

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОТОПЕРИОДА НА СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В КАПУСТНЫХ РАСТЕНИЯХ РОДА *BRASSICA RAPA* L.

К. В. Егорова, В. И. Дубовицкая, Ю. В. Хомяков, Ю. В. Чесноков
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14
E-mail: kseniia.v.egorova@gmail.com

Поступила в редакцию 26 марта 2021 г., принята к печати 24 мая 2021 г.

Капустные (*Brassicaceae*) – семейство, объединяющее многие широко возделываемые сельскохозяйственные культуры с ценным биохимическим составом. Важными компонентами биохимического состава капустных являются микроэлементы – вещества, присутствующие в относительно малых количествах, но необходимые для нормального развития растений и здорового питания человека.

Целью данной работы являлось изучение влияния фотопериода на содержание эссенциальных микроэлементов (меди, железа, марганца и цинка) в капустных культурах. На примере двух картирующих популяций удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L., выращенных в условиях регулируемой агроэкосистемы, установлено, что содержание микроэлементов – высоко варьирующий признак, на формирование которого оказывает влияние как генотип, так и факторы окружающей среды. Полученные результаты можно использовать в генетико-селекционной работе, в том числе для создания новых генотипов, линий и сортов с ценным биохимическим составом, адаптированных к выращиванию в конкретных фотопериодических условиях.

Ключевые слова: капустные культуры, *Brassica rapa* L., картирующие популяции удвоенных гаплоидов, регулируемые условия, фотопериод, микроэлементный состав.

STUDY OF PHOTOPERIOD EFFECT ON MICROELEMENTS CONTENT IN CABBAGE PLANTS OF *BRASSICA RAPA* L.

K. V. Egorova, V. I. Dubovitskaya, Yu. V. Khomyakov, Yu. V. Chesnokov
Agrophysical Research Institut,
14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220, Russia
E-mail: kseniia.v.egorova@gmail.com

Cabbage (*Brassicaceae*) is a family that unites many widely cultivated agricultural crops with a valuable biochemical composition. The important components of cabbage biochemical composition are microelements - substances that are present in relatively small quantities, but necessary for the normal development of plants and healthy human nutrition.

The aim of this work was to study the photoperiod effect on the content of essential microelements (copper, iron, manganese and zinc) in cabbage crops. On the example of two mapping populations of *Brassica rapa* L. doubled haploids grown in a regulated agroecosystem, it was found that the content of microelements is a highly variable parameter, influenced by both genotype and environmental factors. The obtained results can be used in genetic selection work, including the creation of new genotypes, lines and varieties with a valuable biochemical composition and adapted to growing under specific photoperiodic conditions.

Key words: cabbage, *Brassica rapa* L., mapping populations of doubled haploids, controlled conditions, photoperiod, microelement composition.

ВВЕДЕНИЕ

Семейство *Brassicaceae* (Капустные), ранее известное как *Cruciferae* (Крестоцветные), объединяет многие экономически значимые виды, широко возделываемые во всем мире. В данную группу входит большое количество сельскохозяйственных культур: белокочанная капуста, брокколи, цветная капуста, репа, горчица, а также масличный рапс и многие другие (Favela-González, 2020). К капустным относится множество овощных, масличных, пряных и кормовых культур, что делает представителей семейства идеальными объектами для изучения различных хозяйственно ценных признаков

(Артемьева и др., 2012; Артемьева и др., 2015). В течение последних десятилетий увеличивается потребительский спрос на продукты, богатые питательными и биологически активными веществами, оказывающими благоприятное влияние на здоровье человека. Растения семейства *Brassicaceae* являются источниками жизненно необходимых природных биологически активных веществ, в том числе микроэлементов (Aires, 2015).

К микроэлементам относятся такие химические элементы, которые содержатся в относительно малых количествах. Их содержание в растениях выражается в тысячных и сотых долях процента. При этом

микроэлементы оказывают существенное влияние на физиологические процессы: нехватка микроэлементов может приводить к различным отклонениям в росте и развитии, а также к снижению урожайности (Битюцкий, 2020). Медь, марганец, железо и цинк являются ключевыми микроэлементами, необходимыми для нормального функционирования всех живых организмов.

Медь (Cu) является эссенциальным, то есть жизненно необходимым микроэлементом, который участвует в ферментативных окислительно-восстановительных реакциях, процессах обмена веществ и тканевом дыхании (Парахонский, 2015). Су-содержащая изоформа аминоксидазы принимает участие в защитных реакциях и других процессах, включая лигнификацию, и оказывает значимое влияние на формирование и химический состав клеточных стенок растений (Hall, Williams, 2003; Битюцкий, 2020).

Железо (Fe) – важнейший микроэлемент, который является составной частью многих ферментов. Он участвует в клеточном дыхании, иммунобиологических процессах и окислительно-восстановительных реакциях (Ватутин и др., 2012). Низкую концентрацию хлорофиллов в листьях (хлороз) относят к типичному проявлению дефицита железа у высших растений, а пероксидное окисление липидов Fe-липоксигеназами связано с процессами старения клеток и тканей. Кроме того, имеются данные, что содержание липоксигеназ в митохондриях связано с запуском программы апоптоза (Rout, Sahoo, 2015; Битюцкий, 2020).

Марганец (Mn) обладает широким спектром биологических эффектов: катализирует (активирует) многие ферменты, благотворно влияет на процессы развития и репродукции, ускоряет рост, обладает выраженной антиоксидантной активностью. Ионы Mn^{2+} стабилизируют структуру нуклеиновых кислот (Тменова, Кубалова, 2014). Марганец также связан с обменом белка через регулирование активности ДНК- и РНК-полимераз, включая ауксиновый обмен (Burnell, 1988; Битюцкий, 2020).

Цинк (Zn) является эссенциальным микроэлементом, входящим в состав многих ферментов, которые катализируют гидролиз пептидов, белков, некоторых эфиров и альдегидов, участвует в углеводном обмене (Сальникова, 2012). Цинк как структурный элемент биологических мембран играет важную роль в их интеграции. Повышение проницаемости мембран – типичный признак Zn-дефицита у растений (Tsonev, Sebola Lidon, 2012; Битюцкий, 2020).

Следует отметить, что уровень содержания микроэлементов, как и большинство других селекционно значимых признаков, относится к количественным признакам, на проявление которых в значительной степени оказывают влияние факторы окружающей среды. Для изучения количественных признаков растений, в том числе капустных, наиболее перспективно использовать картирующие популяции удвоенных гаплоидов (double haploid, DH) – набор генетически фиксированных информативных

рекомбинантных линий, все локусы которых находятся в гомозиготном состоянии (Pink et al., 2008).

Имеются опубликованные данные ранее проведенных исследований, посвященных анализу основных биохимических признаков качества *Brassica rapa* L. (Артемьева и др., 2012; Артемьева и др., 2015; Jan et al., 2016; Ullah et al., 2017). При этом не было проведено ни одного исследования, направленного на определение биохимических признаков *B. rapa* в контролируемых условиях регулируемой агроэкосистемы (РАЭС). Такие исследования позволяют выявлять реакцию генотипа на действие определенных факторов среды путем моделирования конкретных параметров окружающей среды и оценивать их влияние на реализацию изучаемых признаков. Особенно актуальны исследования количественных признаков, степень проявления которых существенно зависит от взаимодействия генотип-среда (Панова и др., 2020). Одним из наиболее значимых факторов внешней среды, оказывающим существенное влияние на протекание физиологических процессов в растении и его переход к генеративной стадии развития, является фотопериод (Сысоева, Марковская, 2006).

Цель настоящего исследования заключалась в изучении влияния фотопериода на содержание Cu, Fe, Mn и Zn у линий удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L., выращенных в контролируемых условиях РАЭС, а также в выявлении линий с высоким содержанием исследуемых микроэлементов, адаптированных к выращиванию в светокультуре, которые могут быть использованы в дальнейшей генетико-селекционной работе для получения генотипов, линий и сортов с улучшенным биохимическим составом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались линии двух картирующих популяций удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. из коллекции Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР): 15 линий DH 30 и 20 линий DH 38. Популяция DH 30 – результат гибридизации японской корнеплодной репы (сорт Kairyou Nakata) и масличного желтого сарсона (YS-143). Популяция DH 38 получена от скрещивания листовой/черешковой китайской капусты (сорт Nai Bai Cai) и масличного желтого сарсона (YS-143). Картирующие популяции созданы в лаборатории селекции растений Университета Вагенингена, Нидерланды (Lou, 2007). Исходные образцы, отобранные для создания картирующих популяций *Brassica rapa* L., относятся к разным ботаническим подвидам и существенно различаются генетически и фенотипически (Артемьева и др., 2012). Созданные на их основе популяции гомозиготных линий удвоенных гаплоидов дают представление о разнообразии капустных культур рода *B. rapa* по степени проявления основных хозяйственно ценных признаков.

DH-линии картирующих популяций выращивались при моделировании короткого (12-

часового) и длинного (16-часового) фотопериода согласно ранее описанной методике (Егорова и др., 2020). Размер анализируемой выборки – 5 растений для каждой линии.

Листья растений для биохимического анализа отбирались на стадии перехода к цветению (начало стеблевания). Из измельченного и высушенного до воздушно-сухого состояния материала формировались усредненные пробы для каждой изучаемой линии. Полученные пробы озолялись в муфельной печи при температуре 450°C. Определение содержания железа, меди, марганца и цинка проводилось общепринятым методом атомно-абсорбционной спектроскопии (Ермаков, 1987).

Статистическая оценка полученных данных проводилась путем вычисления основных описательных характеристик. Для определения

характера сопряженности между Cu, Mn, Fe и Zn рассчитывались коэффициенты корреляции (r). Величина $p < 0,05$ (вероятность ошибки 5%) считалась приемлемой границей статистической значимости. Все значения рассчитывались с использованием компьютерного программного обеспечения Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках настоящей работы проведен анализ содержания меди, железа, марганца и цинка в растениях двух популяций удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. (рис.), выращенных в регулируемых условиях РАЭС. Проведена оценка влияния продолжительности светового дня на содержание микроэлементов в капустных культурах *B. rapa* (табл.).

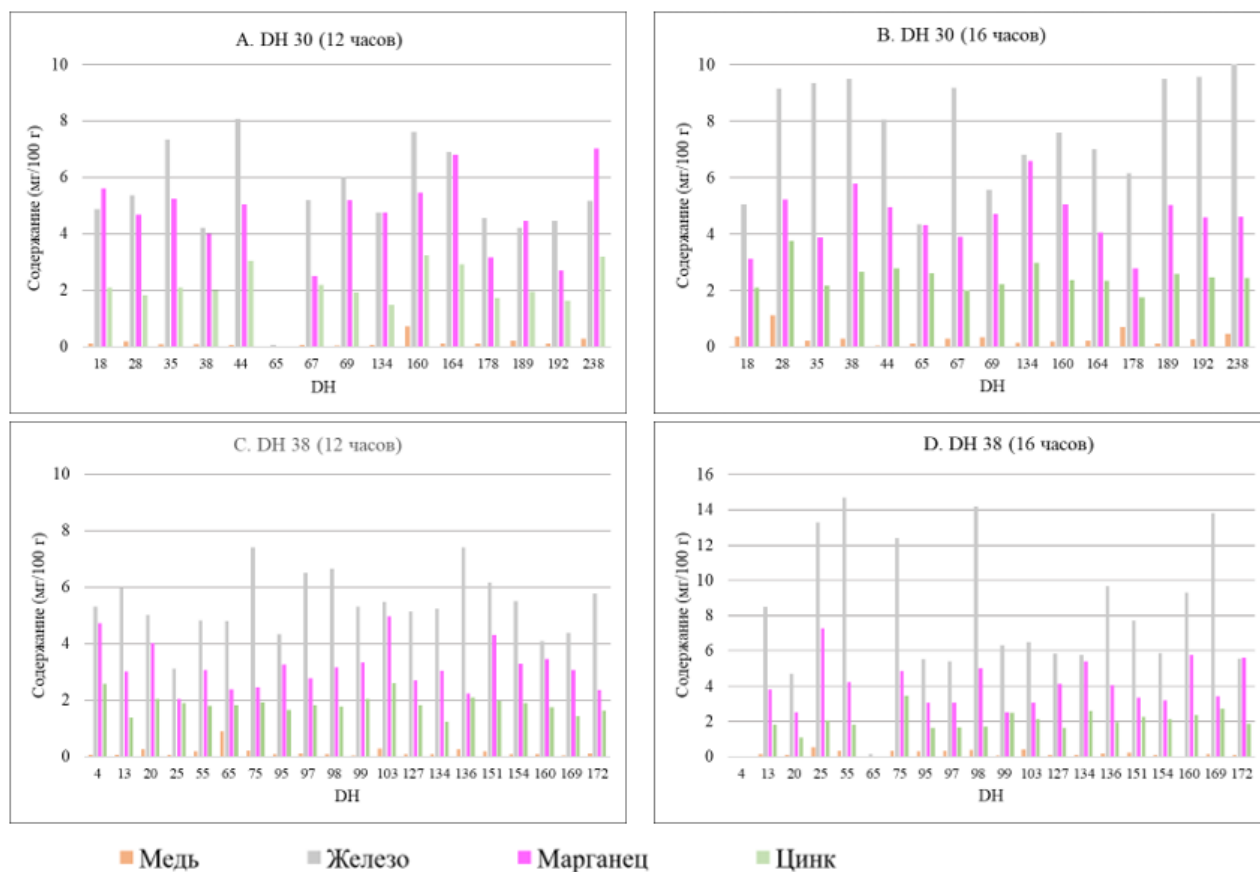


Рис. Содержание микроэлементов (меди, железа, марганца и цинка) в растениях ДН-линий картирующих популяций *Brassica rapa* L.:

- A. Популяция DH 30 (12-часовой фотопериод); B. Популяция DH 30 (16-часовой фотопериод);
C. Популяция DH 38 (12-часовой фотопериод); D. Популяция DH 38 (16-часовой фотопериод).

Таблица. Статистическая обработка полученных данных по содержанию микроэлементов в растениях ДН-линий картирующих популяций *Brassica rapa* L.

	ДН 30								ДН 38							
	12 часов				16 часов				12 часов				16 часов			
	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn
Среднее значение (мг 100 г ⁻¹)	0,2	5,3	4,4	2,1	0,3	7,8	4,6	2,5	0,2	5,5	3,2	1,9	0,2	8,0	3,8	1,9
Минимальное значение (мг 100 г ⁻¹)	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	4,3	2,8	1,7	0,1	3,1	2,1	1,2	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
Максимальное значение (мг 100 г ⁻¹)	0,7	8,1	7,0	3,2	1,1	10,6	6,6	3,8	0,9	7,4	5,0	2,6	0,5	14,7	7,3	3,5
Доверительный интервал ($\alpha = 0,05$)	0,09	0,97	0,90	0,41	0,14	0,97	0,49	0,24	0,08	0,47	0,35	0,15	0,06	1,68	0,68	0,30
Стандартное отклонение	0,17	1,92	1,79	0,82	0,27	1,92	0,97	0,48	0,18	1,08	0,80	0,34	0,14	3,84	1,54	0,68
Коэффициент вариации (%)	113,2	36,6	40,2	39,2	83,7	24,5	21,1	19,2	94,6	19,6	25,3	17,6	60,3	47,8	41,1	36,5

У линий популяции ДН 30 содержание меди варьировалось от $< 0,1$ мг 100 г⁻¹ (следовые количества) до 0,7 мг 100 г⁻¹ при выращивании в условиях 12-часового фотопериода (среднее значение – 0,2 мг 100 г⁻¹) и от 0,1 до 1,1 мг 100 г⁻¹ в условиях 16-часового фотопериода (среднее значение – 0,3 мг 100 г⁻¹). При оценке линий ДН 38 установлено, что средние значения (0,2 мг 100 г⁻¹) оставались неизменными при выращивании в условиях 12-часового и 16-часового фотопериода, при этом отмечено некоторое снижение максимального значения (от 0,9 до 0,5 мг 100 г⁻¹) в условиях 16-часового фотопериода.

Еще одним микроэлементом, играющим ключевую роль в жизнедеятельности растений, является железо. Содержание железа у линий популяции ДН 30 варьировалось от 0,1 до 8,1 мг 100 г⁻¹ при выращивании в условиях 12-часового фотопериода (среднее значение – 5,3 мг 100 г⁻¹). В условиях 16-часового фотопериода отмечено увеличение среднего (7,8 мг 100 г⁻¹), минимального (4,3 мг 100 г⁻¹) и максимального (10,6 мг 100 г⁻¹) значений его содержания относительно 12-часового фотопериода. Для популяции ДН 38 также было характерно увеличение среднего (от 5,5 до 8,0 мг 100 г⁻¹) и максимального (от 7,4 до 14,7 мг 100 г⁻¹) значений содержания железа при выращивании в условиях 16-часового светового дня по сравнению с 12-часовым, что, по-видимому, играет существенную роль в реализации генетического потенциала исследуемых образцов *B. rapa*.

Марганец в растениях участвует в процессе фотосинтеза, активизирует гормон ауксин и ряд ферментов, уменьшает содержание нитратов, повышает содержание витамина С. У образцов линий популяции ДН 30 содержание марганца варьировалось от минимального значения $< 0,1$ до максимального 7,3 мг 100 г⁻¹. Выявлено увеличение минимального (от $< 0,1$ до 2,8 мг 100 г⁻¹) и среднего (от 4,4 до 4,6 мг 100 г⁻¹) значений содержания марганца в условиях 16-часового фотопериода по сравнению с 12-часовым при некотором снижении максимального значения (7,0 до 6,6 мг 100 г⁻¹). У образцов линий ДН 38 также отмечено увеличение максимального (от 5,0 до 7,3 мг 100 г⁻¹) и среднего (от 3,2 до 3,8 мг 100 г⁻¹) значений содержания элемента при выращивании в условиях 16-часового фотопериода.

Цинк также является одним из наиболее важных микроэлементов. Согласно полученным данным, содержание цинка у образцов линий *B. rapa* варьировалось от минимального значения $< 0,1$ до 3,8 мг 100 г⁻¹. Наблюдалось увеличение минимального (от $< 0,1$ до 1,7 мг 100 г⁻¹), среднего (от 2,1 до 2,5 мг 100 г⁻¹) и максимального (от 3,2 до 3,8 мг 100 г⁻¹) значений содержания цинка у линий ДН 30 при выращивании в условиях 16-часового фотопериода по сравнению с 12-часовым. Для образцов линий ДН 38 также было характерно увеличение максимального значения содержания цинка (от 2,6 до 3,5 мг 100 г⁻¹) при выращивании в условиях длинного 16-часового светового дня относительно короткого 12-часового.

В целом в рамках настоящего исследования установлена высокая вариабельность содержания исследуемых микроэлементов между линиями внутри каждой популяции (табл.). Наибольший коэффициент вариации характерен для признака «содержание меди» (113,2% для популяции ДН 30, выращенной в условиях 12-часового фотопериода). Полученные результаты согласуются с ранее опубликованными данными, которые свидетельствуют о высокой степени варьирования биохимических признаков у изучаемых ДН-линий *B. rapa* при выращивании в полевых условиях и условиях теплицы (Артемьева и др., 2012; Артемьева и др., 2015).

Выявлено общее повышение среднего содержания микроэлементов в условиях 16-часового фотопериода (табл. 1). Такой эффект характерен для обеих популяций и может быть объяснен тем, что более длительный фотопериод способствует повышению активности ассимиляционных процессов, в ходе которых происходит поглощение и накопление микроэлементов.

В ходе настоящего исследования выделились гомозиготные линии удвоенных гаплоидов ДН 30-65 и ДН 38-55, которые отличались низким содержанием микроэлементов (меди, железа, марганца и цинка) вне зависимости от условий выращивания (рис.), что может объясняться их генотипическими особенностями.

По полученным результатам идентифицированы линии, отличающиеся высоким содержанием отдельных микроэлементов. По содержанию меди выделялась линия ДН 30-28 – 1,1 мг 100 г⁻¹, что составляет около 110% от суточной нормы потребности человека (Баева, Бессонов, 2008). Максимальное содержание железа выявлено у линии ДН 38-25 – 14,7 мг 100 г⁻¹ (≈ 147% от суточной нормы), марганца – у линии ДН 38-20 (7,3 мг 100 г⁻¹; ≈ 146% от суточной нормы). Самое высокое содержание цинка (3,8 мг 100 г⁻¹, что составляет ≈ 10% от суточной нормы) характерно для линии ДН 30-28. Все отмеченные максимальные значения были зафиксированы при выращивании анализируемых растений в условиях 16-часового фотопериода.

Выделение гомозиготных линий картирующих популяций *B. rapa*, которые отличаются низким (ДН 30-65, ДН 38-55) и высоким (ДН 30-28, ДН 30-238, ДН 38-20) содержанием микроэлементов в контрастных по фотопериоду условиях, по-видимому, связано с влиянием генотипа на формирование у указанных образцов определенного биохимического состава.

Известно, что между микроэлементами в растениях существуют синергетические и антагонистические взаимодействия. Данные взаимодействия не постоянны, их характер изменяется в зависимости от стадии развития растения и факторов окружающей среды (Сосорова и др., 2016). В рамках настоящей работы была проведена оценка характера сопряженности между микроэлементами в исследуемых ДН-линиях. Степень корреляции между уровнями содержания меди, железа, марганца и цинка в растениях ДН-линий *B. rapa* различалась и

колебалась от очень слабой до сильной. При оценке корреляции между содержанием меди (Cu), железа (Fe), марганца (Mn) и цинка (Zn) у линий ДН 30, выращенных в условиях 12-часового фотопериода, выявлены следующие корреляционные зависимости: между Cu и Fe – $r = 0,37$; Cu и Mn – $r = 0,35$; Cu и Zn – $r = 0,55$; Fe и Mn – $r = 0,73$; Fe и Zn – $r = 0,84$; Mn и Zn – $r = 0,81$. Результаты оценки тех же ДН-линий при выращивании в условиях 16-часового фотопериода подтверждают наличие сильной корреляции между содержанием Mn и Zn ($r = 0,71$). Также обнаружена средняя и слабая прямая корреляция между Cu и Fe ($r = 0,13$), Cu и Zn ($r = 0,33$), Fe и Mn ($r = 0,30$), Fe и Zn ($r = 0,24$) и слабая обратная – между Cu и Mn ($r = -0,17$). При исследовании линий ДН 38, выращенных в условиях короткого 12-часового фотопериода, установлены слабые прямые корреляционные зависимости между содержанием Cu и Fe ($r = 0,04$), Cu и Zn ($r = 0,16$), Fe и Zn ($r = 0,13$). Между Mn и Zn выявлена средняя прямая корреляция ($r = 0,54$), слабая обратная – между Mn и Cu ($-0,13$), Mn и Fe ($-0,04$). При помощи корреляционного анализа содержания Fe, Cu, Mn и Zn у линий ДН 38, выращенных в условиях 16-часового фотопериода, установлена средняя прямая зависимость между Cu и Fe ($r = 0,53$), Fe и Mn ($r = 0,61$), Fe и Zn ($r = 0,55$), Mn и Zn ($r = 0,54$). Между Cu и Zn отмечена слабая прямая зависимость ($r = 0,19$). В целом результаты корреляционного анализа согласуются с данными о существовании вариабельных разнохарактерных взаимодействий между микроэлементами (медью, железом, марганцем и цинком) при их накоплении в растениях.

Полученные в ходе данного исследования результаты подтверждают значимость представителей рода *B. rapa* как источника ценных питательных и биологически активных веществ (Favela-González, 2020), что, по мнению авторов, свидетельствует о перспективности дальнейшего изучения влияния внешних факторов на биохимический состав капустных культур для генетико-селекционной работы, особенно в условиях РАЭС.

ВЫВОДЫ

Изучение картирующих популяций ДН 30 и ДН 38 удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. в контрастных условиях фотопериода (12 и 16 часов) позволило глубже оценить влияние длины светового дня на содержание меди (Cu), железа (Fe), марганца (Mn) и цинка (Zn) в капустных культурах *B. rapa*:

1. установлена высокая вариабельность содержания Cu, Fe, Mn и Zn у картирующих популяций удвоенных гаплоидов *B. rapa*;

2. отмечено повышение содержания исследуемых микроэлементов у ДН-линий *B. rapa* в условиях 16-часового фотопериода относительно 12-часового;

3. выявлены линии, отличающиеся максимальным содержанием Cu (ДН 30-28), Mn (ДН 38-20), Fe (ДН 38-28) и Zn (ДН 30-25), которые можно рекомендовать для использования в селекции капустных на улучшение биохимического состава;

4. идентифицированы линии с низким (DH 30-65, DH 38-55) и высоким (DH 30-28, DH 30-238, DH 38-20) содержанием микроэлементов (Cu, Fe, Mn, Zn) вне зависимости от фотопериодических условий выращивания;

5. корреляционный анализ содержания исследуемых микроэлементов позволил выявить наличие изменяющихся прямых и обратных взаимодействий между Cu, Fe, Mn, Zn при их накоплении в изучаемых растениях, выращенных в условиях 12-часового и 16-часового фотопериодов.

В целом полученные результаты свидетельствуют о значимом влиянии взаимодействия «генотип – среда» на содержание исследуемых микроэлементов и могут быть использованы для создания новых генотипов, линий и сортов капустных культур с повышенной биохимической ценностью и высоким содержанием микроэлементов, адаптированных к конкретным фотопериодическим условиям региона выращивания, а также к выращиванию в светокультуре.

Список литературы

- Артемьева А.М., Соловьева А.Е., Кочерина Н.В., Руднева Е.Н., Волкова А.И., Чесноков Ю.В. ДНК маркированные линии двойных гаплоидов *Brassica rapa* L. и идентифицированные QTL, контролирующие хозяйственно ценные признаки для использования в селекции листовых капустных культур // Каталог мировой коллекции ВИР. 2012. № 810. 174 с.
- Артемьева А.М., Соловьева А.Е., Кочерина Н.В., Чесноков Ю.В. QTL анализ биохимических признаков качества у *Brassica rapa* L. // Овощи России. 2015. № 1. С. 10–13. DOI: 10.18619/2072-9146-2014-1-10-13.
- Баева В.С., Бессонов В.В. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: методические рекомендации. М., 2008. 42 с.
- Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. 2-е издание. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2020. 386 с.
- Ватугин Н.Т., Калинин Н.В., Смирнова А.С., Кашанская О.К., Мильнер И.А. Роль железа в организме человека // Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия: Медицина. 2012. № 24. С. 74–80.
- Егорова К.В., Синявина Н.Г., Кочетов А.А., Чесноков Ю.В. Оценка селекционно значимых морфологических признаков в популяции удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. в контролируемых условиях регулируемой агроэкосистемы // Овощи России. 2020. № 4. С. 28–31. DOI: 10.18619/2072-9146-2020-4-28-31
- Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений / Под ред. А. И. Ермакова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1987. 430 с.
- Панова Г.Г., Удалова О.Р., Канаш Е.В., Галушко А.С., Кочетов А.А., Прияткин Н.С., Архипов М.В., Черноусов И.Н. Основы физического моделирования «идеальных агроэкосистем» // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 10. С. 1633–1639. DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19
- Парахонский А.П. Роль меди в организме и значение ее дисбаланса // Естественно-гуманитарные исследования. 2015. № 4. С. 73–84.
- Сальникова Е.В. Цинк – эссенциальный микроэлемент (Обзор) // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 10. С. 170–172.
- Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Содержание микроэлементов в лекарственных растениях разных экосистем озера Котокельского (Западное Забайкалье) // Химия растительного сырья. 2016. № 2. С. 53–59. DOI: 10.14258/jcrpm.201602697
- Сысоева М.И., Марковская Е.Ф. Фототермальная модель развития растений // Онтогенез. 2006. Т. 37. № 1. С. 20–26.
- Тменова А.О., Кубалова Л.М. Биологическая роль марганца и его соединений // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7–2. С. 92–93.
- Aires A. *Brassica* composition and food processing // Processing and Impact on Active components in Food. San Diego, CA: Elsevier Inc, 2015, pp. 17–25. DOI: 10.1016/B978-0-12-404699-3.00003-2
- Burnell J.N. The biochemistry of manganese in plants // Manganese in soils and plants, Springer: Dordrecht, 1988, pp. 125–137.
- Favela-González K.M., Hernández-Almanza A.Y., De la Fuente-Salcido N.M. The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (*Brassica*) as antimicrobials and antioxidants: A review // Journal of Food Biochemistry, 2020, vol. 44, no. 10, pp. e13414. DOI 10.1111/jfbc.13414
- Hall J.L., Williams L.E. Transition metal transporters in plants // Journal of experimental botany, 2003, vol. 54, no. 393, pp. 2601–2613. DOI: 10.1093/jxb/erg303
- Jan S.A., Shinwari Z.K., Rabbani M.A. Morpho-biochemical evaluation of *Brassica rapa* sub-species for salt tolerance // Genetika, 2016, vol. 48., no. 1, pp. 323–338. DOI: 10.2298/GENSR1601323J
- Lou P., Zhao J., Kim J.S., Shen S., Del Carpio D.P., Song X., Jin M., Vreugdenhil D., Wang X., Koornneef M., Bonnema G. Quantitative trait loci for flowering time and morphological traits in multiple populations of *Brassica rapa* // Journal of Experimental Botany, 2007, vol. 58, no. 14, pp. 4005–4016. DOI: 10.1093/jxb/erm255
- Pink D., Bailey L., McClement S., Hand P., Mathas E., Buchanan-Wollaston V., Astley D., King G., Teakle G. Double haploids, markers and QTL analysis in vegetable brassicas // Euphytica, 2008, vol. 164, no. 2, pp. 509–514. DOI: 10.1007/s10681-008-9742-1

- Rout G.R., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism // *Reviews in Agricultural Science*, 2015, vol. 3, pp. 1–24. DOI: 10.7831/ras.3.1
- Tsonev T., Cebola Lidon F.J. Zinc in plants-an overview // *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 2012, vol. 24, no. 4, pp. 322–333.
- Ullah N., Khan J., Khan M.W. et al. Genetic variability for biochemical traits among advanced lines of *Brassica* // *Pure and Applied Biology (PAB)*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.19045/bspab.2016.50156

References

- Artem'yeva A.M., Solov'yeva A.E., Kocherina N.V., Rudneva E.N., Volkova A.I., Chesnokov Yu.V. DNK markirovannyye linii dvoynnykh gaploidov *Brassica rapa* L. i identifikirovannyye QTL, kontroliruyushchiye khozyaystvenno tsennyye priznaki dlya ispol'zovaniya v selektsii listovykh kapustnykh kul'tur [DNA marked lines of double haploids *Brassica rapa* L. and identified QTLs, which control economically valuable traits for use in breeding cabbage foliage crops] // *Catalog of the VIR world collection*, 2012, no. 810, 174 p.
- Artem'yeva A.M., Solov'yeva A.E., Kocherina N.V., Chesnokov Yu.V. i dr. QTL analiz biokhimicheskikh priznakov kachestva u *Brassica rapa* L. [QTL analysis of biochemical traits of quality of *Brassica rapa* L.] // *Vegetable crops of Russia*, 2015, no. 1, pp. 10–13. DOI: 10.18619/2072-9146-2014-1-10-13
- Bayeva V.S., Bessonov V.V. Normy fiziologicheskikh potrebnoyey v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiyskoy Federatsii: metodicheskiye rekomendatsii [Norms of physiological needs for energy and nutrients for different groups of the population of the Russian Federation: guidelines]. Moscow, 2008, 42 p.
- Bityutskiy N.P. *Mikroelementy vysshikh rasteniy* [Microelements of higher plants]. 2nd edition. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2020, 386 p.
- Vatutin N.T., Kalinkina N.V., Smirnova A.S., Kashanskaya O.K., Mil'ner I.A. Rol' zheleza v organizme cheloveka [The role of iron in the human body] // *Bulletin of Kharkov National University named after V.N. Karazin. Series: Medicine*, 2012, no. 24, pp. 74–80.
- Egorova K.V., Sinyavina N.G., Kochetov A.A., Chesnokov Yu.V. Otsenka selektsionno znachimykh morfologicheskikh priznakov v populyatsii udvoyennykh gaploidov *Brassica rapa* L. v kontroliruyemykh usloviyakh reguliruyemoy agroekosistemy [Assessment of significant for breeding morphological traits in the double haploid population of *Brassica rapa* L. in controlled conditions of a regulated agroecosystem] // *Vegetable crops of Russia*, 2020, no. 4, pp. 28–31. DOI: 10.18619/2072-9146-2020-4-28-31
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P. et al. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants] / Ed. A. I. Ermakov. 3rd ed. Leningrad: Agropromizdat, 1987, 430 p.
- Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. Osnovy fizicheskogo modelirovaniya «ideal'nykh agroekosistem» [Fundamentals of physical modeling «ideal agroecosystems»] // *Technical physics*, 2020, vol. 90, no. 10, pp. 1633–1639. DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19
- Parakhonskiy A.P. Rol' medi v organizme i znachenie yeye disbalansa [The role of copper in the body and the significance of its imbalance] // *Natural and humanitarian research*, 2015, no. 4, pp. 73–84.
- Sal'nikova E.V. Tsink – essentsial'nyy mikroelement (Obzor) [Zinc as an essential trace element (Review)] // *Bulletin of the Orenburg State University*, 2012, no. 10, pp. 170–172.
- Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ubugunov L.L. Soderzhaniye mikroelementov v lekarstvennykh rasteniyakh raznykh ekosistem ozera Kotokel'skogo (Zapadnoye Zabaykal'ye) [The content of trace elements in medicinal plants of different ecosystems of Lake Kotokelskoye (Western Transbaikalia)] // *Chemistry of plant raw materials*, 2016, no. 2, pp. 53–59. DOI: 10.14258/jcprm.201602697
- Sysoyeva M.I., Markovskaya E.F. Fototermal'naya model' razvitiya rasteniy [Photothermal model of plant development] // *Russian Journal of Developmental Biology*, 2006, vol. 37, no. 1, pp. 20–26.
- Tmenova A.O., Kubalova L.M. Biologicheskaya rol' margantsa i yego soyedineniy [Biological role of manganese and its compounds] // *Modern high technologies*, 2014, no. 7–2, pp. 92–93.
- Aires A. *Brassica* composition and food processing // *Processing and Impact on Active components in Food*. San Diego, CA: Elsevier Inc, 2015, pp. 17–25. DOI: 10.1016/B978-0-12-404699-3.00003-2
- Burnell J.N. The biochemistry of manganese in plants // *Manganese in soils and plants*, Springer: Dordrecht, 1988, pp. 125–137.
- Favela-González K.M., Hernández-Almanza A.Y., De la Fuente-Salcido N.M. The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (*Brassica*) as antimicrobials and antioxidants: A review // *Journal of Food Biochemistry*, 2020, vol. 44, no. 10, pp. e13414. DOI 10.1111/jfbc.13414
- Hall J.L., Williams L.E. Transition metal transporters in plants // *Journal of experimental botany*, 2003, vol. 54, no. 393, pp. 2601–2613. DOI: 10.1093/jxb/erg303
- Jan S.A., Shinwari Z.K., Rabbani M.A. Morpho-biochemical evaluation of *Brassica rapa* sub-species for salt tolerance // *Genetika*, 2016, vol. 48., no. 1, pp. 323–338. DOI: 10.2298/GENSR1601323J
- Lou P., Zhao J., Kim J.S., Shen S., Del Carpio D.P., Song X., Jin M., Vreugdenhil D., Wang X., Koornneef M., Bonnema G. Quantitative trait loci for flowering time and morphological traits in multiple populations of *Brassica rapa* // *Journal of Experimental Botany*, 2007, vol. 58, no. 14, pp. 4005-4016. DOI: 10.1093/jxb/erm255

- Pink D., Bailey L., McClement S., Hand P., Mathas E., Buchanan-Wollaston V., Astley D., King G., Teakle G. Double haploids, markers and QTL analysis in vegetable brassicas // *Euphytica*, 2008, vol. 164, no. 2, pp. 509–514. DOI: 10.1007/s10681-008-9742-1
- Rout G.R., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism // *Reviews in Agricultural Science*, 2015, vol. 3, pp. 1–24. DOI: 10.7831/ras.3.1
- Tsonev T., Cebola Lidon F.J. Zinc in plants-an overview // *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 2012, vol. 24, no. 4, pp. 322–333.
- Ullah N., Khan J., Khan M.W. et al. Genetic variability for biochemical traits among advanced lines of *Brassica* // *Pure and Applied Biology (PAB)*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.19045/bspab.2016.50156

УДК 633/635:631.52

DOI: 10.25695/AGRPH.2021.02.07

РЕАКЦИЯ СЕЛЕКЦИОННЫХ ЛИНИЙ ЯРОВОЙ И ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ТОКСИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМЫХ АБИОТИЧЕСКИХ СТРЕССОВ

Л. А. Марченкова, И. Ф. Лапочкина, О. В. Павлова, Н. Р. Гайнуллин, Р.Ф. Чавдарь, Т.Г. Орлова

ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»

143026, Московская обл., Одинцовский р-н, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, д. 6

E-mail: silyanova69@mail.ru

Поступила в редакцию 26 апреля 2021 г., принята к печати 24 мая 2021 г.

В статье дана оценка адаптивных свойств селекционных линий яровой и озимой мягкой пшеницы, полученных с использованием доноров устойчивости к стеблевой ржавчине с чужеродным генетическим материалом *T. migushovae*, *Ae. triuncialis*, *T. kiharae*, *Ae. speltoides*, *S. cereale* (GT 96/90), (119/4-06rw), (113/00i-4), носителями эффективных генов устойчивости к данному заболеванию. Работа проведена в лабораторных условиях в фазу проростков на фоне искусственно моделируемых абиотических стрессов – хлоридного (обработка семян хлоридом натрия (NaCl)) и анаэробного (созданного путем длительного затопления семян в воде). Выявлено высокое токсическое воздействие стрессоров на обе культуры, которое проявилось в сильной депрессии ростовых процессов. Установлена более высокая вредоносность анаэробного стресса и наибольшая уязвимость к токсичности яровой пшеницы. Определены реакция образцов на каждый из стресс-факторов и суммарный эффект от их воздействия, выявленный на основе индекса «И». Самой высокой способностью противостоять токсическому воздействию стрессоров характеризовались линии яровой пшеницы 37-16i, 33-16i, 32-16i и линии озимой пшеницы 37-19w, 9-19w, 32-19w. Они представляют интерес для селекции как источники генов высокой адаптивности к абиотическим стрессам, а также как доноры групповой устойчивости к болезням. Наличие комплекса хозяйственно полезных признаков, по которым они не уступают стандартным сортам, а также эффективных генов устойчивости к стеблевой ржавчине делает их привлекательными донорами для улучшения качества мягкой пшеницы.

Ключевые слова: озимая пшеница, яровая пшеница, абиотический стресс, адаптивность, устойчивость к болезням.

RESPONSE OF BREEDING LINES OF SPRING AND WINTER WHEAT TO TOXIC EFFECTS OF ARTIFICIALLY CREATED ABIOTIC STRESS

L. A. Marchenkova, I. F. Lapochkina, O. V. Pavlova, N. R. Gaynullin, R. F. Chavdar, T. G. Orlova

Federal Research Center «Nemchinovka»

6, Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovskiy district, Moscow region, 14302

E-mail: silyanova69@mail.ru

The paper provides an assessment of the adaptive properties of breeding lines of spring and winter soft wheat obtained using stem rust resistance donors with alien genetic material *T. migushovae*, *Ae. triuncialis*, *T. kiharae*, *Ae. speltoides*, *S. cereale* (GT 96/90), (119/4-06rw), (113/00i-4), which are the carriers of effective resistance genes to this disease. The research was carried out under laboratory conditions in the seedling phase against the background of artificially simulated abiotic stresses – chloride (treatment of seeds with sodium chloride (NaCl)) and anaerobic (created by prolonged flooding of seeds in water). The revealed high toxic effect of stressors on both cultures manifested itself in a strong depression of growth processes. A higher harmfulness of anaerobic stress and the greatest vulnerability to toxicity of spring wheat were found. The reaction of the samples to each of the stress factors and the total effect of their impact,