

ЛАБОРАТОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ КОЛЛЕКЦИИ ПРОСА (*PANICUM MILLIACEUM* L.)

Абылкаирова М.М.^{1*}, докторант 2 курса ОП 8D08101 – «Генетика и селекция сельскохозяйственных культур»

margarita.abkv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3445-7316>

Рысбекова А.Б.¹, кандидат биологических наук, ассоциированный профессор

a.rysbekova@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3716-7843>

Дюсибаева Э.Н.¹, PhD, ассоциированный профессор

e.dyussibayeva@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5960-6328>

Зейнуллина А.Е.¹, магистр сельскохозяйственных наук

a.zeinullina@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6880-0969>

Оразов А.Е.², PhD, ассоциированный профессор

orazov1994aidyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1390-9507>

¹Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

²Международный университет Астана, г. Астана, Казахстан

Аннотация. Создание новых сортов с повышенной засухоустойчивостью и адаптированных к определенным условиям окружающей среды является актуальной проблемой, в особенности в связи с глобальным потеплением и изменением климата по всему миру. Просо (*Panicum miliaceum*) – это известная с давних времен культура с высокой питательной ценностью, которая в то же время считается одной из самых засухоустойчивых среди зерновых. Просо способно давать стабильный урожай даже в условиях сильной засухи. Цель исследований – лабораторная диагностика засухоустойчивости коллекции проса из 152 сортообразцов различного эколого-географического происхождения и идентификация источников засухоустойчивости. Для ранней диагностики засухоустойчивости был использован осмотический раствор ПЭГ-6000 (полиэтиленгликоль), вызывающий плазмолиз в растительных клетках. Диагностическими критериями оценки засухоустойчивости являлись длина coleoptilia, проростка, корешка, процент всхожести и вес сырой биомассы. Изученные образцы демонстрировали значительную зависимость от генотипа по ранней засухоустойчивости. Полученные данные были проанализированы с использованием статистических методов, с помощью дисперсионного анализа была определена взаимосвязь между фактором засухи и данными параметрами, и выделены наиболее засухоустойчивые образцы в период роста проростков проса.

Ключевые слова: просо, *Panicum miliaceum*, коллекция, засухоустойчивость, лабораторная диагностика.

Введение. В последнее время актуальность селекции засухоустойчивых зерновых культур постоянно возрастает, особенно на фоне климатических изменений и связанных с ними рисков в сельском хозяйстве [1]. Такие факторы, как изменение климата и растущее население планеты, только подчеркивают необходимость этой работы, так как к 2050 году значительная часть планеты может пострадать от водного дефицита [2].

Засуха – это абиотический стресс, способный вызвать более 50% потери урожая [3]. Помимо этого, засуха может способствовать повышению уязвимости растений к другим факторам, таким как патогены, снижающие количественные и качественные показатели урожая [4]. Использование засухоустойчивых сельскохозяйственных культур поможет значительно сократить затраты на орошение. Таким образом, селекция засухоустойчивых растений – это стратегическая мера, способствующая адаптации сельского хозяйства к изменяющимся условиям, более рациональному использованию природных ресурсов и улучшению продовольственной безопасности.

Просо обыкновенное (*Panicum miliaceum* L.) является второй по засухоустойчивости сельскохозяйственной культурой после сорго [5]. Оно способно хорошо переносить дефицит влаги и выращивается в регионах с низким уровнем осадков. Просо эффективно использует минимальные запасы влаги, поэтому оно часто культивируется в засушливых и полузасушливых зонах.

На организменном уровне засухоустойчивость проса обусловлена различными чертами морфологического, физиологического и биохимического характера. Хорошо развитая корневая система улучшает доступ к влаге даже при её минимальном содержании в верхних слоях [6], также просо имеет высокую водопользовательную эффективность: оно может получать значительный урожай при минимальном потреблении воды. Просо способно накапливать осмотические вещества (пролин, сахароза и другие), что позволяет растению поддерживать тургор и клеточную жизнедеятельность при дефиците влаги и обладает коротким циклом созревания (около 60–90 дней), что позволяет ему избежать воздействия самых засушливых периодов сезона [7].

Рядом особенностей также обладают листья проса: они имеют плотное строение, что способствует меньшему испарению воды и более эффективному использованию солнечной энергии [8], более того, у проса есть способность уменьшать площадь устьиц на листьях при высоких температурах и низкой влажности воздуха, что уменьшает потерю влаги через транспирацию [9]. Также, у некоторых видов проса имеются восковые налёты на поверхности листьев, что снижает испарение влаги [10]. Эти и другие характеристики делают просо одной из самых устойчивых к засухе зерновых культур, которая успешно выращивается в регионах с неблагоприятными климатическими условиями.

На молекулярно-генетическом уровне засухоустойчивость проса определяется множеством генов, которые регулируют адаптационные механизмы на уровне клеток, тканей и организма в целом. Эти гены контролируют различные физиологические и биохимические процессы, помогающие растению адаптироваться к стрессу от недостатка влаги. На данный момент не было обнаружено подтвержденных генов, отвечающих за засухоустойчивость проса и его близкородственных ему растений, однако были обнаружены гены-кандидаты и МТА-корреляции. Согласно источникам, эти гены относятся к следующим семействам: AP2/ERF-ERF (APETALA2/ethylene responsive factor), регулирующие ответ на абиотический стресс; bHLH (Basic helix-loop-helix), отвечающие на стресс и за синтез метаболитов; bZIP (Basic leucine zipper), способствующие накоплению антоцианов и интеграции проходящих сигналов абсцизовой кислоты и глюкозы; MYB (Myeloblastosis), регулирующие экспрессию генов, контролирующих пролиферацию и дифференциацию клеток; WRKY (WRKYGQK heptapeptide), отвечающие на абиотический стресс и за адаптацию к окружающей среде [11]; JA (Jasmonic Acid), регулирующие экспрессию жасмоновой кислоты, вовлеченной в ответ на абиотические и биотические стрессы [9]; MAPK (Mitogen-activated protein kinase), регулирующие разнообразные клеточные процессы [12]. Эти семейства генов также характерны для других засухоустойчивых растений [13].

Полевой скрининг на засухоустойчивость проводить довольно трудно, так как он занимает большое количество времени, а также тяжело контролируем из-за внешних абиотических факторов. Именно поэтому лабораторная диагностика является оптимальным для анализа на засухоустойчивость, так как она позволяет не только экономить время, но и тщательно контролировать параметры эксперимента [14]. Лабораторный скрининг на засухоустойчивость способен выявить растения с повышенной способностью к выживанию и продуктивности в условиях дефицита воды и может эффективно оценить множество сортов или гибридов растений, прежде чем проводить полевые испытания. Это значительно ускоряет процесс селекции, помогая отбирать только перспективные сорта для дальнейших экспериментов. В связи с этим, целью исследования являлась лабораторная диагностика

засухоустойчивости коллекции проса и идентификация засухоустойчивых образцов для использования в селекции при создании новых сортов, устойчивых к засушливым регионам возделывания.

Материалы и методы исследования. Лабораторная диагностика на засухоустойчивость проводилась в трехкратной повторности согласно методике [15]. Для скрининга была отобрана коллекция из 152 сортообразцов различного эколого-географического происхождения отечественной и зарубежной селекции (рисунок 1).

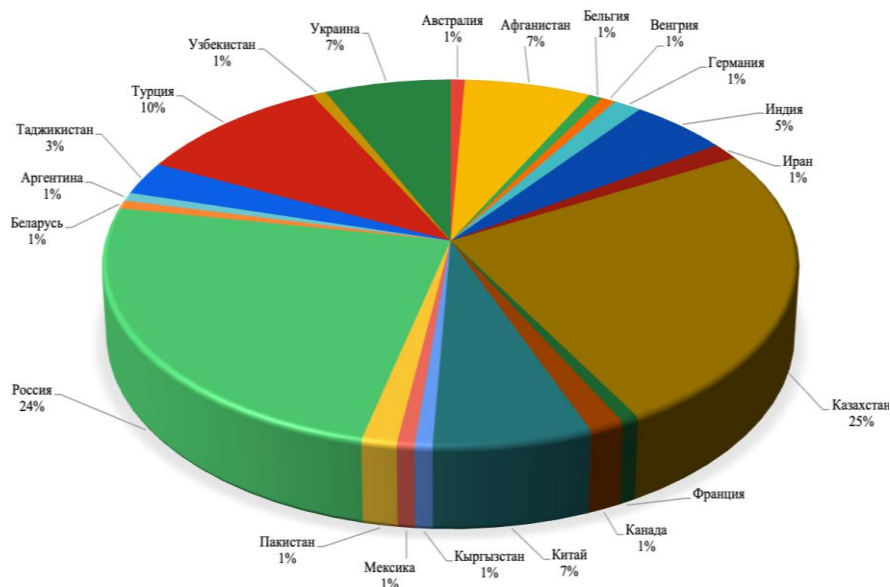


Рисунок 1 – Диаграмма сортообразцов для скрининга по происхождению

От каждого сортообразца выбиралось 50 случайно отобранных семян одного года репродукции для каждого повтора. Семена промывались сначала в 70-% растворе спирта в течение 10-20 секунд для обеззараживания и дезинфекции, затем в течение 5-10 секунд в дистиллированной воде. Затем семена помещали на чашку Петри в соответствии с описанным методом оценки засухоустойчивости. Контрольные варианты выращивали в дистиллированной воде, в опытных вариантах водный дефицит моделировали с помощью 20% осмотического раствора ПЭГ-6000. Выращивание проростков проводили в течение 7 суток при оптимальном увлажнении и водном дефиците в контролируемых условиях в термостат с температурой $+30^{\circ}\text{C}\pm 2$. На 8 сутки анализировали следующие параметры проростков (рисунок 2): всхожесть семян, длина coleoptиля, длина корешка, длина проростка. Затем ростки отстригались от семян для измерения общей сырой биомассы. Длины измерялись миллиметровыми линейками, всхожесть подсчитывалась вручную, сырая биомасса измерялась с помощью электронных лабораторных весов. Всхожесть подсчитывалась по формуле [16]:

$$GP = G/t * 100 \quad (1)$$

где GP = процент всхожести, G - количество проросших семян, а t - общее количество семян. Статистическая обработка результатов исследований выполнена дисперсионным анализом в программе RStudio.

На рисунке 2 продемонстрирован пример результата проращивания семян в чашках Петри с разной средой (дистиллированная вода или ПЭГ) через 7 суток после посева семян непосредственно перед измерением параметров.

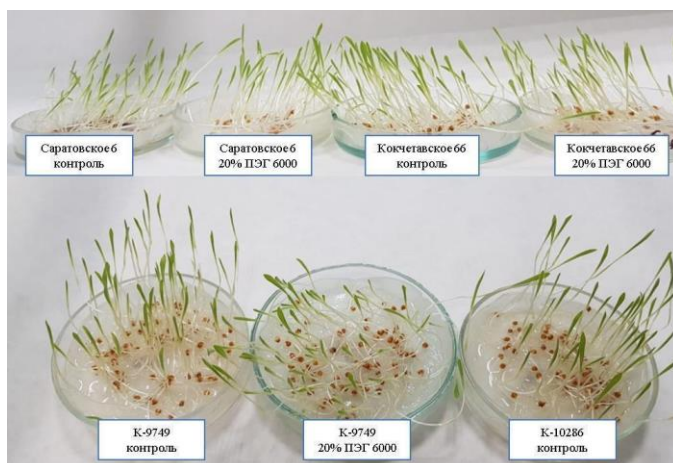


Рисунок 2 – Лабораторный скрининг коллекции на засухоустойчивость

Результаты. Лабораторная диагностика проростков коллекции проведена в 20% ПЭГ-6000 растворе по сравнению с дистиллированной водой. Одним из физиологических признаков для оценки засухоустойчивости является всхожесть семян. Результаты определения всхожести семян в контрольных и опытных вариантах представлены на рисунке 3, демонстрирующие распределение процентов прорастания коллекции.

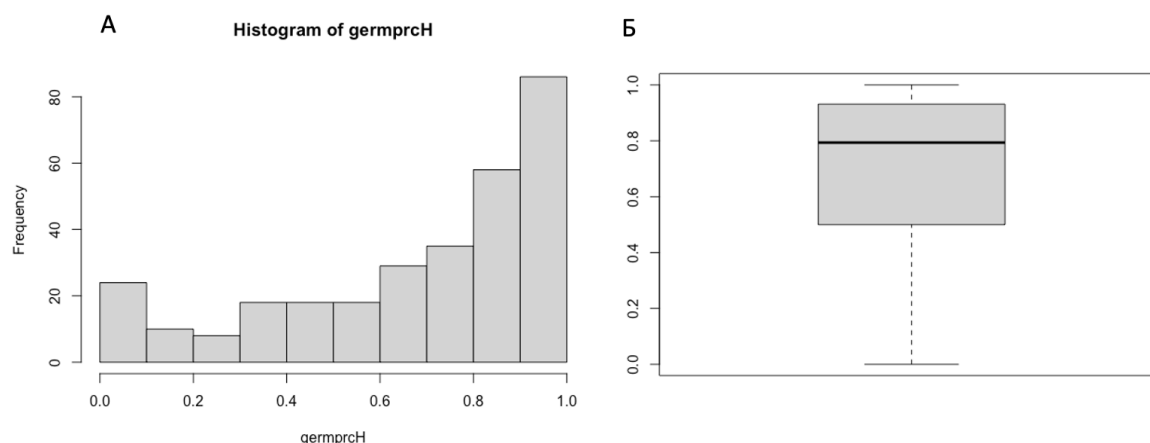


Рисунок 3 – Гистограмма процентов всхожести семян (А) и диаграмма размаха процентов всхожести семян (Б)

Гистограмма показывает, что большинство образцов имеет всхожесть в 80% и выше; диаграмма размаха показывает, что всхожесть образцов распределяется от 0% до 100% (нижняя и верхняя границы), нижний квартиль составляет 50%, верхний - 93,10%. Из контрольных образцов 30 образцов (19,74%) продемонстрировали всхожесть ниже 50%. 82 образца (53,95%) продемонстрировали всхожесть в 80% или выше, из них 20 образцов (13,16%) показали 100% всхожесть. Средняя всхожесть равна 71,72%, медиана - 83,33%. Из опытных образцов 41 образец (26,97%) продемонстрировал всхожесть ниже 50%. 69 образцов (45,39%) продемонстрировали всхожесть в 80% или выше, из них 11 образцов (7,24%) показали 100% всхожесть.

Средняя всхожесть равна 71,72%, медиана – 83,33%. Из опытных образцов 41 образец (26,97%) продемонстрировал всхожесть ниже 50%. 69 образцов (45,39%) продемонстрировали всхожесть в 80% или выше, из них 11 образцов (7,24%) показали 100% всхожесть. Средняя всхожесть составила 65,47%, медиана – 77,22%. 2 образца (NO.3, NO.5)

не проросли ни при контрольных, ни при опытных условиях. Образцов NO.1, NO.4, К-9571, PI 177015, К-2755 Sp4, К-8503, К-2241, К-2468, К-10312 К 1-12 Sp2 проросли в контрольных условиях, но не в условиях опыта; это может характеризовать данные образцы как чувствительные к условиям засухи.

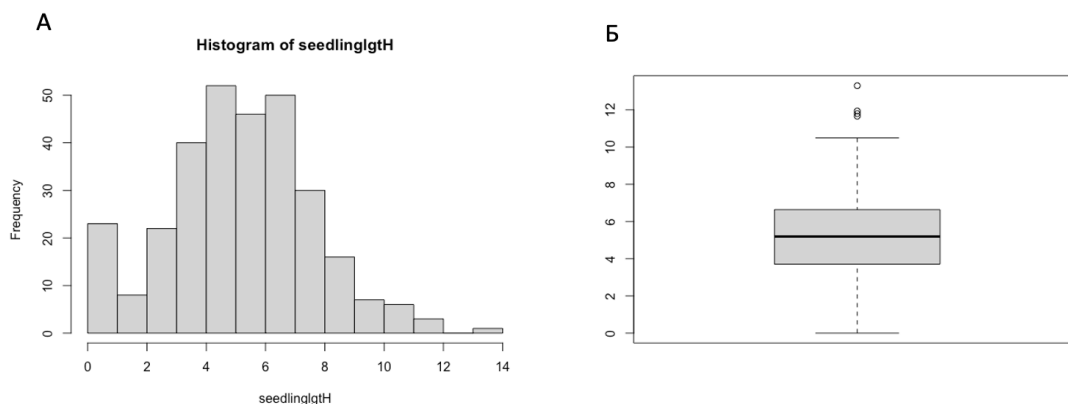


Рисунок 4 – Гистограмма длин проростков (А) и диаграмма размаха длин проростков (Б)

Средняя длина проростка для контрольных образцов составила 6,13 см, медиана - 6,25 см; 3 образца не имеют проростков. Для опытных образцов средняя длина проростка равна 4,22 см, медиана - 4,36 см; 9 образцов не имеют проростков. На рисунке представлены гистограмма (рисунок 4А) и диаграмма размаха (рисунок 4Б), демонстрирующие распределение длин проростков всех образцов. Гистограмма показывает, что большинство образцов имеет длину проростка в 4-8 см; диаграмма размаха показывает, что длины проростка колеблются от 0 до 10,75 (нижняя и верхняя границы), нижний квартиль составляет 3,72 см, верхний - 6,62 см. 4 образца выше верхней границы, согласно статистическому анализу, являются точечными данными и могут соответствовать ошибке измерения.

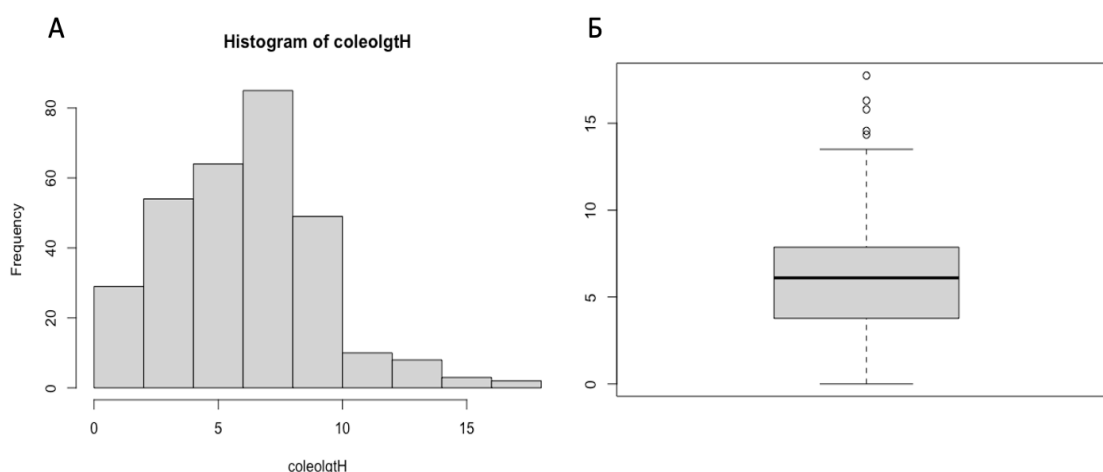


Рисунок 5 – Гистограмма длин coleoptiles (А) и диаграмма размаха длин coleoptiles (Б)

Длина coleoptiles для контрольных образцов в среднем составила 7,09 см, медиана - 7,41 см. Для опытных образцов средняя длина coleoptiles равна 4,94 см, медиана - 5,34 см. На рисунках представлены гистограмма (рисунок 5А) и диаграмма размаха (рисунок 5Б), демонстрирующие распределение длин coleoptiles. Гистограмма показывает, что большинство образцов имеет длину coleoptiles в 4-8 см; диаграмма размаха показывает,

что длины coleoptilia колеблются от 0 до 14 (нижняя и верхняя границы), нижний квартиль составляет 3,775 см, верхний – 7,865 см.

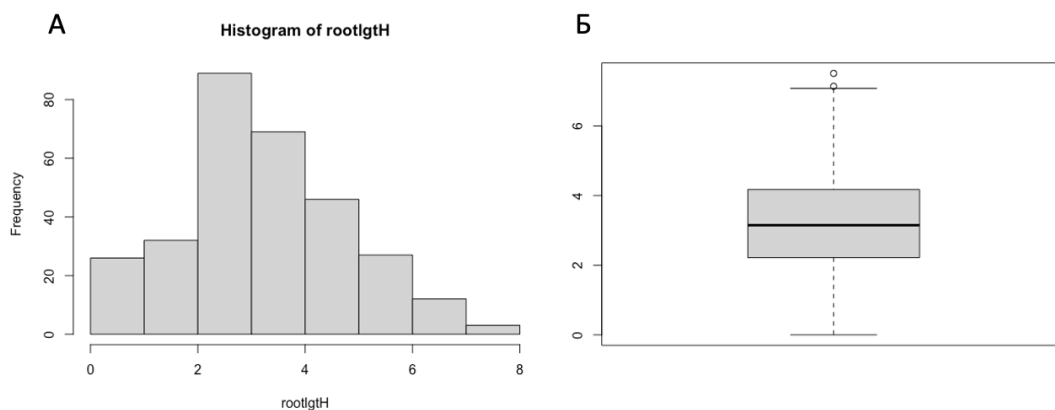


Рисунок 6 – Гистограмма длин корешков (А) и диаграмма размаха длин корешков (Б)

Длина корешка для контрольных образцов в среднем равна 3,85 см, медиана – 3,89 см. Для опытных образцов средняя длина корешка равна 2,55 см, медиана – 2,50 см. На рисунке представлены гистограмма (рисунок 6А) и диаграмма размаха (рисунок 6Б) с распределением длин корешков. Гистограмма показывает, что большинство образцов имеет длину корешка в 2-4 см; диаграмма размаха – что длины корешка колеблются от 0 до 7,2 (нижняя и верхняя границы), нижний квартиль составляет 2,225 см, верхний – 4,168 см.

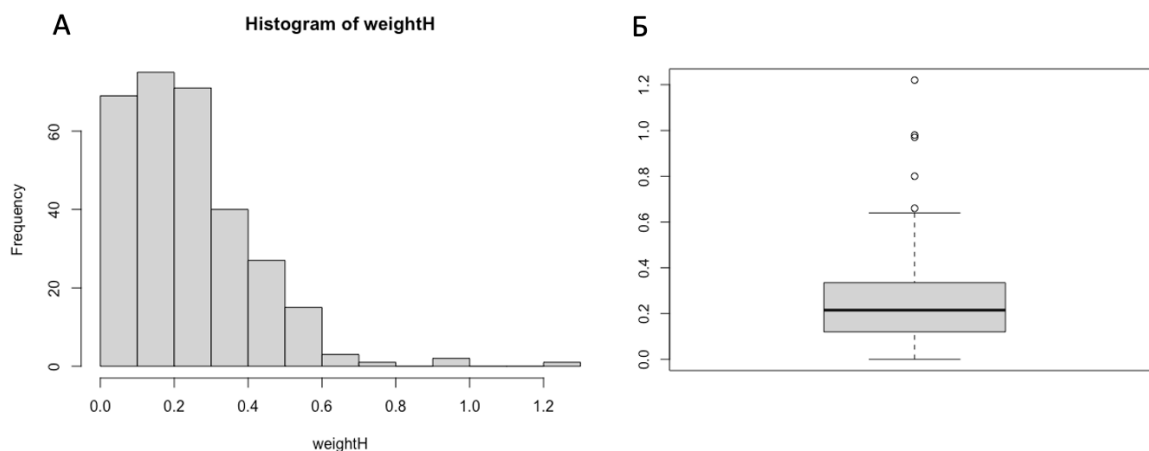


Рисунок 7 – Гистограмма веса биомассы (А) и диаграмма размаха веса биомассы (Б)

Для контрольных образцов средний вес биомассы равен 0,283 г, медиана – 0,270 г. Для опытных образцов средний вес биомассы равен 0,205 г, медиана – 0,180 г. На рисунке представлены гистограмма (рисунок 7А) и диаграмма размаха (рисунок 7Б), демонстрирующие распределение весов биомассы. Гистограмма показывает, что большинство образцов имеет вес биомассы в 0,01-0,3 г; диаграмма размаха показывает, что вес биомассы колеблется от 0 до 1,22 г (нижняя и верхняя границы), нижний квартиль составляет 0,12 г, верхний - 0,3325 г.

Обсуждение. Лабораторный скрининг – это эффективный способ оценки различных образцов растений на засухоустойчивость. По сравнению с полевым опытом, преимущество лабораторного скрининга в экономии времени и простой организации опыта; по сравнению с гидропонным опытом, лабораторный опыт представляет более естественные условия для растений, так как имеет субстрат [17]. Недостаток этого метода

заключается в невозможности полной экстраполяции на реальные условия из-за простоты модели, которая не учитывает значительную вариацию условий окружающей среды.

Для оценки влияния фактора засухи на параметры прорастания (всхожесть, вес биомассы, длины колеоптилей, проростков, корешков) был применен статистический дисперсионный анализ (таблицы 1-2).

Таблица 1 – Результаты дисперсионного анализа влияния фактора засухи

| Параметр | Количество степеней свободы | Сумма квадратов | Среднее квадратическое | F-значение | p-значение |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------|------------|---------------------|
| длина проростков | | | | | |
| Фактор засухи | 1 | 272,3 | 272,26 | 52,45 | 3,7 ⁻¹² |
| Остаток | 302 | 1567,7 | 5,19 | | |
| длина колеоптилей | | | | | |
| Фактор засухи | 1 | 351,7 | 351,7 | 41,59 | 4,47 ⁻¹⁰ |
| Остаток | 302 | 2554,2 | 8,5 | | |
| длина корешков | | | | | |
| Фактор засухи | 1 | 128,5 | 128,5 | 61,17 | 8,85 ⁻¹⁴ |
| Остаток | 302 | 634,6 | 2,1 | | |
| процент всхожести | | | | | |
| Фактор засухи | 1 | 0,297 | 0,2966 | 3,332 | 0,0689 |
| Остаток | 302 | 26,879 | 0,0890 | | |

| | | | | | |
|--------------------|-----|-------|--------|-------|--------------------|
| вес сырой биомассы | | | | | |
| Фактор засухи | 1 | 0,471 | 0,4705 | 15,64 | 9,55 ⁻⁵ |
| Остаток | 302 | 9,086 | 0,0301 | | |

Согласно анализу таблицы 1, статистически значимыми были признаны влияние фактора засухи на длины колеоптилей (p-значение=4,47⁻¹⁰), проростков (p-значение=3,7⁻¹²), корешков (p-значение=8,85⁻¹⁴) семян и на вес их биомассы (p-значение=9,55⁻⁵), но не на всхожесть (p-значение=0,0689). Тем не менее, все же нельзя не учитывать всхожесть при отборе на засухоустойчивость, поэтому она может рассматриваться как параметр, имеющий второстепенное значение по сравнению с остальными.

Таблица 2 – Результаты дисперсионного анализа влияния фактора сортообразца

| Параметр | Количество степеней свободы | Сумма квадратов | Среднее квадратическое | F-значение | p-значение |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------|------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| длина проростков | | | | | |
| Фактор сорта | 151 | 1183,1 | 7,835 | 1,813 | 0,000142 |
| Остаток | 152 | 656,9 | 4,322 | | |
| длина колеоптилей | | | | | |
| Фактор сорта | 151 | 2016 | 13,351 | 2,8 | 2,89 ⁻⁷ |
| Остаток | 152 | 889,9 | 5,855 | | |
| длина корешков | | | | | |
| Фактор сорта | 151 | 438,3 | 2,902 | 1,358 | 0,0303 |
| Остаток | 152 | 324,9 | 2,137 | | |
| процент всхожести | | | | | |
| Фактор сорта | 151 | 21,19 | 0,1403 | 3,561 | 1,91 ⁻¹⁴ |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------|-----|-------|---------|-------|--------------------|
| Остаток | 152 | 5,99 | 0,0394 | | |
| вес сырой биомассы | | | | | |
| Фактор сорта | 151 | 6,236 | 0,4130 | 1,891 | 5,16 ⁻⁵ |
| Остаток | 152 | 3,32 | 0,02184 | | |

Согласно анализу таблицы 2, статистически значимыми были признаны влияние фактора сортообразца на все параметры, кроме длины корешков, где влияние фактора присутствует, но в меньшей степени (p – значение = 0,0303).

Достаточно трудно определить наиболее засухоустойчивые образцы на основе всхожести, так как почти треть образцов (44 образца, 28,94%) продемонстрировали всхожесть в 90% и выше, из них 11 образцов (7,24%) – в 100%; это является дополнительной причиной учитывать всхожесть как второстепенный параметр в данном скрининге. Среди 32 образцов, отобранных как засухоустойчивые по вышеуказанным параметрам, были идентифицированы 14 образцов, имеющих 2 совпадения (таблица 3), и 3 образца, имеющих 3 совпадения (таблица 4).

Таблица 3 – Наиболее засухоустойчивые образцы по двум параметрам

| Образец | Параметр 1 | Параметр 2 |
|-----------------|-----------------|------------------|
| К-10222 | всхожесть | вес биомассы |
| PI 176654 | всхожесть | длина колеоптиля |
| К-1066 | всхожесть | длина корешка |
| PI 170604 | всхожесть | длина проростка |
| PI 365844 | всхожесть | вес биомассы |
| PI 204598 | всхожесть | вес биомассы |
| К-3742 | всхожесть | длина корешка |
| Памяти Берсиева | всхожесть | длина корешка |
| К-10286 | всхожесть | вес биомассы |
| К-8528 | всхожесть | длина проростка |
| PI 654404 | всхожесть | длина колеоптиля |
| PI 209790 | всхожесть | вес биомассы |
| К-1437 | всхожесть | длина корешка |
| К-9989 | длина проростка | длина колеоптиля |

Согласно каждому параметру (длина проростка, колеоптиля, корешка, вес биомассы) было отобрано по 8 наиболее отличившихся образцов. 14 сортообразцов были определены как средnezасухоустойчивые по двум параметрам.

Таблица 4 – Наиболее засухоустойчивые образцы по трем параметрам

| Образец | Параметр 1 | Параметр 2 | Параметр 3 |
|-----------|-----------------|------------------|------------------|
| К-10275 | всхожесть | длина проростка | вес биомассы |
| PI 251398 | всхожесть | длина проростка | длина колеоптиля |
| PI 170587 | длина проростка | длина колеоптиля | вес биомассы |

Тем же методом 3 сортообразца были определены как наиболее засухоустойчивые по трем параметрам (таблица 4). Они представляют интерес как потенциальные источники засухоустойчивости для селекции проса в Казахстане.

Лабораторная диагностика используется для оценки физиологических показателей, так и для изучения внутриклеточных показателей (водный потенциал листьев,

осмотический потенциал) и биохимических параметров (содержание растворимых белков, активность антиоксидантов) [18]. Помимо этого, данный метод также может предоставить данные для генетического анализа и идентификации потенциально интересных генов [19]. Выявление засухоустойчивых сортообразцов важно при подборе исходного селекционного материала для создания сортов, обладающих устойчивостью к недостатку водоснабжения. По этой причине подобные исследования можно наблюдать для разных сельскохозяйственных культур: соя [20, 21], горох [22] и другие [23].

Заключение. Таким образом, с помощью лабораторной диагностики на засухоустойчивость была проанализирована коллекция из 152 образцов. Использование в качестве осмотика 20% раствора ПЭГ-6000 в опыте позволило достоверно выявить наиболее засухоустойчивые генотипы. Результаты лабораторной диагностики на засухоустойчивость свидетельствуют об относительной высокой засухоустойчивости 3 образцов: К-10275, PI 251398 и PI 170587; помимо них, к средnezасухоустойчивым можно отнести 14 образцов: К-10222, PI 176654, К-1066, PI 170604, PI 365844, PI 204598, К-3742, Памяти Берсиева, К-10286, К-8528, PI 654404, PI 209790, К-1437, К-9989. Данные образцы, характеризующиеся относительной засухоустойчивостью в условиях искусственно смоделированного стресса, можно использовать в селекционных программах для создания новых засухоустойчивых сортов с высоким адаптивным потенциалом.

Финансирование. Данное исследование реализовано по проекту AP22785049 «Усовершенствование селекционного процесса на основе химического мутагенеза для получения скороспелых мутантных форм проса (*Panicum miliaceum* L.)» в рамках грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 гг.

Литература:

- [1] Foyer, C.H., Kranner I. (2023). Plant adaptation to climate change. *Biochem. J.*, 480(22), 1865–1869. <https://doi.org/10.1042/BJ20231577>
- [2] Gupta, A., Rico-Medina A., Caño-Delgado A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368, 266-269. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>
- [3] Verma, A.K., Deepti S. (2016). Abiotic stress and crop improvement: Current scenario. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 4(4), 345-346. <https://doi.org/10.15406/apar.2016.04.00149>
- [4] Singh, B.K., Delgado-Baquerizo M., Egidi E., Guirado E., Leach J. E., Liu H., & Trivedi P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nat. Rev. Microbiol.*, 21, 640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- [5] Bhat, S., Nandini C., Srinathareddy, S., Jayarame G., Prabhakar K. (2019). Proso millet (*Panicum miliaceum* L.)- A climate resilient crop for food and nutritional security: A review. *Environ. Conserv. J.*, 20, 113-124. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2019.20315>
- [6] Comas, L.H., Becker S.R., Cruz V.MV., Byrne P.F., & Dierig D.A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Front. Plant Sci.*, 4, 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- [7] Tadele, Z. (2016). Drought adaptation in millets. *Intech Open*. <https://doi.org/10.5772/61929>
- [8] Yuan, Y., Liu C., Gao Y., Ma Q., Yang Q., & Feng B. (2021). Proso millet (*Panicum miliaceum* L.): A potential crop to meet demand scenario for sustainable saline agriculture. *J. Environ. Manage*, 296, 113216. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113216>
- [9] Zhang, Y., Gao X., Li J., Gong X., Yang P., Gao J., Wang P., & Feng B. (2019). Comparative analysis of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) leaf transcriptomes for insight into drought tolerance mechanisms. *BMC Plant Biol.*, 19, 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2001-x>
- [10] Ren, J., Ma C., Li M., Dang Y., Yu X., & Du S. (2023). Physicochemical, structural, and functional properties of non-waxy and waxy proso millet protein. *Foods*, 12(5), 1116. <https://doi.org/10.3390/foods12051116>
- [11] Zhang, P., Wang B., Guo Y., Wang T., Wei Q., Luo Y., Li H., Wu H., Wang X., & Zhang X. (2024). Identification of drought-resistant response in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) root through

physiological and transcriptomic analysis. *Plants*, 13(12), 1693. <https://doi.org/10.3390/plants13121693>

[12] **Yuan, Y.**, Liu L., Gao Y., Yang Q., Dong K., Liu T., & Feng B. (2022). Comparative analysis of drought-responsive physiological and transcriptome in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes with contrasting drought tolerance. *Ind. Crop. Prod.*, 177, 114498. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114498>

[13] **Wang, J.**, Li C., Li L., Reynolds M., Mao X., & Jing R. (2021). Exploitation of drought tolerance-related genes for crop improvement. *Int. J. Mol. Sci.*, 22(19), 10265. <https://doi.org/10.3390/ijms221910265>

[14] **Marchin, R.M.**, Ossola A., Leishman M. R., & Ellsworth D. S. (2020). A simple method for simulating drought effects on plants. *Front. Plant Sci.*, 10, Article 1715. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01715>

[15] **Shivhare, R.**, Lata C. (2019). Assessment of pearl millet genotypes for drought stress tolerance at early and late seedling stages. *Acta. Physiol. Plant.*, 41, 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2831-z>

[16] **Edmond, J.B.**, Drapala W.J. (1958). The effects of temperature, sand and soil, and acetone on germination of okra seeds. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 71, 428-434.

[17] **Osmolovskaya, N.**, Shumilina J., Kim A., Didio A., Grishina T., Bilova T., Keltsieva O.A., Zhukov V., Tikhonovich I., Tarakhovskaya E., Frolov A., & Wessjohann L.A. (2018). Methodology of drought stress research: Experimental setup and physiological characterization. *Int. J. Mol. Sci.*, 19(12), 40 <https://doi.org/10.3390/ijms19124089>

[18] **Zou, J.**, Hu W., Li Y.X., He J.Q., Zhu H.H., & Zhou Z.G. (2020). Screening of drought resistance indices and evaluation of drought resistance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *J. Integr. Agric.*, 19(2), 495–508. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62696-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62696-1)

[19] **Lata, C.**, Sahu P.P., & Prasad M. (2010). Comparative transcriptome analysis of differentially expressed genes in foxtail millet (*Setaria italica* L.) during dehydration stress. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 393(4), 720-727. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2010.02.068>

[20] **Леухина, Т.В.**, Леухина О.В., Головина Е.В. (2021). Исследования засухоустойчивости сортов сои северного экотипа в условиях осмотического стресса. Селекция и сорторазведение садовых культур, 8 (1-2), 53-56. doi: 10.24412/2500-0454-2021-10117

[21] **Есенбаева, Д.**, Жайлаусалкызы Г. (2024). Оценка засухоустойчивость сортов сои. *Izdenister Natigeler*, (1 (101), 39–46. <https://doi.org/10.37884/1-2024/04>

[22] **Семенова, Е.В.**, Косарева И.А. Диагностика засухоустойчивости образцов гороха (*Pisum sativum* L.) из коллекции ВИР. Биотехнология и селекция растений. 2021;4(2):5-14. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-2-o1>

[23] **Егоров, Ю.В.**, Кириченко А.В., Зайцева Р.И., Комаров Н.М. (2019). Метод определения засухоустойчивости зерновых культур. *Евразийский Союз Ученых*, (3-5 (60)), 37-41.

References:

[1] **Foyer, C.H.**, Kranner I. (2023). Plant adaptation to climate change. *Biochem. J.*, 480(22), 1865–1869. <https://doi.org/10.1042/BJ20231577>

[2] **Gupta, A.**, Rico-Medina A., Caño-Delgado A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368, 266-269. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>

[3] **Verma, A.K.**, Deepti S. (2016). Abiotic stress and crop improvement: Current scenario. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 4(4), 345-346. <https://doi.org/10.15406/apar.2016.04.00149>

[4] **Singh, B.K.**, Delgado-Baquerizo, M., Egidi E., Guirado E., Leach J. E., Liu H., & Trivedi P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nat. Rev. Microbiol.*, 21, 640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>

[5] **Bhat, S.**, Nandini C., Srinathareddy S., Jayarame G., Prabhakar K. (2019). Proso millet (*Panicum miliaceum* L.)- A climate resilient crop for food and nutritional security: A review. *Environ. Conserv. J.*, 20, 113-124. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2019.20315>

[6] **Comas, L.H.**, Becker S.R., Cruz V.MV., Byrne P.F., & Dierig D.A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Front. Plant Sci.*, 4, 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>

[7] **Tadele, Z.** (2016). Drought adaptation in millets. *Intech Open*. <https://doi.org/10.5772/61929>

- [8] **Yuan, Y.**, Liu C., Gao Y., Ma Q., Yang Q., & Feng B. (2021). Proso millet (*Panicum miliaceum* L.): A potential crop to meet demand scenario for sustainable saline agriculture. *J. Environ. Manage*, 296, 113216. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113216>
- [9] **Zhang, Y.**, Gao X., Li J., Gong X., Yang P., Gao J., Wang P., & Feng B. (2019). Comparative analysis of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) leaf transcriptomes for insight into drought tolerance mechanisms. *BMC Plant Biol.*, 19, 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2001-x>
- [10] **Ren, J.**, Ma C., Li M., Dang Y., Yu X., & Du S. (2023). Physicochemical, structural, and functional properties of non-waxy and waxy proso millet protein. *Foods*, 12(5), 1116. <https://doi.org/10.3390/foods12051116>
- [11] **Zhang, P.**, Wang B., Guo Y., Wang T., Wei Q., Luo Y., Li H., Wu H., Wang X., & Zhang X. (2024). Identification of drought-resistant response in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) root through physiological and transcriptomic analysis. *Plants*, 13(12), 1693. <https://doi.org/10.3390/plants13121693>
- [12] **Yuan, Y.**, Liu L., Gao Y., Yang Q., Dong K., Liu T., & Feng B. (2022). Comparative analysis of drought-responsive physiological and transcriptome in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes with contrasting drought tolerance. *Ind. Crop. Prod.*, 177, 114498. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114498>
- [13] **Wang, J.**, Li C., Li L., Reynolds M., Mao X., & Jing R. (2021). Exploitation of drought tolerance-related genes for crop improvement. *Int. J. Mol. Sci.*, 22(19), 10265. <https://doi.org/10.3390/ijms221910265>
- [14] **Marchin, R.M.**, Ossola A., Leishman M. R., & Ellsworth D. S. (2020). A simple method for simulating drought effects on plants. *Front. Plant Sci.*, 10, Article 1715. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01715>
- [15] **Shivhare, R.**, Lata C. (2019). Assessment of pearl millet genotypes for drought stress tolerance at early and late seedling stages. *Acta. Physiol. Plant.*, 41, 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2831-z>
- [16] **Edmond, J.B.**, Drapala W.J. (1958). The effects of temperature, sand and soil, and acetone on germination of okra seeds. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 71, 428-434.
- [17] **Osmolovskaya, N.**, Shumilina J., Kim A., Didio A., Grishina T., Bilova T., Keltsieva O.A., Zhukov V., Tikhonovich I., Tarakhovskaya E., Frolov A., & Wessjohann L.A. (2018). Methodology of drought stress research: Experimental setup and physiological characterization. *Int. J. Mol. Sci.*, 19(12), 40. <https://doi.org/10.3390/ijms19124089>
- [18] **Zou, J.**, Hu W., Li Y.X., He J.Q., Zhu H.H., & Zhou Z.G. (2020). Screening of drought resistance indices and evaluation of drought resistance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *J. Integr. Agric.*, 19(2), 495–508. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62696-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62696-1)
- [19] **Lata, C.**, Sahu P.P., & Prasad M. (2010). Comparative transcriptome analysis of differentially expressed genes in foxtail millet (*Setaria italica* L.) during dehydration stress. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 393(4), 720-727. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2010.02.068>
- [20] **Leuhina, T.V.**, Leuhina O.V., Golovina E.V. (2021). Issledovaniya zasuhoustojchivosti sortov soi severnogo jekotipa v usloviyah osmoticheskogo stressa. Selekcija i sortorazvedenie sadovyh kul'tur, 8 (1-2), 53-56. doi: 10.24412/2500-0454-2021-10117 [in Russian]
- [21] **Esenbaeva, D.**, Zhajlausalqyzy G. (2024). Ocenka zasuhoustojchivost' sortov soi. Izdenister Natigeler, (1 (101), 39–46. <https://doi.org/10.37884/1-2024/04> [in Russian]
- [22] **Semenova, E.V.**, Kosareva I.A. Diagnostika zasuhoustojchivosti obrazcov goroha (*Pisum sativum* L.) iz kollekcii VIR. *Biotehnologija i selekcija rastenij*. 2021;4(2):5-14. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-2-01> [in Russian]
- [23] **Egorov, Ju.V.**, Kirichenko A.V., Zajceva R.I., Komarov N.M. (2019). Metod opredelenija zasuhoustojchivosti zernovyh kul'tur. *Evrazijskij Sojuz Uchenyh*, (3-5 (60)), 37-41. [in Russian]

**ТАРЫ (*PANICUM MILIACEUM* L.) КОЛЛЕКЦИЯСЫНЫҢ
ҚҰРҒАҚШЫЛЫҚҚА ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРХАНАЛЫҚ ДИАГНОСТИКАЛАУ**

Абылкаирова М.М.^{1*}, 8D08101 – «Ауыл шаруашылық дақылдарының генетикасы және селекциясы» БББ бағдарламасының 2 курс докторанты

Рысбекова А.Б.¹, биология ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор
Дюсибаева Э.Н.¹, PhD, қауымдастырылған профессор

Зейнуллина А.Е.¹, ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі
Оразов А.Е.², PhD, қауымдастырылған профессор

¹С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан

²Астана халықаралық университеті, Астана қаласы, Қазақстан

Андатпа. Құрғақшылыққа төзімділігі жоғары және қоршаған ортаның нақты жағдайларына бейімделген жаңа сорттарды жасау, әсіресе, дүние жүзіндегі жаһандық жылыну мен климаттың өзгеруі жағдайында өзекті мәселе болып табылады. Тары (*Panicum miliaceum*) – жоғары тағамдық құндылығы бар бұрыннан белгілі дақыл, ол да дәнді дақылдар арасында құрғақшылыққа ең төзімді болып саналады. Тары қатты құрғақшылық жағдайында да тұрақты өнім алуға қабілетті. Зерттеудің мақсаты әртүрлі экологиялық-географиялық шығу тегі 152 сортты тары коллекциясының құрғақшылыққа төзімділігін зертханалық диагностикалау және құрғақшылыққа төзімділік көздерін анықтау. Құрғақшылыққа төзімділікті ерте диагностикалау үшін өсімдік жасушаларында плазмолиз тудыратын ПЭГ-6000 (полиэтиленгликоль) осмостық ерітіндісі қолданылды. Құрғақшылыққа төзімділікті бағалаудың диагностикалық критерийлері колеоптилдің, өскіннің, тамырдың ұзындығы, өну пайызы және ылғалды биомассасының салмағы болды. Зерттелген үлгілер ерте құрғақшылыққа төзімділік үшін генотипке айтарлықтай тәуелділікті көрсетті. Алынған мәліметтер статистикалық әдістермен талданды, дисперсиялық талдауды қолдану арқылы құрғақшылық факторы мен осы көрсеткіштер арасындағы байланыс анықталды және тары өскіндерінің өсу кезеңінде құрғақшылыққа ең төзімді үлгілер анықталды.

Тірек сөздер: тары, *Panicum miliaceum*, коллекция, құрғақшылыққа төзімділік, зертханалық диагностика.

LABORATORY DIAGNOSTICS OF DROUGHT RESISTANCE OF PROSO MILLET COLLECTION (*PANICUM MILIACEUM* L.)

Abylkairova M.M.^{1*}, 2nd year doctoral student of "Genetics and crop breeding" 8D08101 EP

Rysbekova A.B.¹, Candidate of Biological sciences, associate professor

Dyussibayeva E.N.¹, PhD, associate professor

Zeinullina A.Ye.¹, Master of Agricultural sciences

Orazov A.Ye.², PhD, Associate professor

¹S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

²Astana International University, Astana, Kazakhstan

Annotation. The development of new varieties with increased drought resistance and adapted to specific environment conditions is a pressing issue, especially in connection with global warming and climate change. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) is a crop valued since ancient times for its high nutritional value, and at the same time proso millet is considered to be one of the most drought-tolerant grains. It is capable of producing stable yields even under severe drought conditions. The purpose of the research is laboratory diagnostics of drought resistance of a proso millet collection including 152 varieties of various ecological and geographical origins and identification of sources of drought resistance. For early diagnostics of drought resistance, an osmotic solution of PEG-6000 was used because PEG induces plasmolysis in plant cells. Diagnostic criteria for assessing drought resistance were the length of the coleoptile, sprout, rootlet, germination percentage and weight of raw biomass. The studied samples demonstrated a significant impact of the genotype on early drought resistance. The obtained data were analysed using statistical methods, the relationship between the drought factor and these parameters was determined using analysis of variance, and the most drought tolerant samples during the growth period of proso millet seedlings were identified.

Keywords: proso millet, *Panicum miliaceum*, collection, drought resistance, laboratory diagnostics.