoid insecticides in the conditions of the forest-steppe of Voronezh Oblast. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(4):55-69. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_4_55-69.

Введение

Для регуляции численности вредителей в защите растений важен интегрированный подход, включающий весь комплекс агротехнических, селекционных и других мероприятий [1, 6, 10, 14, 17, 18, 20, 38, 43]. Многократное и чисто профилактическое применение пестицидов широкого спектра действия идет вразрез с принципами интегрированной защиты, приводит к накоплению их в почве и растениях, негативному действию на полезные организмы [31, 34, 42]. Стратегия наращивания пестицидных обработок в долговременном плане борьбы с вредителями оказывается малоэффективной из-за проблем с устойчивостью. Контроль фитосанитарной ситуации позволяет оценивать ожидаемую вредоносность и принимать оптимальные решения в проведении защитных обработок.

Колорадский жук в лесостепной зоне Воронежской области впервые появился на посадках картофеля в 1971 г. Высокая численность личинок (до 50 экз./куст) и ежегодная вредоносность (до полного уничтожения вегетативной массы) определили химическую тактику борьбы с вредителем. Практически с этого времени для защиты посадок картофеля как в коллективных хозяйствах, так и в частном секторе было начато применение хлор- и фосфорорганических инсектицидов (ДДТ, хлорофос). Чуть более 10 лет понадобилось вредителю для формирования устойчивости к этим соединениям, и к концу 80-х годов они были вытеснены синтетическими пиретроидами, на смену которым, в свою очередь, пришли химические вещества других классов [23].

Синтетические пиретроиды, обладающие высокой стартовой активностью, в условиях активного отрождения личинок позволяли бороться с вредителем одной, максимум двумя инсектицидными обработками за вегетацию. В 90-х годах препараты на основе циперметрина, альфа-циперметрина и дельтаметрина, лямбда-цигалотрина составляли практически 100% ассортимента инсектицидов для борьбы с вредителем, что в конечном итоге способствовало формированию комплексной устойчивости к этому химическому классу. В результате практически в течение 2–3 лет синтетические пиретроиды вытеснили вначале препарат Банкол (класс аналогов нерестиоксинов), а затем и препарат Регент (класс фенилпиразолов).

В 2000 г. устойчивость вредителя к фенилпиразолам была зафиксирована в Воронежской области [15]. Активные исследования по преодолению формирования резистентности колорадского в условиях РФ проводились в начале 2000-х гг. [22]. Проведен ретроспективный анализ устойчивости колорадского жука к разным классам химических соединений [16]. Высокая приспособленность к применяемым инсектицидам обусловлена

его экологической пластичностью, широкими пределами индивидуальных норм реакций на условия окружающей среды и степенью адаптационного полиморфизма на генетической основе [3, 4, 8, 19, 24, 25, 36, 39, 44].

Появление для защиты растений неоникотиноидов, прежде всего имидаклоприда в 1991 г., на фоне существенного проявления устойчивости к другим химическим классам открывало новые возможности в борьбе с вредителями, включая колорадского жука [30, 40, 42]. Являясь определенной альтернативой по отношению к ранее используемым фосфорорганическим, карбаматным и пиретроидным инсектицидам, к которым уже была выработана устойчивость, начиная с 2000 г. они стали активно использоваться против широкого спектра вредителей. В настоящее время зарегистрированы для борьбы с вредителями более чем в 120 странах мира. Их низкие концентрации вызывают у насекомых возбужденное состояние нервных рецепторов, при более высоких – повреждение, паралич и смерть. Следует подчеркнуть, что широкий спектр действия, равномерность распределения, удерживаемость на поверхности растений при системном проникновении дают неоспоримые преимущества перед инсектицидами других химических классов [28, 30, 33, 35]. Обладая хорошей растворимостью в воде, неоникотиноиды поглощаются растениями через корни или листья, перемещаясь по тканям и защищают все части растения, что обеспечивает качество обработок в борьбе с вредителями по сравнению с контактными инсектицидами. К ним относятся семь наиболее используемых действующих веществ: имидаклоприд, ацетамиприд, нитенпирам, тиаметоксам, тиаклоприд, клотианидин и динотефуран. Следует отметить, что по сравнению с другими инсектицидами неоникотиноиды показывают высокую биологическую эффективность при низкой дозировке, что важно в том числе и для предотвращения возникновения устойчивости. Однако уже с конца 90-х гг. в отдельных популяциях колорадского жука наблюдались случаи формирования устойчивости к неоникотиноидам, и эти тенденции усиливались в дальнейшем [28, 34, 39, 47, 48]. При этом возникала вероятность формирования перекрестной резистентности [21, 28, 34].

В настоящее время у некоторых видов насекомых резистентность к неоникотиноидам достигла такого уровня, который может поставить под сомнение эффективность этих инсектицидов [33, 35, 37, 42]. Данные исследований свидетельствуют о сформированной популяции колорадского жука с высоким уровнем резистентности к данной группе инсектицидов и в ряде регионов европейской части РФ [21]. Колорадский жук устойчив к более чем 50 различным инсектицидам. Его устойчивость к токсическим веществам является следствием высокой изменчивости генома, ответственного за их детоксикацию [26, 28, 37]. При ее проявлении возникает необходимость увеличения инсектицидных обработок, что ведет к воздействию на нецелевые организмы и загрязнению окружающей среды. Эффективная борьба с вредителями требует не только четкого обоснования инсектицидной обработки, но и контроля вероятного развития устойчивости [10, 27, 29, 38]. Тем не менее, несмотря на возникающие проблемы, связанные с резистентностью, неоникотиноиды до настоящего времени остаются одними из главных средств борьбы с вредителями [28, 30, 35, 42].

Неоникотиноиды во многих случаях применяются в период вегетации, но основная часть их использования приходится на обработку посадочного материала [34, 42]. В 2010 г. при инсектицидной обработке клубней неоникотиноидами в отдельных случаях срок защиты картофеля от колорадского жука достигал 30 и более дней, но постепенно стал уменьшаться. Под воздействием интенсивных инсектицидных обработок в популяции происходят и фенотипические изменения. Доминирующими становятся фенотипы с определенными изменениями покрова, окраски, рисунка переднегруди имаго и особенностями фенологии [2, 5, 28].

Для снижения вероятности возникновения резистентности этого вредителя считается целесообразным чередование обработок неоникотиноидами с обработками веществами других химических классов, в том числе инсектицидами, к которым ранее была установлена устойчивость. Имеет значение чередование обработок химическими и биологическими инсектицидами [32, 47]. Тем не менее биологические инсектициды не гарантируют, что резистентность не возникнет. Так, в начале 90-х годов в публикациях отсутствовали данные, подтверждающие или отрицающие наличие отличий чувствительности колорадского жука к биоинсектицидам из класса авермектинов, в частности к абамектину, но уже через 6 лет стали появляться результаты исследований, авторы которых отмечали повышение устойчивости вредителя в популяции с множественной резистентностью [27, 29, 46].

В перспективе, учитывая возникновение резистентности у вредителя, следует уделять внимание поиску новых химических и биологических инсектицидов, отличных по своей природе от уже имеющихся в арсенале. В целях преодоления устойчивости к инсектицидам представляет интерес создание современных пестицидов с использованием двуцепочной РНК, способной индуцировать у насекомых РНК-интерференцию, приводящую к их гибели [9, 45]. Ценным компонентом программ комплексной борьбы с вредителями является использование генетической устойчивости растений, в том числе к колорадскому жуку *L. decemlineata* Say. Выявление устойчивой или восприимчивой зародышевой плазмы растений позволяет более детально исследовать механизмы устойчивости и помогает разработке долгосрочной программы управления ими [41].

Цель представленных исследований заключалась в выявлении и оценке устойчивости колорадского жука к инсектицидам химического класса неоникотиноидов в конкретных условиях лесостепи Воронежской области.

Материалы и методы

Исследования резистентности колорадского жука являлись частью работы по комплексной защите картофеля от вредных организмов. Фенологические наблюдения и учеты численности колорадского жука на картофеле в условиях лесостепной зоны Центрального Черноземья на производственных и опытных участках проводятся на протяжении уже достаточно длительного времени. На данном этапе авторы основное внимание уделили временному периоду 2018–2022 гг.

На опытных участках высаживался посадочный материал, соответствующий стандарту семенного картофеля [7]. Для закладки деляночных опытов в последние годы исследований использованы сорта Жуковский ранний, Ред Скарлетт, Ред фентези, Лабадиа, Эволюшн. До закладки полевых опытов клубни выдерживались при температуре 10–15 °С в течение двух недель. Их обработка проводилась за день до посадки. Препараты наносились на клубни ранцевым опрыскивателем в соответствии с нормой расхода 10 л рабочего раствора на тонну клубней. Перед посадкой картофеля вся площадь участка культивировалась. Первое окучивание проводилось при отрастании сорняков до всходов культуры и обработки гербицидом. После появления всходов перед второй гербицидной обработкой растения повторно окучивались.

Против вредителей в период вегетации при достижении экономического порога вредоносности проводились инсектицидные обработки. Используемые в полевых опытах с обработкой клубней и вегетирующих растений против колорадского жука и других вредителей инсектициды проверялись на содержание действующего вещества и соответствие регламентированной норме.

Учеты численности и поврежденности растений вредителем, а также эффективность применения инсектицида Актара, ВДГ (250 г/кг тиаметоксама) и других инсектицидов в полевых деляночных опытах осуществлялись неоднократно на каждой делянке в течение всей вегетации, начиная с появления всходов. В эти же сроки подсчитывалось

число яйцекладок на каждом растении и личинок колорадского жука [13]. Размер опытных делянок составлял 30 м², повторность 4-кратная, размещение рендомизированное.

В 2020 г. для анализа влияния обработки клубней на колорадского жука был заложен деляночный опыт с приманочной высадкой. Здесь уместно вспомнить, что еще в 80-е годы прошлого века борьба с колорадским жуком на всходах падалицы считалась одним из основных защитных мероприятий. Выходящий из зимовки колорадский жук, в отсутствие посаженного позже хозяйством картофеля, концентрировался на падалице и затем уничтожался обработкой хлор- или фосфорорганическими инсектицидами. В опыте за две недели до посадки была проведена обработка клубней инсектицидом Круйзер, КС, 0,2 л/т (350 г/л тиаметоксама) с последующим проращиванием до закладки опыта. В результате протравленные клубни имели развитые проростки и преимущество в полевой всхожести по сравнению с необработанными и непророщенными клубнями (контрольный вариант). В опыте устанавливалась смертность имаго и оценивалась динамика биологической эффективности по отношению к контролю.

В 2021 и 2022 гг. в соответствии с «Методическими рекомендациями по мониторингу резистентности к пестицидам в популяциях вредных членистоногих» [12] проведены лабораторные токсикологические исследования чувствительности популяции колорадского жука к тиаметоксаму и имидаклоприду. В качестве изучаемого инсектицида использован препарат Актара, ВДГ (250 г/кг тиаметоксама). В 2022 г. дополнительно изучали действие препарата Конфидор Экстра, ВДГ (700 г/кг имидаклоприда), который являлся первым неоникотиноидом (производитель фирма Bayer, Германия), зарегистрированным в начале 2000-х гг. на территории РФ для борьбы с колорадским жуком в период вегетации. Позднее для обработки клубней испытывали препарат Престиж, КС. За 5–7 лет эти препараты практически полностью заняли рынок средств защиты картофеля от колорадского жука, их применяли и в крупных хозяйствах, и в хозяйствах населения. До середины 2000-х гг. в огородах выращивалось подавляющее количество картофеля.

Сбор имаго проводили на опытных участках после начала вегетации высаженных клубней, которые не обрабатывали инсектицидами. На тех же участках к третьей декаде июня с той же целью осуществляли сбор личинок разных возрастов. Учитывая низкую стартовую эффективность инсектицида Актара, ВДГ в регламентированной норме расхода 0,06 кг/га (расход рабочей жидкости 300 л/га), показанную в полевых опытах в 2020 г., данная концентрация была взята за минимальную. Для расчета величины диагностической концентрации тиаметоксама использованы рабочие растворы от 0,04 до 0,005% д. в., полученные кратным разбавлением максимальной. Концентрации инсектицида Конфидор Экстра, ВДГ рассчитаны по средней регламентированной норме 0,04 кг/га с тем же расходом рабочей жидкости, использованы рабочие растворы от 0,013 до 0,105% д. в.

В лабораторных условиях собранные имаго обрабатывали заданными концентрациями инсектицида. Кормовой субстрат (тертые клубни картофеля) помещали в прозрачные пластиковые контейнеры (125 × 70 × 45 мм) с перфорированной крышкой, куда затем высаживали собранные на делянках имаго в количестве 50 экз. Рабочие растворы инсектицидов наносили дозатором-распылителем из расчета 30 мл равномерно на общую площадь контейнера 1 м², которые затем накрывали крышкой и ставили в удаленное от прямых солнечных лучей место при комнатной температуре. Повторность в опыте 4-кратная (по 200 особей на вариант). Смертность имаго подсчитана на 3-й день после обработки инсектицидом.

Статистическая обработка полученных данных осуществлена пробит-анализом. Для построения графиков зависимости смертности от логарифма концентрации использованы данные для чувствительных популяций, значения которых взяты из «Методиче-

ских рекомендаций ...»: СК₅₀ для тиаметоксама – 0,000004%, для имидаклоприда – 0,000015%; СК₉₅ для тиаметоксама – 0,00005%, для имидаклоприда – 0,00007% [12].

Сбор личинок колорадского жука проводили на тех же опытных участках картофеля. В лабораторных условиях готовили кормовой субстрат – листья картофеля, собранные с поля до обработки инсектицидом, которые погружали в раствор заданных концентраций, затем помещали в указанные пластиковые контейнеры. С помощью препаровальной иглы личинки 2-го возраста высаживали в количестве 50 экз. в той же повторности. Использовали концентрации рабочих растворов тиаметоксама и имидаклоприда, что и для имаго, полученные кратным разбавлением максимальной концентрации водой. Подсчет гибели личинок проведен на 3-й день после обработки. Статистическая обработка полученных данных осуществлена аналогично имаго колорадского жука.

Результаты и их обсуждение

По данным выполненных наблюдений в картофельных агроценозах лесостепной зоны ЦЧР вследствие постоянного применения неоникотиноидов для обработки семенного материала и растений в период вегетации в популяции колорадского жука стали формироваться признаки устойчивости.

Пролонгированное эффективное действие инсектицидной обработки клубней сроком до 30–35 дней с момента появления всходов картофеля позволяло зачастую выращивать ранний картофель без дополнительных обработок в вегетацию или ограничивать их количество при большей длине вегетации. В дальнейшем этот срок начал уменьшаться.

В 2018 г. обработка клубней тиаметоксамом на первых этапах эффективно сдерживала вредителя, тем не менее шло постоянное накопление имаго, яйцекладок и личинок. К концу второй декады июня на контрольной делянке количество личинок не превышало пороговое значение, как и на вариантах с инсектицидной обработкой клубней. ЭПВ по личинкам во всех вариантах был достигнут лишь в третьей декаде одновременно на контроле и на варианте обработки клубней.

В 2019 г. продолжительность эффективного защитного действия при обработке клубней против имаго и личинок составила 15 дней, при этом численность достигла экономического порога вредоносности на 4 дня позднее контрольного варианта без обработки.

В условиях 2020 г. период защитного действия инсектицидной обработки семенных клубней практически отсутствовал. В качестве протравителей использовали препараты Круйзер, КС (350 г/л тиаметоксама) 0,2 л/т и Иמידор Про, КС (200 г/л имидаклоприда) 0,25 л/т. При достижении ЭПВ ко времени инсектицидной обработки численность личинок на варианте применения препаратов Круйзер и Иמידор Про составила соответственно 5,6 и 4,9 экз./растение (контроль – 4,7 экз./растение).

Как уже отмечалось, контрастное проявление ослабления токсического действия тиаметоксама наблюдалось в опыте с приманочной высадкой. Первые всходы из пророщенных и протравленных клубней появились 22 мая, что на 9 дней раньше непророщенных и непротравленных. Итоговая всхожесть составила 98%, в то время как без проращивания этот показатель оказался ниже на 10%. Всходы высадки практически сразу заселялись колорадским жуком. Средняя численность имаго на обработанных тиаметоксамом растениях 27 мая составила 0,14 экз./куст, через 2 дня она снизилась до 0,06 и затем начала постепенно расти. Между 6 и 8 июня численность имаго в испытываемых вариантах сравнивалась с контролем без обработки и начала постепенно уменьшаться. К концу первой декады июня численность имаго на контроле превысила опытные варианты, то есть обработка клубней не оказала значимого действия на заселение всходов имаго. Характер изменения численности колорадского жука в начальный период вегетации картофеля представлен в таблице.

Численность колорадского жука в опыте с приманочной высадкой

Дата	Контроль				Высадка			
	численность имаго, экз./куст	численность имаго, % живых	количество яйцекладок на 1 куст	количество личинок, экз./куст	численность имаго, экз./куст	численность имаго, % живых	количество яйцекладок на 1 куст	количество личинок, экз./куст
27.05	0	0	0	0	0,14	50	0	0
29.05	0	0	0	0	0,06	33	0	0
01.06	0,3	100	0	0	0,12	28	0	0
03.06	0,14	100	0	0	0,47	100	0	0
06.06	0,4	100	0,4	0,3	0,65	95	0,45	0
08.06	0,6	100	0,6	100	0,25	100	0,53	0
12.06	0,14	100	0,79	1,2*	0,1	100	0,62	1,5**

Примечание: * – личинки только 1-го возраста; ** – личинки 1-го и 2-го возрастов.

Наличие живых особей и их гибель от тиаметоксама на приманочной высадке существенно варьировали по датам учетов, что может косвенно указывать на проявление устойчивости. Это касается и количества яйцекладок. Так как до откладки яиц на листья самка, как правило, питается там же, то, следовательно, отравленная пища перед откладкой яиц на нее не действовала. Различия в количестве яйцекладок на один куст между приманочной высадкой и контрольным вариантом отмечали после 8 июня. Первые отродившиеся личинки на приманочных растениях были отмечены 9 июня, на контрольных растениях всего лишь на 1 день позже. На токсичированных тиаметоксамом растениях 12 июня численность личинок 1-2-го возрастов составила 1,5 экз./растение, на контрольных делянках – 1,2 экз., причем наблюдались личинки только 1-го возраста. К 15 июня численность личинок в опыте и контроле достигла 4,7 экз./растение при 38% заселенности. В дальнейшем численность повысилась до 25 экз./растение при заселенности 88%, что вызвало практически полное уничтожение наземной части растений. Таким образом, каких-либо преимуществ обработки клубней приманочной высадки тиаметоксамом по сравнению с вариантом без обработки не выявлено.

Снижение биологической эффективности защитных обработок неоникотиноидами против колорадского жука наглядно наблюдается не только при обработке клубней, но и в период вегетации. Об этом свидетельствует проведенный анализ многолетних данных защитного действия одного из наиболее применяемых на картофеле инсектицидов этого класса – Актары, ВДГ. В большинстве случаев при использовании данного инсектицида до 2015 г. биологическая эффективность составляла 100%, срок защитного действия сохранялся в течение 21 дня (снижение численности вредителя по отношению к контролю не менее 75%). Сравнительные данные наблюдений представлены на рисунке 1.

В 2018 г. снижению эффективности инсектицидной обработки способствовал поздний и растянутый выход колорадского жука из зимовки, который усиливал его вредоносность, что в итоге привело к повторному применению инсектицида.

В 2019 г. на опытных делянках, наоборот, наблюдалось более раннее заселение колорадским жуком и затем появление личинок разных возрастов. Их численность ко времени обработки в 1-й декаде июня инсектицидом Актара, ВДГ, 0,06 кг/га варьировала от 4,6 до 5,9 экз. на растение. Биологическая эффективность на 7-й день составила 88%, но уже на 14-й день снизилась до 76% и позднее до 72%, вследствие чего была проведена повторная обработка.

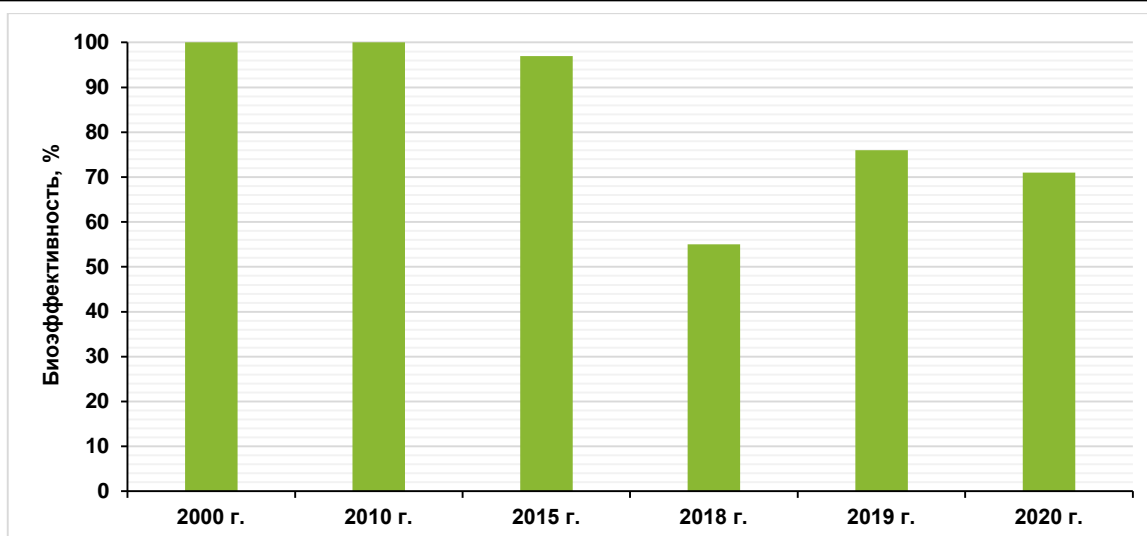


Рис. 1. Изменение биологической эффективности инсектицида Актара, ВДГ в норме 0,06 кг/га против колорадского жука на 14-й день после обработки

В 2020 г. потребовалось три обработки инсектицидом Актара, ВДГ, 0,06 кг/га. Из-за высокой активности вредителя на контроле к началу 2-й декады июля были уничтожены полностью почти 90% растений, у остальных 10% повреждения достигали 75%. Подавляющее число личинок оказалось представлено старшими возрастными группами, для которых характерна более высокая вредоносность и одновременно устойчивость к инсектицидам.

В этих условиях другие химические инсектициды – Кораген, КС и Регент, ВДГ (классы антрациламинов и фенилпирозолов) – контролировали численность вредителя при однократной обработке. Следует сказать, что устойчивость колорадского жука к последнему была показана еще в 2000 г. [23]. Эффективность данных инсектицидов (относительно численности личинок на контроле) на 3–18-й день после обработки составила 100%. Снижение наблюдалось лишь на 25-й день после обработки (рис. 2).

Другими словами, инсектицид Регент с давней резистентной историей при однократной обработке имел высокую биологическую эффективность, что, вероятно, связано с повышением восприимчивости данной популяции к фипронилу.

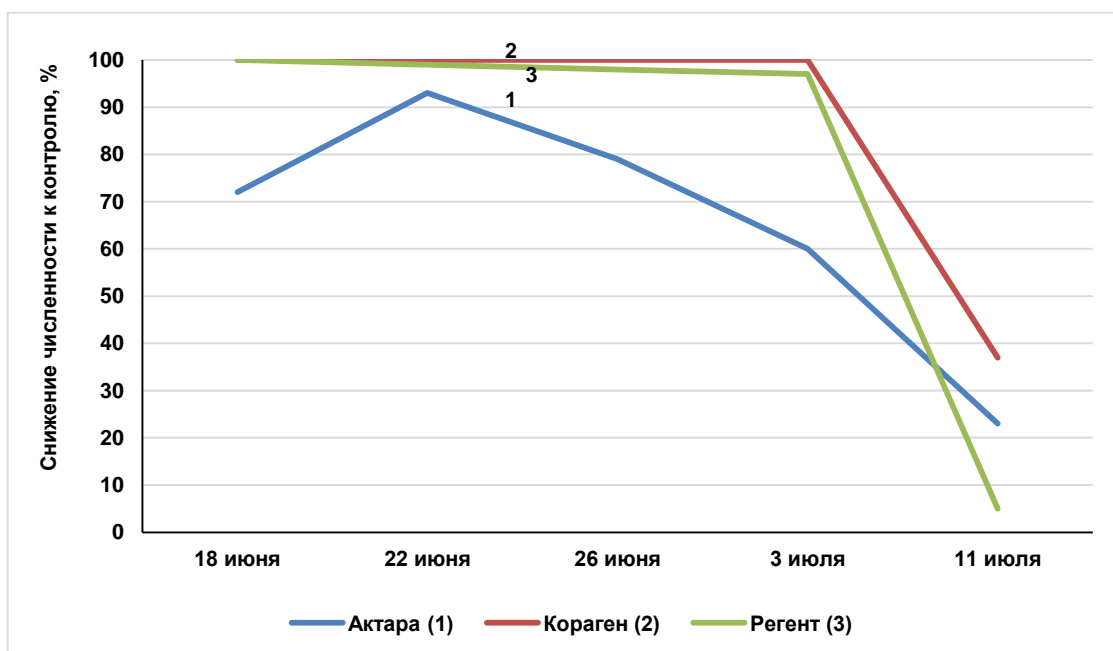


Рис. 2. Эффективность применения инсектицидов на основе химических соединений различных классов в полевых условиях по датам учета вредителя (2020 г.)

Наши наблюдения подтверждают фенологические изменения в изучаемых условиях у колорадского жука. В настоящее время выход колорадского жука из зимовки стал более растянутым, увеличился срок откладки яиц самками 1-й и 2-й генераций и, как следствие, продолжительность личиночных стадий. В 2018 г. доминирование популяций имаго с более поздним выходом из зимовки способствовало замедлению прохождения фаз онтогенеза вредителя. Заселение началось только к концу 2-й декады мая (обычно 10 мая на ранних посадках). В течение вегетации на растениях отмечались одновременно имаго, яйцекладки, личинки. Всего к началу осени отмечено 3 поколения вредителя, границы между которыми достаточно стерты. Второе поколение имаго стало уходить на зимовку в середине августа, третье – в конце сентября.

В условиях 2019 г. поведение имаго, выходящего из зимовки, также указывало на наличие как минимум двух различающихся фенологических групп вредителя, первая из которых выходит и заселяет посадки раньше, а вторая позже. Помимо опытных участков наблюдения за появлением имаго колорадского жука проводились на других посадках картофеля, в том числе на монокультуре с ранним сроком посадки (середина апреля). В отсутствие предпосадочной инсектицидной обработки клубней имаго вредителя на ранних посадках появились уже в начале мая и заселяли до конца 1-й декады, но в дальнейшем практически не наблюдались вплоть до середины 2-й декады мая. Тем не менее уже при фактически полном отсутствии имаго имелись единичные яйцекладки. Спустя неделю наблюдались новые особи, также вышедшие из зимовки. К 23 мая численность вредителя на опытных делянках, где появились первые всходы из не обработанных инсектицидом клубней, составила 0,8 имаго на куст. Таким образом, можно констатировать, что посадки также заселялись имаго двух разных генераций, различающихся сроками выхода из зимовки и продолжительностью заселения.

В 2020 г. всходы картофеля, появившиеся на опытном участке в конце мая, стали заселяться колорадским жуком раньше обычных сроков, поэтому процесс был еще более длительным по сравнению с предыдущими годами. К середине июня на делянках, в том числе с инсектицидными обработками клубней, как и 2018 г., наблюдали все фенологические фазы колорадского жука.

Неравномерным и растянутым по времени было заселение посадок колорадским жуком и в 2021 г. Появление совпало по времени с первыми всходами картофеля. Максимальная численность имаго по датам учетов составила 0,1 экз./растение. В начале июня на 15–20% всходов были первые яйцекладки, но порог вредоносности личинок достигнут лишь ко второй декаде июня, что указывает на увеличение сроков откладки яиц и времени развития отдельного поколения.

В условиях 2022 г. основной вредитель картофеля начал выходить из зимовки в 1-й декаде мая. Прохладный и дождливый май дополнительно увеличил время выхода перезимовавших имаго (с 1-й декады мая до июня). В течение вегетации, как и ранее, наблюдалось 2–3 поколения колорадского жука, но при этом, как и в предыдущие годы, четких различий между ними в пределах 7–10 дней по численности не было. Имаго вредителя присутствовали на растениях в период вегетации и на послеуборочных остатках вплоть до конца сентября. Начиная с 1-й декады июня и без какого-либо перерыва до конца августа наблюдались яйцекладки и позднее личинки.

В настоящее время происходят изменения не только в сроках выхода колорадского жука из зимовки, продолжительности фаз развития, но и во времени питания на растениях, периоде откладки яиц, их количестве, числе яйцекладок. Ранее число яиц, откладываемое одной самкой, было достаточно постоянным показателем. В среднем

одна яйцекладка составляла около 30 шт. яиц на лист, чего сейчас не наблюдается. Если брать единичную яйцекладку, в среднем в ней не более 15–20 яиц, при этом на листе повсеместно присутствуют 2, иногда 3 мелкие яйцекладки. До этого на вариантах применения инсектицидов на растениях картофеля отмечались личинки 1–2-го или 2–3-го возрастов, но без четкого прослеживания при одновременной встречаемости всех возрастов.

Лабораторные опыты по оценке устойчивости изучаемой популяции колорадского жука к тиаметоксаму и имидаклоприду подтвердили данные полевых наблюдений и опытов о наличии резистентности. На рисунке 3 представлена зависимость смертности личинок колорадского жука от концентрации тиаметоксама в растворе на 3-й день после обработки.

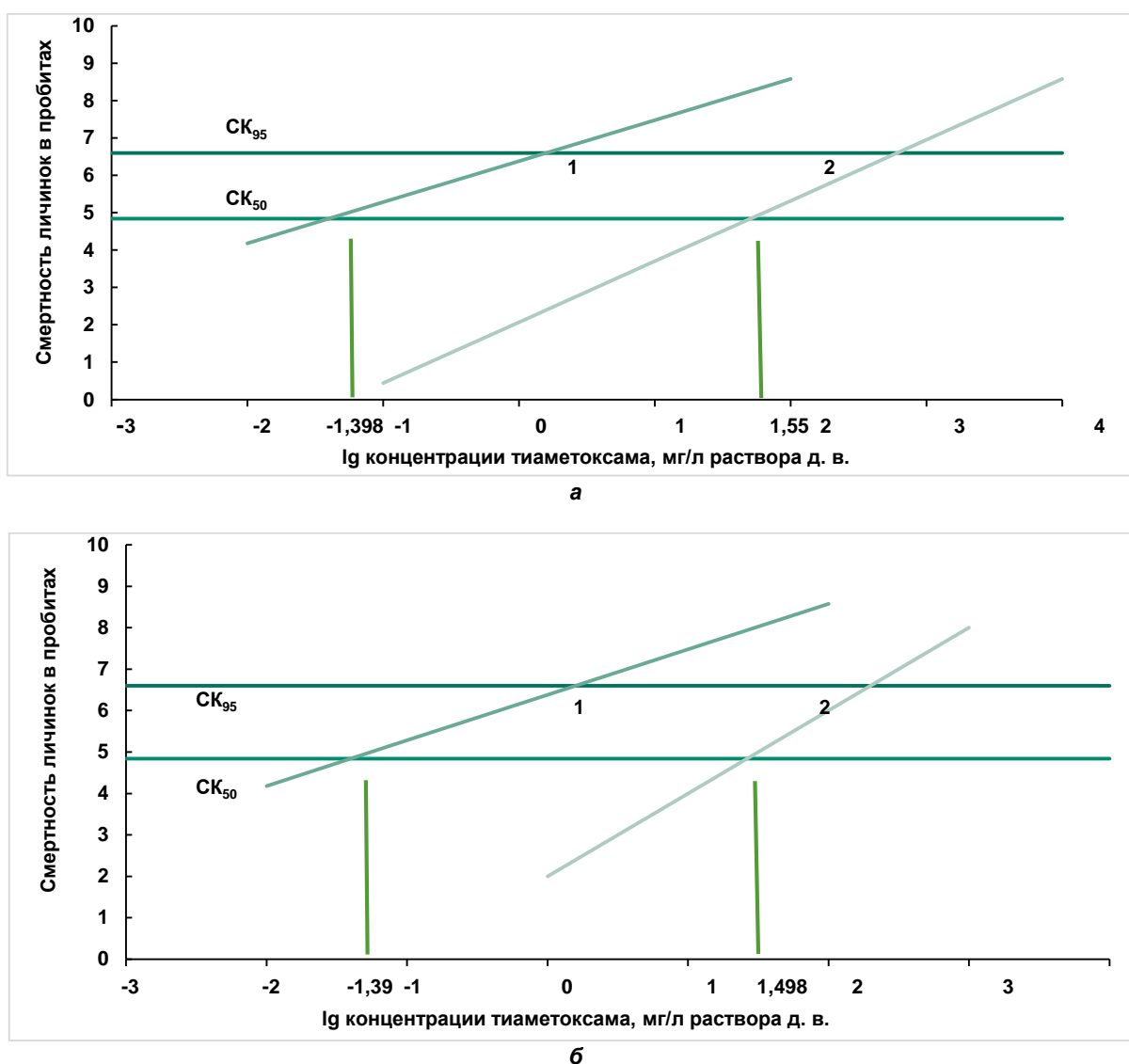


Рис. 3. Зависимость смертности личинок колорадского жука от логарифма концентрации тиаметоксама в растворе в 2021 (а) и 2022 г. (б): линия 1 – чувствительная популяция, линия 2 – изучаемая популяция

Линии, характеризующие зависимость чувствительной популяции, построены по показателям концентрации CK_{50} и CK_{95} , указанным в «Методических рекомендациях...» [12]. При переводе данных 2021 г. из lg концентрации ($10^{1,556}$) получаем 35,97 мг тиаметоксама в 1 л водного раствора, или 0,0036%.

Сопоставив данные с СК₅₀ в опыте с чувствительной популяцией, получаем следующий показатель резистентности (ПР) для 0,05 уровня значимости:

$$\text{ПР} = \frac{0,0036}{0,000004} = 900.$$

В 2022 г. концентрация в процентах составила $10^{1,498} - 31,50$ мг тиаметоксама в 1 л водного раствора, или 0,00315%. При сопоставлении данных с СК₅₀ получаем показатель резистентности

$$\text{ПР} = \frac{0,00315}{0,000004} = 787,5.$$

Полученные высокие показатели устойчивости вредителя к тиаметоксаму были проверены в данной популяции на действующем веществе с еще большей производственной историей. В лабораторных испытаниях резистентности личинок к имидаклоприду, проведенных в 2022 г., значение для изучаемой популяции составило $10^{2,25} - 168$ мг имидаклоприда на 1 л воды, или концентрация 0,0168%. Соответственно получили показатель резистентности $\text{ПР} = \frac{0,0168}{0,000015} = 1120$.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что обработка клубней картофеля неоникотиноидами не оказывала необходимого сдерживающего влияния на заселенность всходов картофеля имаго и личинками колорадского жука. На токсичированных тиаметоксамом и имидаклопридом растениях численность вредителя существенно не отличалась от контрольных делянок без обработки клубней, одновременно к середине июня достигались уровни ЭПВ, что требовало проведения инсектицидных обработок.

Резистентность наглядно проявилась в снижении биологической эффективности вегетационных обработок. В условиях прошедших лет для сдерживания колорадского жука ниже порогового уровня требовалось 2–3 вегетационных обработки инсектицидами на основе тиаметоксама и имидаклоприда.

Выявлены фенологические изменения в развитии этого основного вредителя картофеля. В настоящее время посадки фактически заселяются имаго двух разных генераций, различающихся сроками выхода из зимовки, временем заселения и откладки яиц и вследствие этого продолжительностью личиночных стадий. При этом в учетах нет четкого прослеживания возраста личинок, так как на растениях одновременно представлены все фенологические фазы колорадского жука.

В лабораторных условиях установлены высокие показатели резистентности данной популяции колорадского жука к тиаметоксаму и имидаклоприду, подтверждающие полевые наблюдения.

Список источников

1. Бантинг А.Г. Сельскохозяйственная экология в настоящем и будущем // Стратегия борьбы с вредителями, болезнями и сорняками в будущем. Москва: Колос, 1977. С. 22–41.
2. Беньковская Г.В., Удалов М.Б., Хуснутдинова Э.К. Генетическая основа и фенотипические проявления резистентности колорадского жука к фосфорорганическим инсектицидам // Генетика. 2008. № 44(5). С. 638–644.
3. Васильева Т.И., Сухорученко Г.И., Иванова Г.П. Сравнительная реакция чувствительной и резистентной к пиретроидам популяций колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae) // Тезисы докладов XII съезда Русского энтомологического общества (Санкт-Петербург, 19–24 августа 2002 г.). Санкт-Петербург, Пушкин: ВИЗР, 2002. С. 54–55.
4. Власенко Н.Г., Бокина И.Г. Экологизация защиты растений в условиях интенсификации // Экологическая безопасность защиты растений: материалы Международной научной конференции, посвященной 105-летию со дня рождения члена-корреспондента А.Л. Амброзова и 80-летию со дня рождения академика В.Ф. Самарова (Прилуки, 24–26 июля 2017 г.). Прилуки: Беларуская навука, 2018. С. 292–297.
5. Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Фасулати С.Р. Влияние условий зимовки на расселение колорадского жука // Тезисы докладов XII съезда Русского энтомологического общества (Санкт-Петербург, 19–24 августа 2002 г.). Санкт-Петербург, Пушкин: ВИЗР, 2002. С. 61–62.

6. Гиляров М.С. Биосфера, биоценозы и защита растений // Защита растений. 1968. № 7. С. 4–7.
7. ГОСТ 33996-2016. Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. Москва: Стандартинформ, 2017. 41 с.
8. Долженко Т.В., Долженко О.В. Экологичность применения новых инсектицидов на картофеле // Агро XXI. 2013. № 4-6. С. 28–30.
9. Журавлев В.С., Долгих В.В., Тимофеев С.А. и др. Метод РНК-интерференции в защите растений от насекомых вредителей // Вестник защиты растений. 2022. № 105(1). С. 28–39. DOI: 10.31993/2308-6459-2022-105-1-15219.
10. Захаренко В.А. Интегрированное управление фитосанитарным состоянием агроэкосистем в России // Современные системы и методы фитосанитарной экспертизы и управления защитой растений: сборник международной конференции (Большие Вяземы, 24–27 ноября 2015 г.). Большие Вяземы: ФГБНУ ВНИИФ, 2015. С. 21–26.
11. Захаренко В.А. Современная защита растений и ее научное обеспечение // Агро XXI. 2003. № 1-6. С. 34–39.
12. Методические рекомендации. Мониторинг резистентности к пестицидам в популяциях вредных членистоногих. Санкт-Петербург, Пушкин: ВИЗР, 2013. 85 с.
13. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве. Санкт-Петербург, Пушкин: ВИЗР, 2009. 363 с.
14. Павлюшин В.А., Ганнибал Ф.Б. За гарантированную защиту урожая и достижение экологической безопасности // Защита и карантин растений. 2019. № 10. С. 3–6.
15. Рославцева С.А., Михина Н.Г. О резистентности колорадского жука к инсектицидам // Защита и карантин растений. 2001. № 10. С. 27–28.
16. Рославцева С.А. Резистентность в популяциях колорадского жука // Агробиология. 2009. № 1. С. 87–92.
17. Санин С.С. Органическое земледелие: фитосанитарные, экологические и экономические барьеры // Защита и карантин растений. 2019. № 1. С. 3–6.
18. Санин С.С. Фитосанитарная экспертиза – основа рациональной и экологически обоснованной защиты растений // Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем: материалы III Всероссийского съезда по защите растений; в 3 т. (Санкт-Петербург, 16–20 декабря 2013 г.). Санкт-Петербург: ВНИИЗР, 2013. Т. 1. С. 272–274.
19. Соколов В.Е., Вольскис Р.С., Гиляров М.С. и др. Колорадский картофельный жук, *Leptinotarsa desemlineata* Say. Филогения, морфология, физиология, экология, адаптация, естественные враги. Москва: Наука, 1981. 375 с.
20. Соколов М.С., Монастырский О.А., Пикушева Э.А. Экологизация защиты растений. Пушино: Рекламное агентство «Биопресс», 1994. 463 с.
21. Сухорученко Г.И., Васильева Т.И., Иванова Г.П. Формирование резистентности к инсектицидам в популяциях колорадского жука из разных регионов европейской части России // Защита и карантин растений. 2017. № 8. С. 3–8.
22. Сухорученко Г.И., Долженко В.И., Гончаров Н.Р. и др. Технология и методы оценки побочных эффектов от пестицидов (на примере преодоления резистентности колорадского жука к инсектицидам). Санкт-Петербург, Пушкин: ВНИИ защиты растений, 2006. 52 с.
23. Сухорученко Г.И. Резистентность вредных организмов к пестицидам – проблема защиты растений второй половины XX столетия в странах СНГ // Вестник защиты растений. 2001. № 1. С. 18–37.
24. Ушатинская Р.С. Диапауза насекомых и ее модификации // Общая биология. 1973. № 34(2). С. 194–214.
25. Фасулати С.Р. Полиморфизм и популяционная структура колорадского жука *Leptinotarsa desemlineata* Say. в Европейской части СССР // Экология. 1985. № 6. С. 50–56.
26. Alyokhin A., Chen Y.H. Adaptation to toxic hosts as a factor in the evolution of insecticide resistance // Current Opinion in Insect Science. 2017. Vol. 21. Pp. 33–38.
27. Argetine J.A., Clark J.M. Selection for abamectin resistance in Colorado potato beetle (*Coleoptera: Chrysomelidae*) // Pesticide Science. 1990. Vol. 28(1). Pp. 17–24. DOI: 10.1002/ps.2780280104.
28. Bass C., Denholm I., Williamson M.S. et al. The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides // Pesticide Biochemistry and Physiology. 2015. Vol. 121. Pp. 78–87. DOI: 10.1016/j.pestbp.2015.04.004.
29. Dively G.P., Jansson R.K. Baseline monitoring of susceptibility to abamectin in the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say.) // Resistant Pest Management News. 1996. Vol. 8. Pp. 8–11.
30. Elbert A., Haas M., Springer B. et al. Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection // Pest Management Science. 2008. Vol. 64(11). Pp. 1099–1105. DOI: 10.1002/ps.1616.
31. Goulson D. An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides // Journal of Applied Ecology. 2013. Vol. 50(4). Pp. 977–987. DOI: 10.1111/1365-2664.12111.
32. Isman M.B. A renaissance for botanical insecticides? // Pest Management Science. 2015. Vol. 71(12). Pp. 1587–1590. DOI: 10.1002/ps.4088.
33. Jeschke P., Nauen R. Neonicotinoids – from zero to hero in insecticide chemistry // Pest Management Science. 2008. Vol. 64(11). Pp. 1084–1098. DOI: 10.1002/ps.1631.

34. Kumar S., Kumar V., Pal S. Insect Resistance to Neonicotinoids – Current Status, Mechanism and Management Strategies // In Book: Insecticides – Impact and Benefits of Its Use for Humanity. Chapter 20. Edited by Ramón Eduardo Rebolledo Ranz, Universidad de La Frontera, Chile. Pp. 312–317.
35. Kundoo A.A., Dar S.A., Mushtaq M. et al. Role of neonicotinoids in insect pest anagement: A review // Journal of Entomology and Zoology Studies. 2018. Vol. 6(1). Pp. 333–339.
36. Mansing A. Physiological classification of dormancies in insects // The Canadian Entomologist. 1971. Vol. 103(7). Pp. 983–1009.
37. Matsuda K., Ihara M., Sattelle D.B. Neonicotinoid insecticides: molecular targets, resistance, and toxicity // Annual Review of Pharmacology and Toxicology. 2021. Vol. 60(1). Pp. 241–255. DOI: 10.1146/annurev-pharmtox-010818-021747.
38. Molnar I., Rakosy-Tican E. Difficulties in potato pest control: The case of pyrethroids on Colorado potato beetle // Agronomy. 2021. Vol. 11(10). Pp. 19–20. DOI: 10.3390/agronomy11101920.
39. Mota-Sanchez D., Hollingworth R.M., Grafius E.J. et al. Resistance and cross-resistance to neonicotinoid insecticides and spinosad in the Colorado potato *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae) // Pest Management Science. 2006. Vol. 62(1). Pp. 30–37. DOI: 10.1002/ps.1120.
40. Nauen R., Denholm I. Resistance of insect pests to neonicotinoid insecticides: current status and future prospects // Archives of Insect Biochemistry and Physiology. 2005. Vol. 58(4). Pp. 200–215. DOI: 10.1002/arch.20043.
41. Rondon S.I., Feldman M., Thompson A.L. et al. Identifying Resistance to the Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say.) in Potato Germplasm: Review Update // Frontiers in Agronomy. 2021. Vol. 3. Article No. 642189. DOI: 10.3389/fagro.642189.
42. Simon-Delso N., Amaral-Rogers V., Belzunces L.P. et al. Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22(1). Pp. 5–34. DOI: 10.1007/s11356-014-3470-y.
43. Stern V.M., Smith R.F., Bosch R. et al. The integrated control concept // Hilgardia. 1959. Vol. 29(2). Pp. 81–101.
44. Szendrei Z., Grafius E., Byrne A. et al. Resistance to neonicotinoid insecticides in field populations of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) // Pest Management Science. 2012. Vol. 68(6). Pp. 941–946. DOI: 10.1002/ps.3258.
45. Timani K., Bastarache P., Morin P. Resistance in the Colorado Potato Beetle *Leptinotarsa decemlineata* // Insects. 2023. Vol. 14(5). Article No. 418. DOI: 10.3390/insects14050418.
46. Trisyono A.A., Walon M.E. Fitness costs of Resistance to *Bacillus thuringiensis* in Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) // Journal of Economic Entomology. 1997. Vol. 90(2). Pp. 267–271.
47. Ullah R.M.K., Gökçe A., Bakhsh A. et al. Insights into the Use of Eco-Friendly Synergists in Resistance Management of *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae) // Insects. 2022. Vol. 13(9). Pp. 1–16. DOI: 10.3390/insects13090846.
48. Zhao J.-Z., Bishop B.A., Grafius E.J. Inheritance and synergism of resistance to imidacloprid in the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) // Journal of Economic Entomology. 2000. Vol. 93(5). Pp. 1508–1514. DOI: 10.1603/0022-0493-93.5.1508.

References

1. Banting A.G. Agricultural ecology in the present and the future. In book: Pest control strategy, illnesses and weeds in the future. Moscow: Kolos; 1977:22-41. (In Russ.).
2. Ben'kovskaya G.V., Udalov M.B., Khusnutdinova E.K. The genetic base and phenotypic manifestations of Colorado potato beetle resistance to organophosphorus insecticides. *Genetika*. 2008;44(5):553-558. (In Russ.).
3. Vasilieva T.I., Sukhoruchenko G.I., Ivanova G.P. Comparative reaction of populations of Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae) sensitive and resistant to pyrethroids. In: Abstracts of the reports of the XII Congress of the Russian Entomological Society (St. Petersburg, August 19-24, 2002). St. Petersburg, Pushkin: All-Russian Research Institute of Plant Protection (VIZR) Publishers; 2002:54-55. (In Russ.).
4. Vlasenko N.G., Bokina I.G. Ecologization of plant protection in conditions of intensification. In: Ecological safety of plant protection: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 105th anniversary of the birth of corresponding member A.L. Ambrosov and the 80th anniversary of the birth of Academician V.F. Samersov (Priluki, July 24-26, 2017). Priluki: Belarusskaya Navuka; 2018:292-297. (In Russ.).
5. Vilkova N.A., Sukhoruchenko G.I., Fasulati S.R. Influence of wintering conditions on the settlement of the Colorado potato beetle. In: Abstracts of the reports of the XII Congress of the Russian Entomological Society (St. Petersburg, August 19-24, 2002). St. Petersburg, Pushkin: All-Russian Research Institute of Plant Protection (VIZR) Publishers; 2002:61-62. (In Russ.).
6. Gilyarov M.S. Biosphere, biocenoses and protection of plants. *Plant Protection*. 1968;7:4-7. (In Russ.).
7. GOST 33996-2016. Seed potatoes. Specifications and methods of determining the quality. Moscow: Standartinform Publishers; 2017. 41 p. (In Russ.).

8. Dolzhenko T.V., Dolzhenko O.V. Environmental compatability of application of new insecticides in plant potatoes. *AgroXXI*. 2013;4-6:28-30. (In Russ.).
9. Zhuravlyov V.S, Dolgikh V.V., Timofeev S.A. et al. RNA-interference method in plant protection against insect pests. *Plant Protection News*. 2022;105(1):28-39. DOI: 10.31993/2308-6459-2022-105-1-15219. (In Russ.).
10. Zakharenko V.A. Integrated management of the phytosanitary condition of agroecosystems in Russia. In: Modern systems and methods of phytosanitary expertise and plant protection management: Proceedings of the International Conference (Bolshye Vyazemy, November 24-27, 2015). Bolshye Vyazemy: All-Russian Research Institute of Plant Pathology Publishers; 2015:21-26. (In Russ.).
11. Zakharenko V.A. Modern plant protection and its scientific provision. *AgroXXI*. 2003;1-6:34-39. (In Russ.).
12. Methodological recommendations. Monitoring of pesticide resistance in populations of harmful arthropods. Saint Petersburg, Pushkin: All-Russian Research Institute of Plant Protection Publishers; 2013. 85 p. (In Russ.).
13. Methodological instructions on registration tests of insecticides, acaricides, molluscocides and rodenticides in agriculture. Saint Petersburg: All-Russian Research Institute of Plant Protection Publishers; 2004. 363 p. (In Russ.).
14. Pavlyushin V.A., Gannibal F.B. For guaranteed crop protection and environmental safety in agroecosystems. *Plant Protection and Quarantine*. 2019;10:3-6. (In Russ.).
15. Roslavtseva S.A., Mikhina N.G. Concerning potato beetle resistance to insecticides. *Plant Protection and Quarantine*. 2001;10:27-28. (In Russ.).
16. Roslavtseva S.A. Insecticide resistance in Colorado potato beetle populations. *Agrohimia*. 2009;1:87-92. (In Russ.).
17. Sanin S.S. Organic land use: phytosanitary environmental and economic barriers. *Plant Protection and Quarantine*. 2019;1:3-6. (In Russ.).
18. Sanin S.S. Phytosanitary expertise is the basis of rational and environmentally sound plant protection. In: Phytosanitary optimization of agroecosystems: Proceedings of the III All-Russian Congress on Plant Protection; in 3 vols. (Saint Petersburg, December 16-20, 2013). Saint Petersburg, Pushkin: All-Russian Research Institute of Plant Protection Publishers. 2013;1:272-274. (In Russ.).
19. Sokolov V.E., Volskis R.S., Gilyarov M.S. et al. Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* Say. Phylogeny, morphology, physiology, ecology, adaptation, natural enemies. Moscow: Nauka Publishers; 1981. 375 p. (In Russ.).
20. Sokolov M.S., Monastyrsky O.A., Pikusheva E.A. Ecologization of plant protection. Pushchino: Biopress Advertising Agency; 1994. 463 p. (In Russ.).
21. Sukhoruchenko G.I., Vasilieva T.I., Ivanova G.P. Formation of insecticide resistance in Colorado potato beetle populations from different regions of the European part of Russia. *Plant Protection and Quarantine*. 2017;8:3-8. (In Russ.).
22. Sukhoruchenko G.I., Dolzhenko V.I., Goncharov N.R. et al. Technology and methods for assessing the side effects of pesticides (in the context of overcoming the resistance of Colorado potato beetle to insecticides). Saint Petersburg, Pushkin: All-Russian Research Institute of Plant Protection; 2006. 52 p. (In Russ.).
23. Sukhoruchenko G.I. Resistance of harmful organisms to pesticides is a problem of plant protection in the second half of the twentieth century in the CIS countries. *Plant Protection News*. 2001;1:18-37. (In Russ.).
24. Ushatinsky R.S. Diapausing of insect and its modification. *General Biology*. 1973;34(2):194-214. (In Russ.).
25. Fasulati S.R. Polymorphism and population structure of potato beetle *Leptinotarsa deseme-lineata* Say. in the European part of the USSR. *Ecology*. 1985;6:50-56. (In Russ.).
26. Alyokhin A., Chen Y.H. Adaptation to toxic hosts as a factor in the evolution of insecticide resistance. *Current Opinion in Insect Science*. 2017;21:33–38.
27. Argetine J.A., Clark J.M. Selection for abamectin resistance in Colorado potato beetle (*Coleoptera: Chrysomelidae*). *Pesticide Science*. 1990;28(1):17-24. DOI: 10.1002/ps.2780280104.
28. Bass C., Denholm I., Williamson M.S. et al. The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2015;121:78-87. DOI: 10.1016/j.pestbp.2015.04.004.
29. Dively G.P., Jansson R.K. Baseline monitoring of susceptibility to abamectin in Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say.). *Resistant Pest Management News*. 1996;8:8-11.
30. Elbert A., Haas M., Springer B. et al. Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. *Pest Management Science*. 2008;64(11):1099-1105. DOI: 10.1002/ps.1616.
31. Goulson D. An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*. 2013;50(4): 977-987. DOI: 10.1111/1365-2664.12111.
32. Isman M.B. A renaissance for botanical insecticides? *Pest Management Science*. 2015;71(12):1587-1590. DOI: 10.1002/ps.4088.
33. Jeschke P., Nauen R. Neonicotinoids – from zero to hero in insecticide chemistry. *Pest Management Science*. 2008;64(11):1084-1098. DOI: 10.1002/ps.1631.
34. Kumar S., Kumar V., Pal S. Insect Resistance to Neonicotinoids – Current Status, Mechanism and Management Strategies. In Book: Insecticides – Impact and Benefits of Its Use for Humanity. Chapter 20. Edited by Ramón Eduardo Rebolledo Ranz, Universidad de La Frontera, Chile. Pp. 312–317.

35. Kundoo A.A., Dar S.A., Mushtaq M. et al. Role of neonicotinoids in insect pest anagement: A review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2018;6(1):333-339.
36. Mansing A. Physiological classification of dormancies in insects. *The Canadian Entomologist*. 1971;103(7):983-1009.
37. Matsuda K., Ihara M., Sattelle D.B. Neonicotinoid insecticides: molecular targets, resistance, and toxicity. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*. 2021;60(1):241-255. DOI: 10.1146/annurev-pharmtox-010818-021747.
38. Molnar I., Rakosy-Tican E. Difficulties in potato pest control: The case of pyrethroids on Colorado potato beetle. *Agronomy*. 2021;11(10):19-20. DOI: 10.3390/agronomy11101920.
39. Mota-Sanchez D., Hollingworth R.M., Grafius E.J. et al. Resistance and cross-resistance to neonicotinoid insecticides and spinosad in the Colorado potato *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (*Coleoptera: Chrysomelidae*). *Pest Management Science*. 2006;62(1):30-37. DOI: 10.1002/ps.1120.
40. Nauen R., Denholm I. Resistance of insect pests to neonicotinoid insecticides: current status and future prospects. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*. 2005;58(4):200-215. DOI: 10.1002/arch.20043.
41. Rondon S.I., Feldman M., Thompson A.L. et al. Identifying Resistance to the Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say.) in Potato Germplasm: Review Update. *Frontiers in Agronomy*. 2021;3:642189. DOI: 10.3389/fagro. 642189.
42. Simon-Delso N., Amaral-Rogers V., Belzunces L.P. et al. Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22(1):5-34. DOI: 10.1007/s11356-014-3470-y.
43. Stern V.M., Smith R.F., Bosch R. et al. The integrated control concept. *Hilgardia*. 1959;29(2):81-101.
44. Szendrei Z., Grafius E., Byrne A. et al. Resistance to neonicotinoid insecticides in field populations of the Colorado potato beetle (*Coleoptera: Chrysomelidae*). *Pest Management Science*. 2012;68(6):941-946. DOI: 10.1002/ps.3258.
45. Timani K., Bastarache P., Morin P. Resistance in the Colorado Potato Beetle *Leptinotarsa decemlineata*. *Insects*. 2023;14(5):418. DOI: 10.3390/insects14050418.
46. Trisyono A.A., Walon M.E. Fitness costs of Resistance to *Bacillus thuringiensis* in Colorado potato beetle (*Coleoptera: Chrysomelidae*). *Journal of Economic Entomology*. 1997;90(2):267-271.
47. Ullah R.M.K., Gökçe A., Bakhsh A. et al. Insights into the Use of Eco-Friendly Synergists in Resistance Management of *Leptinotarsa decemlineata* (*Coleoptera: Chrysomelidae*). *Insects*. 2022;13(9):1-16. DOI: 10.3390/insects13090846.
48. Zhao J.-Z., Bishop B.A., Grafius E.J. Inheritance and synergism of resistance to imidacloprid in the Colorado potato beetle (*Coleoptera: Chrysomelidae*). *Journal of Economic Entomology*. 2000;93(5):1508-1514. DOI: 10.1603/0022-0493-93.5.1508.

Информация об авторах

В.Ф. Рукин – старший научный сотрудник лаборатории испытания пестицидов ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», r011265vf@yandex.ru.

Ю.В. Попов – доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технологий защиты сельскохозяйственных культур ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», yu.vas.popov.1954@yandex.ru.

А.И. Илларионов – доктор биологических наук, профессор кафедры земледелия и защиты растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Illarionov-Alexandr@yandex.ru.

Information about the authors

V.F. Rukin, Senior Research Scientist, Pesticides Test Laboratory, All-Russian Research Institute of Plant Protection, r011265vf@yandex.ru.

Yu.V. Popov, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Research Scientist, Laboratory of Agricultural Crop Protection Technologies, All-Russian Research Institute of Plant Protection, yu.vas.popov.1954@yandex.ru.

A.I. Illarionov, Doctor of Biological Sciences, Professor, the Dept. of Soil Management and Plant Protection, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Illarionov-Alexandr@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 20.08.2024; одобрена после рецензирования 28.09.2024; принята к публикации 10.10.2024.

The article was submitted 20.08.2024; approved after reviewing 28.09.2024; accepted for publication 10.10.2024.

© Рукин В.Ф., Попов Ю.В., Илларионов А.И., 2024