11. Ефимов В.М., Ковалева В.Ю. Многомерный анализ биологических данных. – СПб, 2008. – 98 с.
12. Cheshkova A.F., Stepanov P.I., Aleynikov A.F., Grebennikova I.G., Ponomarenko V.I. A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability// Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii=Vavilov Journal of Genetics and Breeding. – 2020. – Vol. 24(3). – P. 267-275. DOI 10.18699/VJ20.619.
13. Habgood, R.M. Estimation of genetic diversity of self-fertilizing cereal cultivars based on genotype-environment interactions // Euphytica. – 1997. – Vol. 26 (2). – P. 485-489.
14. Мартынов С.П. Оценка экологической пластичности сортов сельскохозяйственных культур // С.-х. биология. – 1989. – № 3. – С. 124-128.

УДК 632.4.01/08:535.37

DOI: 10.26898/agroinfo-2021-60-64

Гурова Т.А., Свежинцева Е.А., Чесноченко Н.Е.,
СибФТИ СФНЦА РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск

КРОСС-АДАПТАЦИЯ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ ПРИ ГИПЕРТЕРМИИ И ИНФИЦИРОВАНИИ *Bipolaris sorokiniana* Shoem.

В статье приводятся результаты исследований адаптивных реакций 10-суточных проростков сортов пшеницы Новосибирская 18, Новосибирская 44, Сибирская 21 и Омская 18 при комбинированном стрессе. Установлено, что предварительная гипертермия семян повышала устойчивость проростков по типу кросс-адаптации к последующему действию *B. sorokiniana* (снижение УЭП до 71,9 %, ИРБ до 29,7 %, ингибирования накопления биомассы и роста до 95,4 %). Выявлена сортовая специфика формирования адаптивных реакций при совместном действии стрессоров. Протекторный эффект гипертермии наиболее выражен у сортов Новосибирская 18 и Омская 18.

Ключевые слова: мягкая яровая пшеница, кросс-адаптация, обыкновенная корневая гниль злаков, гипертермия.

Введение. В селекции и растениеводстве необходимо изучение адаптивного потенциала сорта одновременно к нескольким стрессовым факторам среды. В Сибирском регионе одними из лимитирующих урожайность пшеницы факторов являются резкие колебания температур, особенно в ранневесенний период вегетации, и различного вида инфекции. Одним из наиболее распространенных заболеваний является обыкновенная корневая гниль злаков, возбудителем которой *Bipolaris sorokiniana* Shoem. (сокр. *B. sorokiniana*) заселено 70-75 % пахотных черноземов Западной Сибири, что на 10-15 % снижает урожай и ухудшает его качество [1]. В последние годы появились сообщения об усилении вредоносности болезни в лесостепи Западной Сибири [2].

Известно о неоднозначной реакции растений на комбинированный биотический и абиотический стресс – от усиления до компенсации негативного влияния стрессоров, возникающего при их одновременном действии [3, 4]. При последовательном действии стрессоров возникает кросс-адаптация – процесс повышения устойчивости организма к конкретному стрессовому фактору в результате адаптации к фактору иной природы. По современным представлениям кросс-адаптация базируется в первую очередь на функционировании в растениях общих (неспецифических) механизмов устойчивости к двум или нескольким факторам различной природы. Эти механизмы направлены на экономию энергетических и структурных ресурсов растительных организмов в стрессовых условиях [5]. Предполагается, что индуцирование кросс-адаптации обусловлено перекрытием сигнальных путей и систем растений, в первую очередь антиоксидантной защитной системы [6, 7].

Цель исследований – изучить адаптивные реакции сортов мягкой яровой пшеницы при раздельном и совместном действии возбудителя обыкновенной корневой гнили и повышенной температуры для оценки их устойчивости.

Материалы и методы. Экспериментальная работа выполнена в лаборатории изучения физических процессов в агрофитоценозах Сибирского физико-технического института СФНЦА РАН.

Для изучения адаптивных реакций проводили вегетационные опыты (водные культуры) в лабораторных условиях на проростках районированных сортов яровой пшеницы: Новосибирская 44, Новосибирская 18, Сибирская 21 – селекции СибНИИРС–ИЦиГ СО РАН и Омская 18 – селекции Омского АНЦ.

Варианты опытов:

- а) контроль (семена без прогрева) и повышенная температура (прогрев семян при + 43°C);
- б) семена без прогрева + инфицирование *B. sorokiniana*;
- в) прогрев семян + инфицирование *B. sorokiniana*.

Прогрев предварительно отобранных и простерилизованных семян проводили в течение 20 минут в горячей воде на водяной бане по методике ВИР [8]. Инфицирование семян проводили в фазе прорастания (на третьи сутки культивирования) конидиальной суспензией смеси среднепатогенных изолятов *B. sorokiniana*, приготовленной на 0,1%-ном водном агаре (по одной капле на зерно).

Уровни стрессовых нагрузок – конидиальная суспензия *B. sorokiniana* 5000 конидий на зерно и температура + 43 °C – определены нами в специально проведенных вегетационных опытах, как позволяющие дифференцировать сорта пшеницы сибирской селекции при оценке их устойчивости к данным стрессовым факторам [9, 10].

Далее проростки выращивали в климатической камере «Биотрон-7» в рулонной культуре на водопроводной воде при фотопериоде «день – ночь» 16 и 8 часов соответственно, освещенности 20000 и 0 лк («день – «ночь»), температуре 22 °C и 18 °C («день – «ночь»), влажности 60 %.

Адаптивную реакцию 10-суточных проростков сортов пшеницы оценивали по комплексу показателей: изменению проницаемости клеточных мембран по удельной электропроводности (УЭП) настояв листьев, индексу развития болезни (ИРБ), линейным размерам и накоплению сырой и сухой биомассы ростков и корней [11]. Удельную электропроводность измеряли на лабораторном кондуктометре edge EC, HANNA Instruments (Германия).

Реакцию сорта определяли по относительному изменению измеряемых параметров проростков после экспозиции растений на стрессорах. Чем меньше изменения параметров, тем выше устойчивость сорта в исследуемой группе сортов. Повторность опытов 4-6-кратная. Репрезентативная выборка – 200 проростков в каждом варианте опыта. Экспериментальные данные математически обрабатывались с помощью стандартных статистических программ. Ошибка среднего не превышала 3-5 %. Проведено три серии экспериментов.

Результаты и обсуждения.

Адаптивные реакции сортов пшеницы при инфицировании B. sorokiniana без предварительного прогрева семян. При действии возбудителя корневой гнили у злаковых растений модифицируются процессы запасаения энергии, дыхания, активности ферментов, нарушается целостность мембран, что приводит к частичной утечке электролитов из клеток [12]. Уровень толерантности сортов к патогену определяется их реакцией на стресс во время роста и развития.

Инфицирование непрогретых семян конидиальной суспензией изолятов *B. sorokiniana* привело к увеличению степени поражения первичных корней и coleoptile проростков, ИРБ достоверно увеличился у всех сортов в диапазоне от 81,2 % (сорт Новосибирская 44) до 180,7 % (сорт Новосибирская 18) по сравнению с контролем (таблица 1). Действие патогена вызывало нестабильность клеточных мембран листьев проростков, показатель УЭП у всех сортов увеличился от 22,9 % (сорт Сибирская 21) до 65,7 % (сорт Новосибирская 18) по сравнению с контролем. При этом наблюдалось синхронное изменение показателей УЭП и ИРБ. При действии патогена на ростовые процессы и накопление сырой и сухой биомассы выявлена различная сортовая реакция. Патоген не влиял на рост и накопление сырой и сухой биомассы проростков сортов Сибирская 21 и Новосибирская 44 за исключением показателей сырой и сухой биомассы корней и проростка у сорта Новосибирская 44 – достоверное снижение на 17,1–29,7 % по сравнению с контролем. У сортов Новосибирская 18 и Омская 18 отмечено достоверное снижение роста и накопления биомассы по сравнению с контролем, наиболее выраженное у сорта Новосибирская 18, особенно сухой биомассы ростков и сырой

биомассы корней (36,1 % и 37,2 %, соответственно). В результате проведенного ранжирования изменения показателей проростков, устойчивость сортов к *B. sorokiniana* изменялась в ряду по убыванию: Сибирская 21 – Новосибирская 44 – Омская 18 – Новосибирская 18.

Таблица 1

Показатели проростков сортов яровой пшеницы при действии *B. sorokiniana*,
без нагрева семян ($M \pm m$)

Вариант	Показатели				
	Индекс развития болезни (%)	Удельная электропроводность (См/м)	Длина проростка (мм)	Сырая биомасса проростка (мг)	Сухая биомасса проростка (мг)
Новосибирская 44					
Контроль	1,6±0,02	4,3±0,01	24,6±0,7	176,4±3,4	24,0±0,6
<i>B. sorokiniana</i>	2,9±0,03*	5,9±0,01*	21,9±0,4*	145,6±1,5*	19,9±0,3*
Новосибирская 18					
Контроль	1,5±0,01	3,5±0,01	33,4±0,5	185,1±5,2	25,0±1,3
<i>B. sorokiniana</i>	4,2±0,03**	5,8±0,01*	25,3±1,2*	128,1±2,2*	16,0±0,1*
Омская 18					
Контроль	2,5±0,03	4,4±0,02	27,3±0,7	190,0±1,4	23,9±0,6
<i>B. sorokiniana</i>	6,0±0,03*	6,5±0,03*	22,7±0,4*	153,1±1,0*	19,4±1,1*
Сибирская 21					
Контроль	1,8±0,02	4,8±0,02	25,9±0,9	165,9±3,5	23,1±1,3
<i>B. sorokiniana</i>	4,0±0,03*	5,9±0,01*	26,9±1,1	174,7±2,8	22,9±0,4
Примечание * – различия с контролем достоверны на 5-процентном уровне значимости; ** – различия с контролем достоверны на 1-процентном уровне значимости					

У более устойчивого сорта Сибирская 21 при действии патогена наблюдали только достоверное изменение трех показателей – увеличение УЭП, ИРБ и сухой биомассы корней на 22,9 %, 122,0 % и 15,7 %, соответственно, при недостоверном изменении остальных показателей.

Адаптивные реакции сортов пшеницы при инфицировании B. sorokiniana после предварительного прогрева семян. Известно, что температура влияет на устойчивость растений к болезням. Высокая температура чаще подавляет иммунитет растений или их устойчивость к болезням [13, 14]. В наших экспериментах после предварительного прогрева семян и последующего их инфицирования *B. sorokiniana* мы наблюдали кросс-адаптацию, выраженную как ослабление патологического действия возбудителя болезни на проростки, а также сортовую специфику проявления ответных реакций (таблица 2).

Таблица 2

Показатели проростков сортов яровой пшеницы при действии *B. sorokiniana*,
с нагревом семян до + 43°C) ($M \pm m$)

Вариант	Показатели				
	Индекс развития болезни (%)	Удельная электропроводность (См/м)	Длина проростка (мм)	Сырая биомасса проростка (мг)	Сухая биомасса проростка (мг)
Новосибирская 44					
Контроль	1,4±0,03	5,7±0,01	21,5±0,06	147,1±2,9	19,2±0,5
<i>B. sorokiniana</i>	2,2±0,04*	2,9±0,01*	21,6±0,8*	136,9±2,0*	19,8±0,4
Новосибирская 18					
Контроль	1,2±0,02	3,8±0,04	28,4±0,07	157,0±1,6	21,6±1,0
<i>B. sorokiniana</i>	3,1±0,09**	3,1±0,01	28,1±2,2	134,3±1,2*	20,1±0,5
Омская 18					
Контроль	1,7±0,03	4,1±0,01	24,7±1,2	173,0±4,1	24,3±1,4
<i>B. sorokiniana</i>	3,9±0,04*	4,7±0,01*	24,5±0,8*	160,0±2,0	21,3±0,4*
Сибирская 21					
Контроль	1,4±0,02	6,9±0,01	22,6±1,8	149,1±6,3	20,6±1,3
	2,7±0,05*	5,5±0,02*	22,9±0,3	141,0±3,1	20,4±0,7
Примечание * – различия с контролем достоверны на 5-процентном уровне значимости; ** – различия с контролем достоверны на 1-процентном уровне значимости					

Установлено снижение ингибирования следующих показателей: УЭП у всех сортов в диапазоне от 12,0 % (сорт Сибирская 21) до 71,9 % (сорт Новосибирская 18); ИРБ у всех сортов от 12,6 % (сорт Новосибирская 18) до 29,7 % (сорт Новосибирская 44); роста и накопления сырой и сухой биомассы у сортов Новосибирская 18, Омская 18 от 34,0 до 95,4 % по сравнению с вариантом без прогрева семян. У сортов Сибирская 21 и Новосибирская 44 достоверного влияния предварительной гипертермии семян на рост и накопление биомассы проростков не выявлено.

Таким образом, у сортов Новосибирская 18 и Омская 18 наблюдалась более выраженная реакция на биостресс в отсутствии гипертермии семян, и в то же время более сильная адаптационная способность к действию патогена после температурного закаливания семян, особенно у сорта Новосибирская 18 (рисунок 1).

Рисунок 1. Изменение параметров проростков сорта Новосибирская 18 при инфицировании *B. sorokiniana*

Сорта Сибирская 21 и Новосибирская 44 оказались более устойчивыми к действию патогена также после прогрева семян — достоверно изменялись только показатели УЭП и ИРБ по сравнению с контролем. Однако кросс-адаптация проявлялась и у них, как снижение ингибирования достоверно меняющихся показателей УЭП, ИРБ и сухой биомассы ростков, корней и проростков в диапазоне от 23,8 % до 91,7 % по сравнению с вариантом без прогрева семян. Можно предположить, что предварительный прогрев семян активизирует защитные механизмы растений и поддерживает их длительное время в активном состоянии. Последующее действие патогена повышает уровень сигнальных молекул и уже активизированные защитные системы пытаются предотвратить развитие биотического стресса.

Выводы.

Действие *B. sorokiniana* на проростки четырех сортов пшеницы вызывало в основном снижение адаптационной способности и потерю устойчивости сортов, выраженную как ингибирование роста и накопления сырой и сухой биомассы до 37,2 %, увеличение ИРБ и УЭП до 180,7 % и 65,7 %, соответственно, по сравнению с контролем. Выделен более устойчивый сорт к *B. sorokiniana* — Сибирская 21.

Предварительная гипертермия семян повышала устойчивость проростков (по типу кросс-адаптации) к последующему действию *B. sorokiniana*. Это выражалось в снижении ингибирования УЭП до 71,9 %, ИРБ до 29,7 %, снижении ингибирования накопления биомассы и ростовых процессов до 95,4 % по сравнению с вариантом без прогрева семян. Наиболее выражен стимулирующий эффект гипертермии при последующем действии *B. sorokiniana* у сортов Новосибирская 18 и Омская 18.

Использованные источники:

1. Чулкина В.А., Торопова Е.Ю., Стецов Г.Я. Эпифитотиологические основы систем защиты растений: монография. — Новосибирск, 2002. — 566 с.
2. Васильева Н.В., Синешков В.Е. Причины усиления распространения корневых гнилей всходов яровой пшеницы в лесостепи Приобья // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). — 2016. — № 4(41). — С. 13-18.

3. Suzuki N., Rivero R.M., Shulaev V., Blumwald E., Mittler R. Abiotic and biotic stress combinations // *New Phytologist*. – 2014. – Vol. 203(1). – P. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12797>
4. Zandalinas S.I., Mittler R., Balfagón D., Arbona V., Gómez-Cadenas A. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures // *Physiologia Plantarum*. – 2018. – Vol. 162. – P. 2–12. DOI: [10.1111/ppl.12540](https://doi.org/10.1111/ppl.12540).
5. Кузнецов В.В. Общие системы устойчивости и трансдукция стрессового сигнала при адаптации растений к абиотическим факторам // *Вестник Нижегородского университета*. – 2001. – Т. 48. – № 5. – С. 65–69.
6. Колупаев Ю.Е., Горелова Е.И., Ястреб Т.О. Механизмы адаптации растений к гипотермии: роль антиоксидантной системы // *Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Біологія*. – 2018. – Вип. 1. – С. 6–33.
7. Zhong-Guang L., Ming G. Mechanical stimulation-induced cross-adaptation in plants: An overview // *Journal Plant Biology*. – 2011. – Vol. 54. – P. 358–364. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12374-011-9178-3>
8. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: метод. рекомендации /под. ред. Г.В. Удовенко. – Л., 1988. – 228 с.
9. Пат. RU №2625027, 11.07.2017. Способ определения относительной устойчивости сортов мягкой яровой пшеницы к возбудителю обыкновенной корневой гнили злаков / Гурова Т.А., Альт В.В., Луговская О.С.
10. Гурова Т.А., Луговская О.С., Свежинцева Е.А. Адаптивные реакции проростков пшеницы, дифференцирующие сорта при гипертермии // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. – 2019. – Т.49. – №3. – С. 31-40. DOI: [10.26898/0370-8799-2019-3-4](https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-3-4)
11. Гурова Т.А., Денисюк С.Г., Луговская О.С., Свежинцева Е.А., Минеев В.В. Методические положения ранней диагностики устойчивости яровой пшеницы и ячменя к совокупному действию стрессоров. – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2017. – 62 с.
12. Гурова Т.А., Свежинцева Е.А., Чесноченко Н.Е. Адаптация сортов пшеницы при гипертермии, хлоридном засолении и инфицировании *Bipolaris sorokiniana* Shoem. // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. – 2020. – № 6. – С. 12-25. DOI: [10.26898/0370-8799-2019-6-2](https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-6-2)
13. Ramegowda V, Senthil-Kumar M. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: Mechanistic understanding from drought and pathogen combination // *Journal of Plant Physiology*. – 2015. – Vol. 176. – P. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.11.008>
14. Абрамчик Л.М., Сердюченко Е.В., Пашкевич Л.В., Макаров В.Н., Зеневич Л.А., Кабашникова Л.Ф. Стрессовые реакции зеленых проростков ячменя в условиях инфицирования патогенным грибом *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem и повышенной температуры // *Вестні нацыянальнай акадэміі навук Беларусі*. – 2015. – №2. – С. 38–43.

УДК 632.4.01/.08:535.37

DOI: [10.26898/agroinfo-2021-64-69](https://doi.org/10.26898/agroinfo-2021-64-69)

Гурова Т.А.¹, Елкин О.В.¹, Дубровская О.А.²,
¹СибФТИ СФНЦА РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск
²ФИЦ ИВТ СО РАН, г. Новосибирск

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОРАЖЕНИЯ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ МУЧНИСТОЙ РОСОЙ

В лабораторных экспериментах с помощью гиперспектральной камеры были получены спектральные характеристики трех сортов яровой пшеницы сибирской селекции, пораженных мучнистой росой (*Blumeria graminis* (DC.) Speer) в полевых условиях. Установлена сортоспецифичность отражательной способности листьев пшеницы, инфицированных мучнистой росой при одинаковой степени поражения. Выявлено изменение отражательной способности листьев в зависимости от степени поражения болезнью. Определен наиболее информативный спектральный признак (вегетационный индекс) для обнаружения мучнистой росы.

Ключевые слова: болезни пшеницы, мучнистая роса, гиперспектральные данные, спектральные характеристики, вегетационные индексы.

Введение. Мучнистая роса пшеницы особо вредоносное заболевание, широко распространенное во всем мире, в России, а также в Западной Сибири [1, 2]. Возбудитель мучнистой росы *Blumeria graminis* (DC.) Speer. развивается преимущественно на молодых активно вегетирующих растениях. Признаки болезни проявляются на листьях, междоузлиях стебля и колосковых чешуйках в виде белого, рыхлого мучнистого налета, состоящего из конидиеносцев и конидий гриба [3].

Вредоносность болезни проявляется в уменьшении ассимиляционной поверхности листьев, что приводит к преждевременному их усыханию, задержке колошения, ослаблению