

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛИФЕНОЛОВ В РАСТЕНИЯХ ЯЧМЕНЯ НА СТРЕССОВЫХ ПОЧВЕННЫХ ФОНАХ

О. Н. Шуплецова, доктор биологических наук, Е. В. Товстик, кандидат биологических наук,
И. Н. Щенникова, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Киров, ул. Ленина, 166 а
E-mail: olga.shuplecova@mail.ru

С целью оценки стрессоустойчивости генотипов изучали влияние почвенных стрессоров на содержание полифенольных веществ в зерне, соломе, корнях ячменя (*Hordeum vulgare* L.) различных сортов с дифференциацией по происхождению (отечественная и зарубежная селекция) и способам получения (гибридизация и клеточная селекция). Растения выращивали в вегетационных сосудах с дерново-подзолистой почвой в естественных условиях до созревания семян. Схема опыта включала следующие варианты: избыточное содержание кадмия (Cd^{2+} 6,4 мг/кг); повышенная кислотность ($pH_{KCl}=4,8$); смоделированная засуха в межфазный период выход в трубку – колошение; без стрессовой нагрузки при $pH_{KCl}=6,5$ (контроль). Содержание полифенолов в пересчете на галловую кислоту определяли спектрофотометрическим методом. Суммарное накопление полифенолов в зерне в условиях засухи (9,18...11,13 мг/г) и в присутствии избытка Cd^{2+} в почве (9,07...9,10 мг/г) превосходило величину этого показателя в контроле на 2,5...14,8 % и 2,8...8,5 % соответственно. На кислой почве количество полифенолов в зерне достоверно уменьшилось, по сравнению с контролем, у всех отечественных сортов ячменя, созданных на кислых почвах или на кислых селективных средах *in vitro*, у Витрум – на 16,1 %, Родник Прикамья – на 11,8 %. У сортов зарубежной селекции (Зазерский 85, Триумф и Таллон) в кислых условиях величина этого показателя наоборот возрастала на 2,2...4,8 %. Большая часть полифенолов находилась в связанном состоянии. Их свободная фракция распределялась по органам (% от общего количества в растении) следующим образом: солома (41,4...49,1) > корни (32,4...42,5) > зерно (15,6...22,6). Среди изучаемых стрессоров повышенная кислотность в большей степени способствовала увеличению накопления свободных полифенолов, относительно контроля, в первую очередь в корнях: у сортов и регенерантов селекции Федерального аграрного научного центра Северо-Востока – на 19,0 %; зарубежной селекции – на 35,7 %.

REACTION OF BARLEY VARIETIES ON THE CONTENT OF POLYPHENOLS ON STRESS SOIL BACKGROUNDS

O. N. Shupletsova, E. V. Tovstik, I. N. Shchennikova

Federal Agrarian Scientific Center of the North-East of N. V. Rudnitsky,
610007, Kirov, ul. Lenina, 166 a
E-mail: olga.shuplecova@mail.ru

In order to assess the stress resistance of genotypes, we studied the influence of soil stressors on the content of polyphenolic substances in grain, straw, and roots of barley (*Hordeum vulgare* L.) of various varieties with differentiation by origin (domestic and foreign selection) and methods of production (hybridization and cell selection). The plants were grown in vegetative tanks with sod-podzolic soil in natural conditions until the seeds ripened. The experimental design included the following options: with excess cadmium (Cd^{2+} 6.4 mg/kg); increased acidity ($pH_{KCl}=4.8$); simulated drought in the interphase period, emergence into the tube – earing; without stress load at $pH_{KCl}=6.5$ (control). The content of polyphenols in terms of gallic acid was determined by the spectrophotometric method. The total accumulation of polyphenols in grain under drought conditions (9.18...11.13 mg/g) and in the presence of excess Cd^{2+} in the soil (9.07...9.10 mg/g) exceeded the control by 2.5...14.8 % and 2.8...8.5 %, respectively. On acidic soil, compared with the control, the amount of polyphenols in grain significantly decreased in all domestically bred barley varieties that underwent selection on acidic soils or selection on acidic selective media *in vitro*, in Vitrum – by 16.1 %, Rodnik Prikamye – by 11.8 %. In varieties of foreign selection (Zazersky 85, Triumph and Tallon), under acidic conditions, the value of this indicator, on the contrary, increased by 2.2...4.8 %. Most of the polyphenols were in a bound state. The distribution of free fraction polyphenols among organs (% of the total amount in the plant) was revealed: straw (41.4...49.1) > roots (32.4...42.5) > grain (15.6...22.6). Among the stressors studied, increased acidity contributed to a greater extent to the increase in the relative accumulation of free polyphenols and most significantly in the roots – in varieties and regenerants of the selection of the Federal Agrarian Research Center of the North-East by 19.0 %; foreign selection – by 35.7 %.

Ключевые слова: полифенолы, сорт, ячмень (*Hordeum vulgare* L.), регенерант, почвенный фон, кадмий, повышенная кислотность, засуха.

Key words: polyphenols, variety, barley (*Hordeum vulgare* L.), regenerant, soil background, cadmium, high acidity, drought.

В природной среде факторы, действующие на живые организмы, постоянно изменяются. В условиях нестабильного климата отмечают усиление прежде всего абиотических стрессоров [1]. Экологические проблемы усугубляются на фоне роста населения и интенсификации сельского хозяйства [2]. Эти предпосылки актуализируют необходимость создания адаптивных сортов сельскохозяйственных культур [3]. Для их выведения, наряду с традиционными методами, используют биотехнологические приемы, в частности клеточную селекцию, что повышает генетическое разнообразие селекционного

материала и расширяет спектр генотипов с желаемыми хозяйственно ценными признаками. В качестве биохимических маркеров стрессового состояния растений все чаще рассматривают фенольные соединения [4, 5], одна из важнейших функций которых – участие в защите от окислительного стресса благодаря выраженной антиоксидантной активности. Окислительный стресс при этом может быть вызван засухой [6], засолением [7], ионной токсичностью [8] и прочими факторами.

Природные фенольные соединения, в том числе полифенолы (ПФ) – продукты вторичного метаболиз-

ма растений [9]. В организм человека ПФ поступают, в основном, с пищей и имеют важное значение в профилактике и лечении многих заболеваний [10].

На сегодняшний день содержание и активность антиоксидантов фенольной природы достаточно подробно изучены в овощах и фруктах. Зерновые культуры в этом отношении исследованы в меньшей степени. Вместе с тем измерение концентрации ПФ в зерне различных культурных злаков особенно важно с точки зрения определения стрессоустойчивости генотипов, а также их пищевой и медицинской ценности. Кроме того, некоторые высокоактивные фенольные соединения присутствуют только в цельном зерне [9].

Антиоксиданты фенольной природы, как в свободном, так и в связанном состоянии, обнаружены в зерне ячменя, ржи, пшеницы, риса, овса, кукурузы [11] и представлены, в основном, фенольными кислотами, флавоноидами и лигнанами. Следует отметить, что на биосинтез ПФ в растительной ткани оказывает влияние не только генотип растений, но и условия их произрастания [12, 13]. Например, выявлено повышение их содержания в листьях и зерне пшеницы при солевом стрессе [14, 15], в зерне – при температурном стрессе [16]. При кадмиевом стрессе (20 мг/кг почвы) содержание хлорофилла, каротиноидов в листьях ячменя снижалось, а флавоноидов, антоцианов и других фенольных веществ – увеличивалось [17]. Установлено повышение концентрации фенолов в зерне ячменя в условиях засухи, что негативно влияло на качество солода, вкус и стабильность пива [18].

Среди абиотических факторов, особое внимание уделяют тяжелым металлам. По данным Россельхознадзора в результате обследования 14257,7 тыс. га пахотных угодий на предмет выявления загрязнения почв солями кадмия, выявлено 27,7 тыс. га с его содержанием выше предельно допустимой концентрации [19]. Наряду с технологическими выбросами, в почвы агроценозов кадмий может поступать в результате широкого использования удобрений на основе фосфатов, содержащих этот элемент в виде естественной примеси в фосфатной породе [20, 21]. Наибольший уровень кадмия отмечен в подзолистых и дерново-подзолистых почвах (0,7...1,3 мг/кг и выше) [22], наиболее характерных для Нечерноземной зоны РФ. Попадая в пищевые цепи, этот элемент становится опасным для человека как из-за токсического действия, так и по причине длительного периода выведения из организма [23].

На сегодняшний день влияние повышенной кислотности почв, основного стрессора, снижающего урожайность ячменя, и повышенного содержания кадмия в дерново-подзолистых кислых почвах, на содержание фенолов в тканях этой культуры практически не изучено.

Цель исследований – определить влияние почвенных стрессоров (избыточное содержание кадмия, повышенная кислотность и засуха) на содержание полифенольных веществ в растениях ячменя различных сортов для оценки потенциальной стрессоустойчивости генотипов и пищевой ценности зерна.

Методика. Работу проводили в Федеральном аграрном научном центре (ФАНЦ) Северо-Востока (г. Киров). Объектами изучения служили 9 сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.):

сорта различного эколого-географического происхождения, созданные методом гибридизации – Новичок, Родник Прикамья, Дина, Зазерский 85, Triumph, Tallon; сорта-регенеранты, индуцированные от различных исходных генотипов в каллусной культуре на селективных средах *in vitro*: Форвард и Витрум (отбор на среде с 40 мг/л Al^{3+} , pH=3,8), Бионик (двухстадийный отбор

с 40 мг/л Al^{3+} , pH=3,8 и 15 %-ным полиэтиленгликолем в качестве осмотика).

Изучаемые сорта были распределены на 3 группы по признакам «происхождение» – селекция ФАНЦ Северо-Востока (сорта гибридного происхождения, регенеранты) и зарубежная селекция (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика сортов ячменя, используемых в исследованиях

Сорт	Происхождение	Критерий отбора
Селекция ФАНЦ Северо-Востока (сорта)		
Родник Прикамья	Россия	стандарт
Новичок		алюмо- и кислотоустойчивость
Дина		скороспелость, кислотоустойчивость
Селекция ФАНЦ Северо-Востока (регенеранты)		
Форвард	Россия	алюмо- и кислотоустойчивость
Бионик		устойчивость к засухе, алюмо- и кислотоустойчивость
Витрум		алюмо- и кислотоустойчивость
Зарубежная селекция (сорта)		
Зазерский 85	Беларусь	высокая урожайность
Triumph	Дания	
Tallon	Австралия	

В рамках вегетационного опыта проводили сравнительный анализ содержания ПФ в структурных органах ячменя, выращенного на почвенных фонах: с избыточным кадмием (Cd^{2+} 6,4 мг/кг почвы); повышенной кислотностью ($pH_{KCl}=4,8$) и засухой.

В вегетационные сосуды размером 1,5×1,3×0,3 м, наполненные почвой, высевали по 35 зерен, после всходов в эксперименте оставляли по 30 растений каждого генотипа и выращивали в естественных условиях до получения семенного потомства. Площадь питания растений составляла 4×15 см². В течение вегетационного периода осуществляли полив водопроводной водой по мере пересыхания почвы. Содержание полифенолов определяли в зерне, соломе и корнях после созревания семян.

Для создания стрессовых фонов использовали дерново-подзолистую почву, близкую по основным физико-химическим характеристикам и относящуюся к одной категории обеспеченности элементами питания, но отличающуюся по уровню кислотности (табл. 2). Кислым фоном служила почва с естественным уровнем $pH_{KCl}=4,8$ (сильнокислая реакция среды). Для создания кадмиевого фона за месяц до посева, в почву вносили раствор ацетата этого элемента. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии содержание его подвижных соединений в почве в результате модельного загрязнения составило 6,4±0,5 мг/кг.

Табл. 2. Основные характеристики почвы

Показатель	Номер ГОСТа	Вариант опыта (почвенный фон)		
		кадмиевый	засуха	контроль
pH_{KCl}	26483-85	6,50±0,10	4,80±0,10	4,80±0,10
$C_{орг}, \%$	26213-91	2,50±0,30		2,00±0,20
$NO_3^-, \text{мг/кг}$	26488-85	1,7±0,5		1,10±0,30
$P_2O_5, \text{мг/кг}$	P 54650-2011	50±10		35±6

Моделирование засухи, которая обеспечивалась прекращением полива и пленочным укрытием от атмосферных осадков, исключая парниковый эффект, начинали в фазе «выход в трубку» (42-е сутки эксперимента). Время создания этого стресса соответствовало межфазному вегетационному периоду растений – от выхода в трубку до колошения.

Влияние стрессовых почвенных факторов на накопление ПФ оценивали в сравнении с фоном без стрессовой нагрузки (контроль). Отсутствие кадмия

в почве контрольного фона подтверждали результатами атомно-абсорбционной спектроскопии.

Содержание ПФ определяли спектрофотометрическим методом по ГОСТ Р 55488–2013. В качестве стандарта использовали галловую кислоту. Суммарное содержание ПФ измеряли в щелочных извлечениях из зерна. В качестве экстрагента использовали раствор гидроксида натрия (2 н). Щелочные экстракты нейтрализовали соляной кислотой (3 М). Экстрагирование свободных ПФ из растительных тканей осуществляли 70 %-ным раствором этанола при температуре 5 °С в течение 16 ч [24]. Соотношение сырье : экстрагент составляло 1:100. Количество связанных ПФ в зерне определяли по разности между их суммарным содержанием в щелочных извлечениях и содержанием свободных ПФ в этанольных экстрактах.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли методом дисперсионного анализа, используя пакет прикладных программ *Microsoft Excel 2013* и *AGROS*. В таблицах и на рисунке приведены средние значения из 9 аналитических повторений и их квадратичные отклонения, различия значимы при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В представленных исследованиях основное внимание уделяли количественной оценке ПФ в зерне ячменя исследуемых генотипов. Растения наиболее активно накапливали ПФ (суммарное количество) при выращивании в условиях засухи (9,18...11,13 мг/г, в среднем по генотипам 9,60 мг/г; достоверно выше контроля у сортов Форвард, Новичок, Зазерский 85), и в присутствии избытка ионов кадмия в почве (9,07...9,10 мг/г, в среднем 9,05 мг/г; достоверно выше контроля у сортов Новичок, Зазерский 85), что

Табл. 3. Содержание полифенольных веществ в зерне ячменя при выращивании в различных почвенных условиях, мг/г сухой фитомассы

Фракция полифенолов	Почвенный фон			
	контроль	кадмиевый	кислый	засуха
Форвард				
Суммарное	8,85±0,13	9,07±0,32	8,34±0,91	9,39±0,26*
Свободные	4,42±0,61	2,09±0,10*	2,15±0,01*	2,46±0,07*
Связанные	4,43	6,98	6,19	6,93
Бионик				
Суммарное	8,89±0,39	9,09±0,33	8,91±0,07	10,22±1,34
Свободные	4,49±0,45	2,39±0,16*	2,47±0,15*	2,48±0,05*
Связанные	4,4	6,7	6,44	7,74
Витрум				
Суммарное	9,06±0,14	9,10±0,07	7,61±0,61*	9,31±1,06
Свободные	2,74±0,03	2,39±0,08*	2,51±0,01*	2,33±0,26*
Связанные	6,32	6,71	5,1	6,98
Новичок				
Суммарное	8,48±0,34	9,29±0,04*	8,50±0,26	9,18±0,39*
Свободные	2,32±0,07	2,09±0,11*	2,36±0,16	2,09±0,07*
Связанные	6,16	7,2	6,14	7,09
Родник Прикамья				
Суммарное	9,05±0,11	9,12±0,39	7,99±0,49*	10,63±0,98
Свободные	2,64±0,07	2,09±0,10	2,25±0,14	2,79±0,18
Связанные	6,41	7,03	5,7	7,84
Дина				
Суммарное	9,31±0,22	9,37±0,14	8,65±0,93	11,13±1,35*
Свободные	2,00±0,28	1,98±0,01	2,31±0,13	2,55±0,02*
Связанные	7,31	7,39	6,34	8,58
Зазерский 85				
Суммарное	7,78±0,01	8,42±0,56*	8,37±0,66	10,13±0,15*
Свободные	2,04±0,03	2,01±0,15	2,18±0,06*	2,46±0,01
Связанные	5,74	6,41	6,19	7,67
Triumph				
Суммарное	8,81±0,74	8,89±0,39	8,96±0,24	8,34±0,16
Свободные	2,41±0,01	2,01±0,11*	2,09±0,04*	2,43±0,14
Связанные	6,40	7,88	6,57	5,91
Tallon				
Суммарное	8,26±0,75	9,08±0,16	8,46±0,15	8,14±0,67
Свободные	2,27±0,11	1,90±0,01*	1,94±0,16*	1,95±0,07
Связанные	5,99	7,18	6,52	6,19

*различия с контролем достоверны при $P > 0,95$.

превышало контроль на 2,5...14,8 % и 2,8...8,5 % соответственно (табл. 3). Исключением были сорта Triumph и Tallon, для которых на фоне засухи отмечали тенденцию снижения величины этого показателя, по сравнению с контролем, на 5,4 и 1,5 % соответственно. На кислой почве наблюдали уменьшение содержания фенольных соединений у сортов ячменя селекции ФАНЦ Северо-Востока (достоверно у сортов Витрум – на 16,1 %, Родник Прикамья – на 11,8 %), характеризующихся кислотостойкостью, приобретенными в результате селекции на кислых дерново-подзолистых почвах или отбора на кислых селективных средах *in vitro*. У сортов зарубежной селекции (Зазерский 85, Triumph и Tallon) в таких условиях величина этого показателя имела тенденцию к повышению, относительно контроля, на 2,2...4,8 %.

Фенольные соединения присутствовали в зерне как в свободном, так и в связанном состоянии. Исследования показали значительные изменения баланса фракций «свободная / связанная форма» в зависимости от сорта и условий произрастания. Так, количество свободных полифенольных веществ в растительных образцах изменялось в диапазоне 1,98...4,49 мг/г, связанных – 4,42...8,58 мг/г. Большая часть ПФ в зерне находилась в связанном состоянии. Такое структурирование, как известно, может затруднять процессы усвоения этих компонентов макроорганизмами и, в конечном итоге, снижать пищевую ценность зерновой продукции. Наличие избыточного кадмия или повышенная кислотность почвенного раствора, в основном, негативно сказывались на содержании свободных ПФ в зерне. Если в контрольных условиях их доля в общем количестве составляла 30,3...50,6 %, то в упомянутых стрессовых условиях – 20,2...27,3 % (см. табл. 3).

Согласно результатам дисперсионного анализа (табл. 4), суммарное количество и содержание связанной фракции ПФ в зерне в значительной мере зависело от среды выращивания (38,5 % и 48,1 % соответственно), тогда как уровень свободной фракции в равной степени определялся генотипом (26,9 %) и средой (26,0 %).

Для определения активности синтеза фенольных

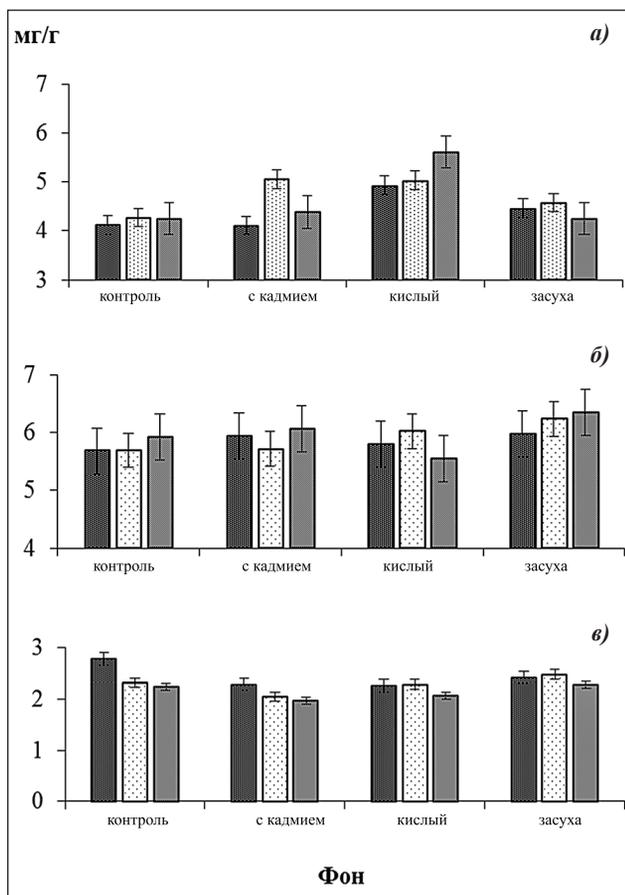
Табл. 4. Влияние факторов на накопление полифенолов в зерне

Фракция полифенолов	Генотип (фактор А)	Фон (фактор В)	Взаимодействие факторов (А × В)
Суммарное количество	12,1	38,5	11,0
Свободные	26,9	26,0	9,6
Связанные	9,8	48,1	6,7

соединений в различных органах растений проводили сравнительный анализ содержания свободных ПФ как наиболее мобильной фракции в корнях, соломе и зерне. Их распределение по органам изменялось в следующих пределах (% от общего количества в растении): солома (41,4...49,1) > корни (32,4...42,5) > зерно (15,6...22,6).

Повышенная кислотность почвы активизировала накопление свободных ПФ в корнях у всех групп исследуемых генотипов: сорта и регенеранты селекции ФАНЦ – на 19,0 %; зарубежной селекции – на 35,7 %. Аналогичный эффект оказывал кадмий, но только для сортов гибридного происхождения ФАНЦ (на 24,6 %). Различия по величине этого показателя между группами генотипов на контрольном фоне и в условиях засухи носили недостоверный характер (см. рисунок).

Накопление ПФ в соломе варьировало в пределах 5,23...7,73 мг/г в зависимости от генотипа (см. рисунок). Наибольшие различия с контролем наблюдали у групп зарубежных сортов (в среднем по генотипам) – в условиях засухи превышение на 7,1 %, на кислом фоне – снижение



Содержание свободных полифенолов в корнях (а), соломе (б), зерне (в) ячменя исследуемых генотипов: ■ – регенераты селекции ФАНЦ Северо-Востока; ▨ – сорта селекции ФАНЦ Северо-Востока; ■ – сорта зарубежной селекции.

на 6,5 %. Следует отметить, что у сортов этой группы на кислом фоне концентрация ПФ в соломе находилась на уровне величины этого показателя в корнях.

Содержание свободных ПФ в зерне на различных почвенных фонах имело более стабильный характер, по сравнению с корнями и соломой. У сортов, не прошедших отбор *in vitro* в культуре изолированной ткани, величина этого показателя практически не менялась в зависимости от условий произрастания, тогда как у регенерантов уровень свободных ПФ в зерне на всех стрессовых фонах снижался, по сравнению с контролем, на 11,1...17,9 %.

Если считать активизацию биосинтеза фенольных соединений в растительной ткани показателем стрессированности растений, полученные результаты вполне согласуются с направлениями селекции исследуемых генотипов.

Выводы. Среди изучаемых стрессоров повышенная кислотность почв в большей степени увеличивала различия между группами сортов, дифференцированными по происхождению. Изменение суммарного количества ПФ в зерне, относительно контроля, носило в большинстве случаев недостоверный характер. Однако отмечена тенденция к повышению величины этого показателя на кадмиевом и засушливых фонах у всех исследуемых сортов; на кислом фоне – у сортов зарубежной селекции, тогда как у сортов ФАНЦ Северо-Востока она снижалась (достоверно у Витрум – на 16,1 %, Родник Прикамья – на 11,8 %).

Условия произрастания генотипов также влияли на баланс свободных и связанных форм ПФ. Отмечена достоверная сортоспецифичность по накоплению свободной фракции, как показателя, более чувствительного к внешним воздействиям. Более активно ПФ накапливались в соломе, чем в корнях (в среднем в 1,2 раза меньше) и зерне (в среднем в 2,4 раза меньше). Изучение характера распределения свободных ПФ по органам растений показало значительные сортовые колебания по их содержанию в корнях, наиболее остро реагирующих на почвенные стрессоры. Повышенная кислотность почвы активизировала накопление свободных ПФ в корнях у всех групп исследуемых генотипов, однако в большей степени у сортов зарубежной селекции (на 35,7 %, по сравнению с контролем). Уровень ПФ в корнях сортов селекции ФАНЦ на фоне с повышенной кислотностью почвы (на 19,0 % больше, по сравнению с контролем), свидетельствует о меньшем окислительном стрессе, что, вероятно, обусловлено их селекцией на кислых почвах (сорта гибридного происхождения) или отбором на кислых селективных средах *in vitro* (регенеранты).

Литература.

1. Nexus on climate change: Agriculture and possible solution to cope future climate change stresses / A. Shahzad, S. Ullah, A. A. Dar, et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 12. No. 28. P. 14211–14232. doi: 10.1007/s11356-021-12649-8.
2. Arzani A., Ashraf M. Smart Engineering of Genetic Resources for Enhanced Salinity Tolerance in Crop Plants // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016. Vol. 3. No. 35. P. 146–189. doi: 10.1080/07352689.2016.1245056.
3. Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Результаты использования клеточных технологий в создании новых сортов ячменя, устойчивых к токсичности алюминия // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016. Т. 20. № 5. С. 623–628. doi: 10.18699/VJ16.183.
4. Investigation of phenolic compounds with antioxidant activity in barley and oats affected by variation in growing location / Sh. Rao, A. B. Santhakumar, K. A. Chinkwo, et al. // *Cereal Chemistry*. 2020. Vol. 4. No. 97. P. 772–782. doi: 10.1002/cche.10291.
5. Role and regulation of plants phenolics in abiotic stress tolerance: an overview / M. I. Naikoo, M. I. Dar, F. Raghib, et al. // In book: *Plant Signaling Molecules*. Elsevier (Woodhead Publishing), 2019. Ch. 9. P. 157–168. doi: 10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5.
6. Аллагулова Ч. Р., Ласточкина О. В. Снижение уровня окислительного стресса в растениях пшеницы под влиянием эндофитных бактерий в условиях засухи // *Экобиотех*. 2020. Т. 3. № 2. С. 129–134. doi: 10.31163/2618-964X-2020-3-2-129-134.
7. Sirin S., Aslim B. Determination of antioxidant capacity, phenolic acid composition and antiproliferative effect associated with phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity in some plants naturally growing under salt stress // *Proceedings*. 2017. Vol. 1. No. 1. Article 1035. URL: <https://www.mdpi.com/2504-3900/1/10/1035> (дата обращения: 01.03.2023). doi: 10.3390/proceedings1101035.
8. Guo T. R., Zhang G. P., Zhang Y. H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium // *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2007. Vol. 2. No. 57. P. 182–188. doi: 10.1016/j.colsurfb.2007.01.013.
9. Functional Properties of Polyphenols in Grains and Effects of Physicochemical Processing on Polyphenols / S. Tian, Y. Sun, Z. Chen, et al. // *Journal of Food Quality*. 2019. Article 2793973. URL: <https://www.hindawi>.

- com/journals/jfq/2019/2793973/ (дата обращения: 01.03.2023). doi: 10.1155/2019/2793973.
10. Рихтер А. А., Горина В. М. Полифенолы тканей плодов косточковых культур в профилактике некоторых заболеваний человека // *Плодоводство*. 2018. Т. 30(1). С. 273–283.
 11. Журлова Е. Д., Бондаренко А. В., Базильский Д. А. и др. Содержание свободных и связанных полифенолов злаковых и бобовых культур // *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2017. Vol. 17. No. 2. P. 14–18.
 12. Influence of Abiotic Stress Factors on the Antioxidant Properties and Polyphenols Profile Composition of Green Barley (*Hordeum vulgare* L.) / P. L. Kowalczewski, D. Radzikowska, E. Ivanisova, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21. No. 2. Article 397. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/2/397> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.3390/ijms21020397.
 13. Study of resistance of spring barley genotypes to zinc and cadmium / R. A. Alybaeva, U. A. Shilmanova, Z. A. Inelova, et al. // *Eurasian Journal of Ecology*. 2019. V. 59. No. 2. P. 60–68. doi: 10.26577/EJE.2019.v59.i2.05.
 14. Kiani R., Arzani A., Maibod S. A. M. M. Polyphenols, Flavonoids, and Antioxidant Activity Involved in Salt Tolerance in Wheat, *Aegilops cylindrica* and Their Amphidiploids // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.646221/full> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.3389/fpls.2021.646221.
 15. Effects of sprouting and salt stress on polyphenol composition and antiradical activity of einkorn, emmer and durum wheat / F. Stagnari, A. Galieni, S. D'egidio, et al. // *Italian Journal of Agronomy*. 2018. Vol. 4. No. 11. doi: 10.4081/ija.2017.848.
 16. Effect of the time and temperature of germination on the phenolic compounds of *Triticum aestivum*, *L.* and *Panicum miliaceum*, *L.* / D. Ceccaroni, V. Alfeo, E. Bravi, et al. // *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 2020. Vol. 8. No. 127. Article 109396. URL: <https://www.agronomy.it/index.php/agro/article/view/848> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.1016/j.lwt.2020.109396.
 17. Supplemental Effects of Biochar and Foliar Application of Ascorbic Acid on Physio-Biochemical Attributes of Barley (*Hordeum vulgare* L.) under Cadmium-Contaminated Soil / S. Yaseen, S. F. Amjad, N. Mansoor, et al. // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 16. Article 9128. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9128> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.3390/su13169128.
 18. Identification of the gene network modules highly associated with the synthesis of phenolics compounds in barley by transcriptome and metabolome analysis / Z. Han, M. Ahsan, M. F. Adil, et al. // *Food Chemistry*. 2020. Vol. 323. Article 126862. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030881462030724X?via%3Dihub> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126862.
 19. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / под ред. А. В. Гордеева, Г. А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 67 с.
 20. Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: an overview / A. G. Nino-Savala, Z. Zhuang, X. Ma, et al. // *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2019. Vol. 6. No. 4. P. 419–430. doi: 10.15302/J-FASE-2019273.
 21. Селюкова С. В. Тяжелые металлы в агроценозах // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 8. С. 85–93. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10815.
 22. Термодинамическое состояние кадмия и свинца в почвах каштаново-солонцового комплекса / А. П. Ендовицкий, В. П. Калинин, В. Б. Ильин и др. // *Агрохимия*. 2008. № 9. С. 59–65.
 23. Фазлыева А. С., Даукаев Р. А., Каримов Д. О. Влияние кадмия на здоровье населения и способы профилактики его токсических эффектов // *Медицина труда и экология человека*. 2022. № 1 (29). С. 220–235. doi: 10.24411/2411-3794-2022-10115.
 24. Шеромов А. М., Товстик Е. В., Шуплецова О. Н. Валидация методики определения полифенолов в зерне ячменя // *Съезд общества физиологов растений России «Биология растений в эпоху глобальных изменений климата: тезисы докладов*. Уфа: УИБ УФИЦ РАН, 2023. С. 395.

Поступила в редакцию 14.07.2023
 После доработки 25.08.2023
 Принята к публикации 10.10.2023