

УДК 632.9

UDC 632.9

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

4.3.1. Agrochemistry, Agro-Soil Science, Plant Protection and Quarantine (Agricultural Sciences)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

AUTOMATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PLANT PROTECTION UNDER PRECISION FARMING CONDITIONS

Гареев Роберт Альбертович
Студент

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Gareev Robert Albertovich
Student

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Биккулов Рустем Ядкарлович
Канд. техн. наук

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Bikkulov Rustem Yadkarovich
Cand.Tech.Sci.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Избыточное и недостаточно адресное применение химических средств защиты растений остается одной из значимых проблем современного растениеводства, поскольку приводит к росту производственных затрат, повышению экологической нагрузки и риску несвоевременного подавления очагов поражения. Актуальность исследования определяется необходимостью перехода от сплошной обработки посевов к дифференцированному управлению фитосанитарным состоянием агроценозов в условиях точного земледелия. Предложена структурная схема автоматизированной системы поддержки принятия решений, включающая сбор данных с полевых датчиков, метеостанций, беспилотных летательных аппаратов и результатов визуального обследования посевов. Основой принятия решений является расчет интегрального индекса фитосанитарного риска, учитывающего вероятность развития вредных организмов, погодные условия, фазу развития культуры, историю поражения участка и пространственную неоднородность поля. В качестве расчетной апробации рассмотрено поле площадью 100 га, разделенное на десять производственных зон. Показано, что применение системы позволяет снизить средний расчетный индекс риска с 70,6 до 40,7 балла, сократить площадь химической обработки со 100 до 63 га, уменьшить суммарный расход препарата на 48,3 %, а ожидаемые потери урожая с 11,2 до 6,7 %. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения автоматизированных систем поддержки принятия решений как инструмента перехода к более точной, экономически и экологически обоснованной защите растений

Excessive and insufficiently targeted use of chemical plant protection products remains one of the significant problems of modern crop production, as it leads to increased production costs, higher environmental pressure, and the risk of delayed suppression of infection or pest outbreak areas. The relevance of the study is determined by the need to shift from blanket crop treatment to differentiated management of the phytosanitary condition of agroecosystems under precision farming conditions. A structural scheme of an automated decision support system is proposed, including data collection from field sensors, weather stations, unmanned aerial vehicles, and visual crop inspection results. Decision-making is based on the calculation of an integrated phytosanitary risk index, which takes into account the probability of harmful organism development, weather conditions, crop growth stage, the history of field-zone infestation, and the spatial heterogeneity of the field. As a calculation case study, a 100 ha field divided into ten production zones was considered. It is shown that the use of the system makes it possible to reduce the average calculated risk index from 70,6 to 40,7 points, decrease the chemically treated area from 100 to 63 ha, reduce the total amount of pesticide used by 48,3%, and lower expected yield losses from 11,2 to 6,7%. The obtained results confirm the feasibility of using automated decision support systems as a tool for transitioning to more precise, economically and environmentally justified plant protection

Ключевые слова: ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ, ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ФИТОСАНИТАРНЫЙ РИСК, АВТОМАТИЗАЦИЯ

Keywords: PLANT PROTECTION, PRECISION FARMING, DECISION SUPPORT SYSTEM, PHYTOSANITARY RISK, AUTOMATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-220-006>

Введение. В производственных посевах фитосанитарная обстановка редко бывает равномерной по всей площади поля. Очаги развития болезней, распространения вредителей или засоренности формируются локально и зависят от влажности почвы, микрорельефа, предшественника, густоты стояния растений, погодных условий и истории поражения конкретного участка. При этом в практике защиты растений решение о применении фунгицидов, инсектицидов или гербицидов часто принимается по календарному сроку, визуальной оценке ограниченного числа контрольных точек или усредненной характеристике поля. Такой подход упрощает организацию работ, но не позволяет точно определить, какие участки действительно требуют обработки, а какие могут быть оставлены под наблюдением.

Наиболее существенная проблема заключается в несоответствии между фактическим распределением фитосанитарного риска и способом проведения защитных мероприятий. При сплошной обработке препарат вносится и на участки с высоким риском поражения, и на зоны, где признаки развития вредного объекта отсутствуют либо находятся ниже экономически значимого уровня. Это приводит к перерасходу средств защиты растений, увеличению затрат на технологическую операцию, дополнительной нагрузке на агроэкосистему и повышению риска формирования устойчивости у вредных организмов. Обратная ситуация также опасна: если очаг поражения выявлен поздно, даже правильно подобранная обработка может не обеспечить ожидаемого эффекта, поскольку оптимальный период вмешательства уже упущен.

<http://ej.kubagro.ru/2026/06/pdf/06.pdf>

Технологии точного земледелия позволяют изменить логику принятия решений при защите растений. Поле в этом случае рассматривается не как единая однородная площадь, а как набор производственных зон с различным уровнем риска. Для оценки этих зон могут использоваться данные полевых датчиков, локальных метеостанций, беспилотной съемки, результатов визуального обследования, карт урожайности и сведений о предыдущих обработках. Однако накопление данных само по себе не решает задачу защиты растений. Для агронома важна не только информация о состоянии посевов, но и формализованная рекомендация: требуется ли обработка, в какой зоне ее проводить, какой уровень вмешательства является достаточным и какие участки нуждаются только в повторном мониторинге.

В связи с этим возрастает значение автоматизированных систем поддержки принятия решений, которые объединяют данные мониторинга, агрометеорологические условия и пороговые правила фитосанитарной оценки. В отличие от обычной цифровой карты поля такая система должна выполнять расчет интегрального риска и переводить его в конкретное управленческое действие. Обзор Zhai et al. показывает, что системы поддержки принятия решений в сельском хозяйстве становятся одним из основных инструментов обработки разнородных производственных данных, однако их практическое применение ограничивается сложностью интеграции данных, адаптацией алгоритмов к условиям хозяйства и необходимостью получения понятных для пользователя рекомендаций [3].

Состояние исследований и актуальность проблемы. Современные исследования цифровой защиты растений сосредоточены на трех прикладных задачах: выявлении неоднородности посевов, прогнозировании фитосанитарного риска и переводе результатов мониторинга в конкретные рекомендации по обработке. Для выявления проблемных участков применяются полевые датчики, беспилотные

летательные аппараты, спутниковые снимки и алгоритмы машинного зрения. Эти средства позволяют фиксировать зоны с изменением спектральных индексов, снижением плотности растительного покрова, признаками водного или биотического стресса, а также локальным распространением сорной растительности. Однако такие данные показывают только факт отклонения от нормального состояния посевов и не всегда позволяют однозначно определить необходимость химической обработки. По данным метаанализа Anastasiou et al., охватившего 239 исследований, технологии точного земледелия в защите растений применяются для обнаружения, прогноза и контроля вредных организмов, а их использование может существенно снизить расход средств защиты растений [1].

Наиболее значимым для практического применения является направление, связанное с системами поддержки принятия решений. Их задача состоит не в простом отображении карты состояния поля, а в формировании управленческой рекомендации: обрабатывать участок, провести повторный мониторинг или отказаться от вмешательства. При этом система должна быть понятной для агронома, поскольку полностью непрозрачные алгоритмы снижают доверие к автоматизированным рекомендациям. Brugler et al. указывают, что основными ограничениями внедрения таких систем являются стоимость, недостаток подготовленных кадров, вопросы владения данными и недоверие пользователей к результатам машинного анализа [2]. Поэтому актуальной остается разработка простой и интерпретируемой системы, которая связывает данные мониторинга с расчетом фитосанитарного риска и выбором дифференцированной обработки.

Цель исследований. Разработка и расчетная оценка автоматизированной системы поддержки принятия решений при защите растений в условиях точного земледелия, обеспечивающей

дифференцированное определение зон обработки на основе интегрального индекса фитосанитарного риска.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования является процесс принятия решений при защите растений в системе точного земледелия. Предметом исследования является автоматизированная процедура оценки фитосанитарного риска и выбора режима обработки производственных зон поля. В качестве расчетного объекта принято поле площадью 100 га, условно разделенное на десять зон по 10 га. Такое деление соответствует практике построения карт-заданий, когда обработка выполняется не по всему полю, а по отдельным управляемым участкам.

Предлагаемая система поддержки принятия решений включает четыре функциональных блока. Первый блок отвечает за сбор данных. Второй блок выполняет предварительную обработку информации: нормирование показателей, удаление выбросов, приведение данных к единой пространственной сетке и расчет частных индикаторов риска. Третий блок формирует интегральный индекс фитосанитарного риска. Четвертый блок выдает рекомендацию: наблюдение, локальная обработка или обязательная обработка.

Интегральный индекс риска рассчитывался по условной шкале от 0 до 100 баллов. При его формировании учитывались четыре группы факторов: вероятность развития вредного организма, погодная благоприятность, состояние растений по данным мониторинга и история фитосанитарной напряженности зоны. Для расчетной апробации использована взвешенная модель: $R = 0,35P + 0,25W + 0,2S + 0,2H$, где R – интегральный индекс риска, P – показатель вероятности развития вредного организма, W – погодный индекс, S – индекс состояния растительного покрова, H – исторический индекс поражения зоны.

Для интерпретации результатов приняты следующие пороговые значения: $R < 40$ баллов – наблюдение без химической обработки; $40 \leq R < 70$ баллов – локальная обработка или уточняющий мониторинг; $R \geq 70$ баллов – обязательная обработка. Порог 40 баллов принят как граница перехода от фонового риска к зоне повышенного наблюдения, поскольку при меньших значениях совокупность факторов не указывает на необходимость немедленного применения химической обработки. Порог 70 баллов принят как граница высокого риска, при которой одновременное действие погодных, биологических и пространственных факторов указывает на высокую вероятность развития очага поражения и необходимость защитного вмешательства. Таким образом, выбранные значения не заменяют специализированные экономические пороги вредоносности для конкретной культуры и вредного объекта, а используются как расчетные уровни принятия решений в рамках автоматизированной системы. При практическом внедрении они должны уточняться по культуре, региону, фазе развития растений, стоимости обработки и допустимому уровню потерь урожая.

Результаты исследований. Расчетная апробация показала, что применение автоматизированной системы поддержки принятия решений позволяет перейти от сплошной обработки к дифференцированному управлению фитосанитарным состоянием поля. В исходном варианте средний интегральный индекс риска по десяти зонам составил 70,6 балла, что соответствует высокому уровню фитосанитарной напряженности. После применения алгоритма поддержки решений, включающего выделение зон обязательной обработки, локального воздействия и наблюдения, расчетный остаточный риск снизился до 40,7 балла. Среднее снижение составило 42,5 %. При этом наиболее напряженной зоной была зона 7, где исходный риск достигал 91 балла, а после реализации рекомендации снизился до 55 баллов. Минимальный исходный риск

наблюдался в зоне 4 и составлял 56 баллов, что позволило ограничиться режимом мониторинга и не включать участок в обязательную сплошную обработку (рис. 1).

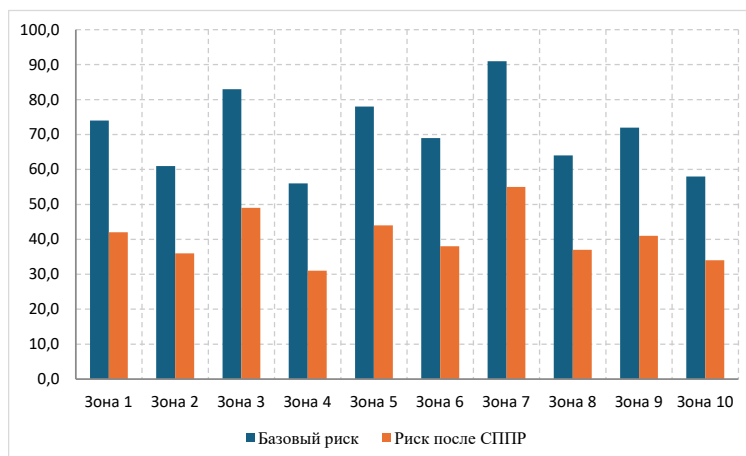


Рисунок 1 – Изменение интегрального риска поражения растений по производственным зонам до и после применения СППР

Качественный анализ рисунка 1 показывает, что система не приводит все зоны к одинаковому состоянию, а сохраняет различие между ними. Это важно для практики точного земледелия, поскольку задача состоит не в усреднении поля, а в управлении неоднородностью. Зоны с высоким риском получают приоритетную рекомендацию по обработке, зоны со средним риском переводятся в режим локального воздействия, а зоны с умеренной фитосанитарной напряженностью остаются под наблюдением. Такой подход снижает вероятность как избыточной химической нагрузки, так и пропуска опасного очага.

Количественные результаты, представленные на рисунке 2, показывают, что площадь обработки снизилась со 100 до 63 га, то есть на 37 %. За счет исключения зон низкого риска и применения дифференцированной нормы расхода суммарный расход препарата уменьшился со 100 до 51,66 л, что соответствует снижению на 48,3 %. Число выездов техники сократилось с трех до двух, то есть на 33,3 %. Это может уменьшить затраты топлива, механическое воздействие на почву и

загрузку машинно-тракторного парка в период защитных мероприятий. Одновременно доля своевременных решений увеличилась с 68 до 89 %, поскольку система ориентируется не только на календарный срок, но и на текущие условия развития вредного объекта. Расчетные ожидаемые потери урожая снизились с 11,2 до 6,7 %, то есть на 40,2 % (рис. 2).

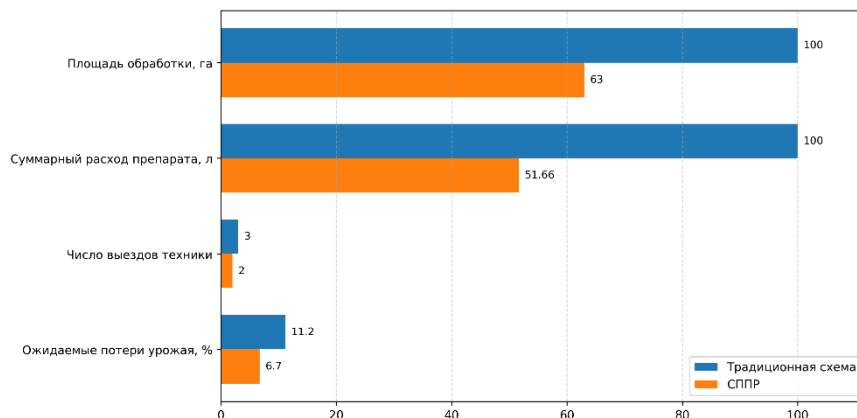


Рисунок 2 – Относительное изменение технологических показателей при применении автоматизированной системы поддержки принятия решений

Полученные результаты следует рассматривать как модельную оценку, демонстрирующую принципиальную эффективность предложенного подхода. Для промышленного внедрения необходима адаптация пороговых значений к конкретной культуре, региону, типу вредного организма и применяемым препаратам. Однако уже на расчетном уровне видно, что автоматизированная система поддержки решений позволяет одновременно решать две задачи: повысить адресность защитных мероприятий и снизить неоправданное применение химических средств защиты растений.

Выводы. 1. Расчетная апробация для поля площадью 100 га показала снижение среднего индекса фитосанитарного риска с 70,6 до 40,7 балла, что соответствует уменьшению расчетной фитосанитарной напряженности на 42,5 %. 2. Применение системы позволило сократить площадь химической обработки на 37 %, суммарный расход препарата на 48,3 %, ожидаемые потери урожая на 40,2 %.

число выездов техники на 33,3 %, а ожидаемые потери урожая на 40,2 % по сравнению с традиционной схемой сплошной обработки.

Библиографический список

1. Anastasiou E., Fountas S., Voulgaraki M., Psiroukis V., Koutsiaras M., Kriezi O. et al. Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis // Smart Agricultural Technology. – 2023. – Vol. 5. – Art. 100323. – DOI: 10.1016/j.atech.2023.100323
2. Brugler S., Gardezi M., Dadkhah A., Rizzo D. M., Zia A., Clay S. A. Improving decision support systems with machine learning: Identifying barriers to adoption // Agronomy Journal. – 2023. – DOI: 10.1002/agj2.21432.
3. Zhai Z., Martínez J. F., Beltran V., Martínez N. L. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – Vol. 170. – Art. 105256. – DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.

References

1. Anastasiou E., Fountas S., Voulgaraki M., Psiroukis V., Koutsiaras M., Kriezi O. et al. Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis // Smart Agricultural Technology. – 2023. – Vol. 5. – Art. 100323. – DOI: 10.1016/j.atech.2023.100323
2. Brugler S., Gardezi M., Dadkhah A., Rizzo D. M., Zia A., Clay S. A. Improving decision support systems with machine learning: Identifying barriers to adoption // Agronomy Journal. – 2023. – DOI: 10.1002/agj2.21432.
3. Zhai Z., Martínez J. F., Beltran V., Martínez N. L. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – Vol. 170. – Art. 105256. – DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.