

В. П. Селиванова, Д. И. Комлач, В. В. Голдыбан, М. И. Курилович

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru*

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И СТАДИЙ ОНТОГЕНЕЗА СОРНЫХ РАСТЕНИЙ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Аннотация. В статье систематизированы морфологические признаки сорных растений, релевантные для задач автоматизированного распознавания на изображениях. Описаны четыре основных класса признаков – геометрические, архитектурные, поверхностные и динамические – и показано их взаимодополнение при формировании устойчивых дескрипторов. Обоснована необходимость учета онтогенетической изменчивости и стандартизации фенофаз с использованием шкал BBCH и Zadoks, а также адаптации этих шкал для сорных видов. На основе анализа выделены приоритетные группы сорняков для агроценозов Беларуси и предложены критерии отбора стадий развития для репрезентативных обучающих выборок.

Ключевые слова: распознавание растений, морфологические признаки, фенофаза, онтогенетическая динамика, прецизионное внесение гербицидов, автономное движение, техническое зрение.

V. P. Selivanova, D. I. Komlach, V. V. Holdyban, M. I. Kurylovich

*RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru*

ANALYSIS OF MORPHOLOGICAL FEATURES AND STAGES OF ONTOGENESIS OF WEEDS IN AUTOMATED RECOGNITION TASKS

Abstract. This article systematizes the morphological features of weeds relevant to automated image recognition tasks. Four main classes of features—geometric, architectural, surface, and dynamic—are described, and their complementarity in the formation of stable descriptors is demonstrated. The need to account for ontogenetic variability and standardize phenophases using the BBCH and Zadoks scales, as well as adapt these scales for weed species, is substantiated. Based on the analysis, priority weed groups for Belarusian agroecosystems are identified, and criteria for selecting developmental stages for representative training samples are proposed.

Keywords: plant recognition, morphological features, phenophase, ontogenetic dynamics, precision herbicide application, autonomous movement, machine vision.

Введение

Разработка системы распознавания растений для прецизионного внесения гербицидов в условиях автономного вождения требует целенаправленного исследования стадий развития сорных и культурных растений с единой прикладной целью: научить систему надежно различать культурное растение и сорняк в реальном времени и принимать безопасные решения о локальном внесении пестицидов [1]. В отличие от общей морфологической классификации, прикладное исследование фенофаз должно фокусироваться на тех визуальных критериях, которые прямо коррелируют с эффективностью обработки и риском повреждения культуры.

Практическая реализация требует многомасштабного сбора данных и аннотации: сочетания геометрических и архитектурных дескрипторов для быстрой детекции, микроструктурных и спектральных признаков для точной таксономии, а также временных рядов для оценки темпов роста и изменения чувствительности к гербицидам. Для условий автономного вождения критичны требования к датасету: высокая частота съемки, устойчивость к артефактам движения и теням, синхронизация мультисенсорных каналов (RGB, спектр, глубина) и разметка фенофаз, ориентированная на оперативные временные окна агротехнических операций.

Основная часть

Распознавание растений на изображениях основывается на выделении информативных морфологических признаков, позволяющих не только определить вид, но и корректно интерпретировать текущее состояние растения. Поэтому формирование обучающих выборок требует учета как структуры органов, так и динамики их изменения.

Геометрические признаки включают размеры и формы органов, контуры, углы и пропорции, обеспечивая модель крупномасштабными ориентирами и хорошей наблюдаемостью в полевых условиях. Архитектурные признаки характеризуют пространственную организацию растения – тип ветвления, расположение листьев и общую компоновку, отражающие генетические особенности и адаптивные реакции. Эти характеристики легко извлекаются из изображений, обладают высокой наблюдаемостью в полевых условиях и позволяют моделям уверенно выделять крупномасштабные морфологические шаблоны.

Признаки поверхности и микрорельефа описывают эпидермальные структуры, такие как трихомы, устьица и текстура поверхности. Эти элементы обладают высокой таксономической ценностью и менее изменчивы под влиянием внешних факторов. Динамические и временные признаки фиксируют изменения формы, окраски и структуры во времени, включая сезонные вариации и темпы роста, что позволяет учитывать «поведение» растения в онтогенезе. Эти параметры обладают высокой таксономической значимостью, поскольку менее подвержены влиянию внешних условий по сравнению с некоторыми макроморфологическими формами. Схематическая классификация морфологических признаков сорных растений представлена на рисунке 1.

Границы между категориями признаков не всегда четкие: для методики распознавания это означает необходимость многомасштабного подхода, при котором формальные характеристики разных уровней объединяются в комплексные признаки, что повышает устойчивость алгоритма к внешней вариативности, но одновременно увеличивает требования к объему и качеству аннотированных данных.

Учет онтогенетической изменчивости признаков является ключевым элементом классификации, поскольку морфология растения существенно меняется на разных этапах развития. Для формирования репрезентативных выборок требуется точная маркировка фенофаз, иначе модели теряют переносимость между возрастными группами и условиями выращивания.

Выделение стадий развития основано на представлении онтогенеза как последовательности физиологически и морфологически различимых фаз, формализуемых в виде шкал. Наиболее широко применяются универсальная система BBCH (от нем. Biologische Bundesanstalt, Bundes-sortenamt und Chemische Industrie – Биологическая федеральная служба, Федеральное ведомство по сортам растений и химическая промышленность) и для злаков шкала Zadoks [2]. Их использование обеспечивает стандартизированное описание фенофаз и сопоставимость данных между



Рисунок 1 – Классификация морфологических признаков сорных растений

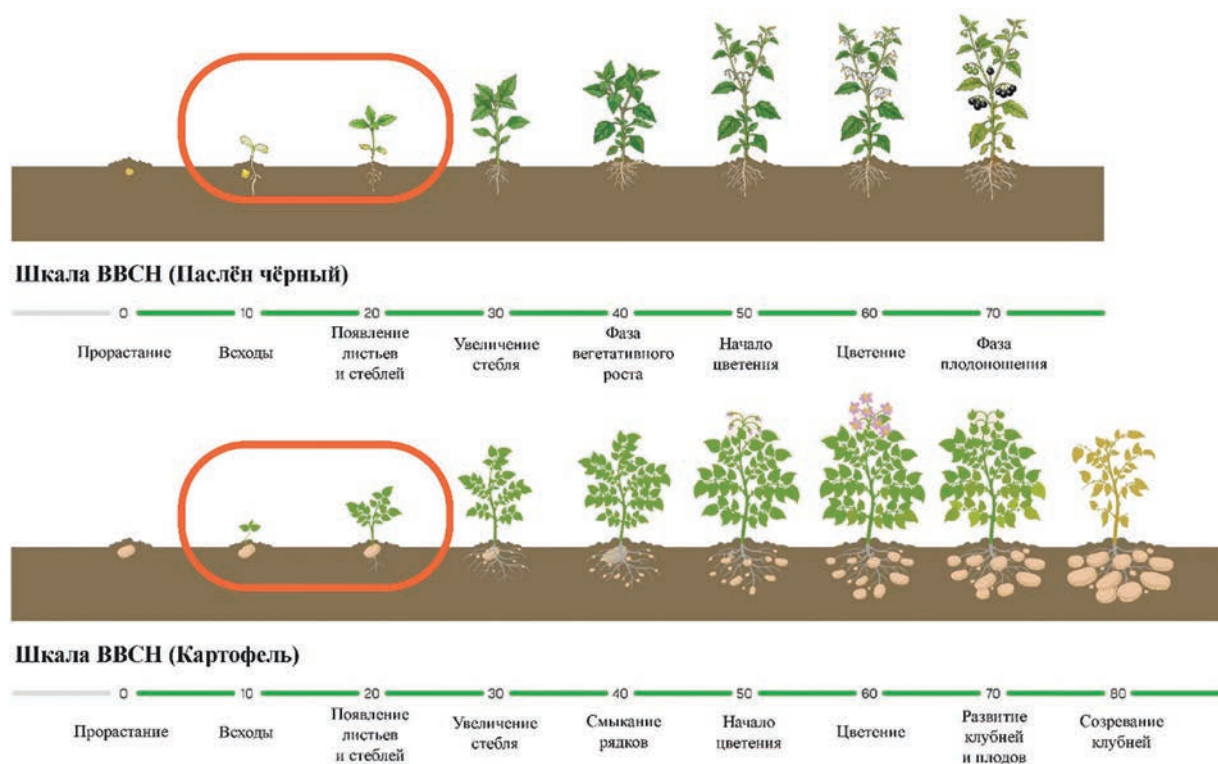


Рисунок 2 – Сравнение условных шкал BBCH

исследованиями и агротехническими условиями. На рисунке 2 показано сравнение разработанных шкал BBCH для картофеля и паслена черного – вида, выбранного благодаря его морфологическому сходству с картофелем.

Для культурных растений шкалы BBCH детализированы, тогда как для сорных видов их приходится адаптировать из-за разнообразия жизненных стратегий и темпов роста. Такая адаптация включает уточнение визуальных критериев фенофаз и при необходимости введение дополнительных подстадий, чтобы корректно выделять ключевые этапы, важные для контроля сорняков. Сравнение BBCH-шкал показало, что наиболее эффективным для технического зрения является диапазон ранних фаз (BBCH 10–19): в этот период видоспецифичные признаки наиболее выражены, а вариабельность минимальна. На средних стадиях (BBCH 30–39) различия сохраняются, но усложняются из-за перекрытия листьев, теневых артефактов и увеличения биомассы, что снижает точность классификации и требует более продвинутых методов обработки изображений.

Формирование перечня сорных растений и выбор стадий их развития для обучающей выборки должны опираться на реальную структуру агроценозов, характерных для сельскохозяйственного производства Беларуси [3]. Приоритетными являются виды, наиболее распространенные в посевах и обладающие высокой конкурентоспособностью, включая однолетние и многолетние двудольные сорняки, злаковые виды и устойчивые корневищные формы.

Однолетние двудольные сорняки (лебеда белая, звездчатка средняя, пастушья сумка, мелкопестник однолетний и др.) формируют массовые всходы и активно конкурируют с культурой в ранневесенний период. Наиболее информативны для распознавания их ранние фазы, когда четко различимы форма семядольных и первых настоящих листьев, жилкование, степень опушения и архитектура розетки.

Многолетние двудольные виды (осот, подорожник, полынь, золотарник канадский, одуванчик) отличаются устойчивостью и вегетативным размножением. Для их идентификации ключевыми являются признаки отрастания из подземных органов: форма и текстура листьев, строение розетки, особенности побегов и опушения.

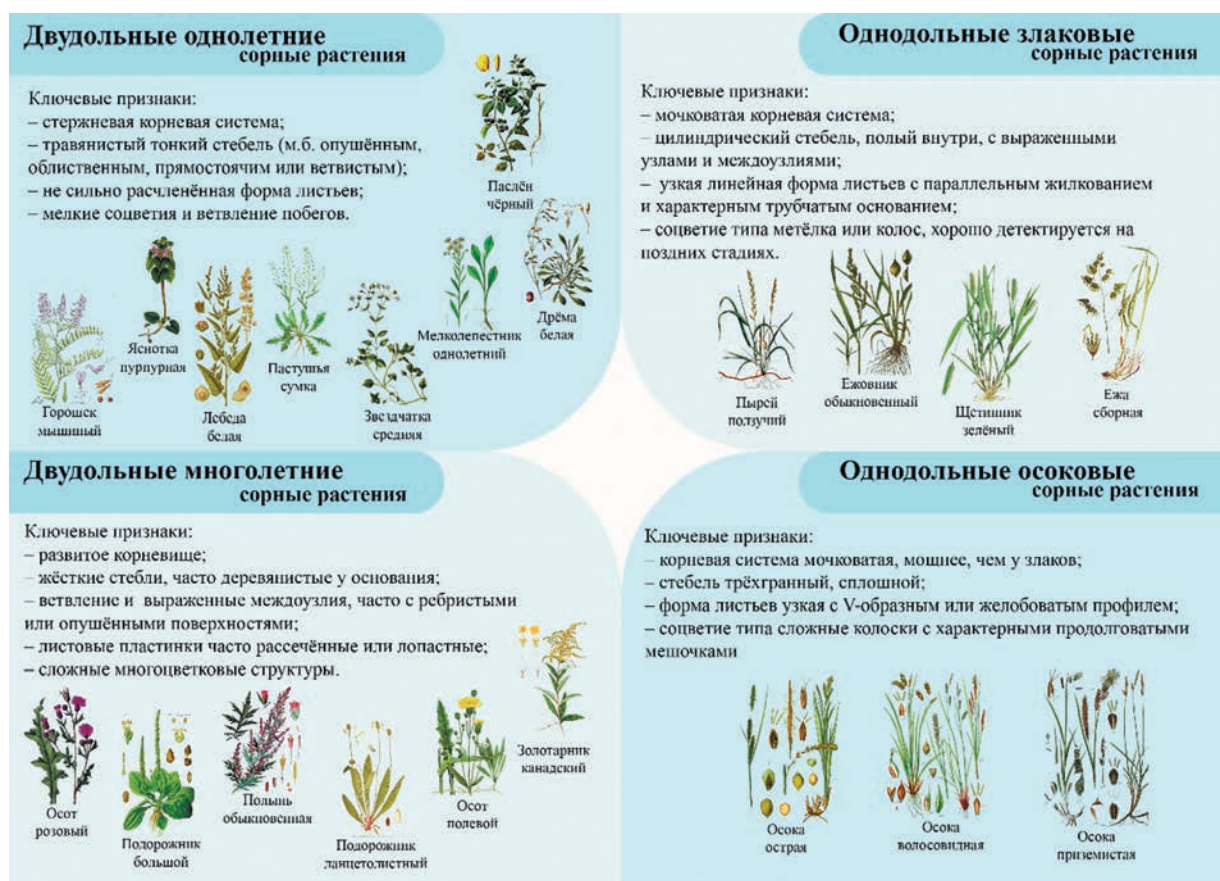


Рисунок 3 – Таксономо-морфологическая структура сорных растений для задач автоматизированного распознавания

Злаковые сорняки (пырей ползучий, щетинник, ежовник) представляют сложную группу из-за сходства с культурными злаками на ранних стадиях. Существенными признаками являются линейная форма листьев, характер жилкования и опушения, расположение листьев, особенности корневищ и узлов, позволяющие отличить сорняки до начала кущения.

Отдельную категорию составляют декоративные и инвазивные виды (вьюнок полевой, лядвенец рогатый, василек луговой, звербой продырявленный), характеризующиеся высокой морфологической вариативностью. Для их распознавания наиболее значимы форма листьев, архитектура побегов и структура соцветий. Схема таксономо-морфологической структуры сорных растений представлена на рисунке 3.

Практическое применение классификации морфологических признаков в системах машинного зрения требует их формализации в измеримые дескрипторы: контурные и формальные показатели, спектрально-текстурные характеристики, метрические индексы и статистику микроструктур. Подбор дескрипторов определяется задачей: для широкого распознавания видов эффективна комбинация масштабно-инвариантных признаков и многоканальных данных, тогда как для различения близкородственных видов требуется усиленный акцент на микроструктурах и временной динамике.

Заключение

Исследованы морфологические признаки ключевых сорных видов, включая сопоставление их фенологических шкал ВВСН с культурными растениями. Комплексный учет геометрических, архитектурных, поверхностных и динамических признаков обеспечивает устойчивость систем машинного зрения к внешней вариативности и повышает точность распознавания сор-

ных растений. Для практического применения разработаны репрезентативные выборки сорных растений, отражающие структуру агроценозов региона, и сделан акцент на ранних фазах развития, где видоспецифичные признаки наиболее выражены.

Авторы выражают благодарность за поддержку и финансирование данного исследования Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. Weed recognition using deep learning techniques on class-imbalanced imagery / A. S. M. Hasan , F. Sohel, D. Diepeveen [et al.] // Crop and Pasture Science. – 2022. – Vol. 74. – № 6. – P. 628–644. – DOI: 10.1071/CP21626.
2. Meier, U. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants—history and publications / U. Meier, H. Bleiholder, L. Buhr [et al.] // Journal für Kulturpflanzen. – 2009. – Vol. 61. – № 2. – P. 41–52.
3. Справочник сорных растений / Национальная академия наук Беларуси, Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию, Институт защиты растений ; сост. А. В. Сташкевич [и др.] ; под общ. ред. Е. А. Якимович. – Мн. : Колорград, 2025. – 121 с.