

Развитие фунгицид-устойчивости и ее обнаружение на примере *Microdochium nivale*

С.Н. Пономарев^{1*}, О.А. Гоголева², М.Л. Пономарева¹, В.Ю. Горшков², Н.Ш. Гараева¹,
Д.Д. Сайфутдинова¹, Л.В. Илалова¹

¹ ТамНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

² КИББ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

* snponomarev@yandex.ru

Microdochium nivale – психротолерантный сапротрофный фитопатогенный гриб, поражающий зерновые культуры и вызывающий розовую снежную плесень. Он активно колонизирует растения-хозяева весь вегетационный период, но основной урон наблюдается под снежным покровом или после его таяния, что может приводить к серьезным потерям урожая, особенно в холодных и влажных регионах. Несмотря на активное применение фунгицидов, устойчивость патогена к препаратам увеличивается, включая снижение эффективности бензимидазольных фунгицидов, впервые зафиксированное в 1988 г. Основные механизмы устойчивости связаны с генетическими изменениями, такими как мутации в генах-мишенях. Например, зафиксированы мутации β-тубулина (E198A) у *M. nivale* в Германии и Польше, вызывающие резистентность к бензимидазолу, а мутация Y137F в CYP51 снижает эффективность триазолов. Сверхэкспрессия гена MgABC1 указывает на устойчивость к стробилуринам. Фунгицидная устойчивость выявляется через фенотипические тесты *in vitro* и полевые эксперименты.

Цель: Определить уровень устойчивости к фунгицидам и оценить эффективность препаратов против снежной плесени (*M. nivale*), обосновать важность анализа молекулярных механизмов адаптации грибов.

Материалы и методы: В настоящем исследовании был проведен скрининг штаммов *M. nivale* на устойчивость к различным фунгицидам с использованием картофельно-сахарозного агара, обогащенного фунгицидами. Для экспериментов были отобраны препараты с различными механизмами действия, представляющие разные группы химических соединений: ингибиторы электрон-транспортной цепи (азоксистробин), β-тубулина (карбендазим), 14-α-деметиляции стеролов (тебуконазол), а также предполагаемые лиганды гистидинкиназ (флудиоксонил). Для адаптации штаммов культуры с начальной восприимчивостью последовательно культивировали в среде с возрастающими концентрациями фунгицидов. Эффективность препаратов и фунгицид-устойчивых штаммов тестировалась в поле с обработкой семян и опрыскиванием растений при минимальных/максимальных дозах и различных уровнях инфекционной нагрузки. Полевой участок, свободный от фоновой инфекции, был разделен на шесть блоков: четыре блока предназначались для внесения штаммов *M. nivale*, устойчивых к азоксистробину, карбендазиму, тебуконазолу и флудиоксонилю соответственно; пятый блок включал штаммы, не обладающие устойчивостью; шестой блок был контрольным (без внесения патогена). Методика искусственного инфицирования основывалась на ранее разработанном подходе (Ponomareva et al., 2022), что обеспечивало надежность и воспроизводимость экспериментальных условий.

Результаты: В естественных условиях развития розовой снежной плесени для обработки семян наибольший эффект показали карбендазим, тебуконазол и флудиоксонил, причем доза использования препарата не имела существенного значения. Для опрыскивания по вегетации азоксистробин и флудиоксонил имели лучший защитный эффект как в максимальной, так и в минимальной дозе. Наименьшим поражением розовой снежной плесенью выделялись варианты после комбинированной обработки карбендазимином. Наибольшей резистентностью выделялись штаммы устойчивые к тебуконазолу, которые проявили низкую чувствительность к испытываемым препаратам, особенно при использовании в минимально рекомендуемой дозе. Выявленные карбендазим-резистентные изоляты демонстрировали низкую чувствительность к фунгицидам, особенно при низких нормах их использования. Внесение фунгицид-устойчивых штаммов в почву приводит к существенному поражению растений, которое слабо преодолевается как обработкой семян рекомендуемыми дозами фунгицидов, так и обработкой вегетирующих растений до начала наступления зимовки. Минимальные дозы опрыскивания и комбинированной обработки не приводят к адекватной защите растений. Двукратная фунгицидная обработка в максимальной дозе способствовала лучшему защитному эффекту.

Выводы: В ходе полевых экспериментов было зафиксировано снижение эффективности фунгицидной обработки против снежной плесени. Полученные данные позволили провести ранжирование фунгицидов по степени их воздействия на возбудителя и разработать оптимальные агротехнические приемы их использования. Исследования подтвердили широкое распространение фунгицид-резистентных популяций *M. nivale*, установили корреляцию между резистентностью и вирулентностью, и обосновали необходимость изучения молекулярных механизмов адаптации гриба к фунгицидам.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00086.