

ВЛИЯНИЕ ОСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН *HELIANTHUS ANNUUS* L.: САХАРОЗА КАК ОСМОТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР

Д.Г. ФЁДОРОВА, Н.М. НАЗАРОВА, А.М. ГВОЗДИКОВА

(Оренбургский государственный университет)

Оренбургская область относится к зоне рискованного земледелия, для которого типичны засухи, чередующиеся с суховеями. Helianthus annuus L., сорт 'Посейдон 625', – важная продовольственная культура, возделываемая в регионе, поэтому важно выявить влияние аридизации климата на самых ранних этапах ее онтогенеза. Целью исследований являлось изучение влияния различных концентраций осмотического вещества (сахарозы) на прорастание и дальнейший рост проростков семян «Helianthus annuus L., сорт 'Посейдон 625'». Лабораторное проращивание проводили в условиях вегетативной камеры по ГОСТ 12038–84. Для оценки прорастания семян в условиях физиологической засухи использовали методику Н.Н. Кожушко, рекомендованную ФИЦ ВИР. Заложено 6 вариантов опытов по проращиванию семян в растворах сахарозы с концентрацией 1,4% (P = 1 атм); 4,4% (P = 3 атм); 7,4% (P = 5 атм); 10,5% (P = 8 атм); 16,6% (P = 12 атм) и дистиллированной водой в качестве контрольного. В результате исследований выявлено, что действие осмотического давления, равного 1 атм, не оказывает значимого влияния на всхожесть, однако оказывает раннее стрессирующее воздействие на семена, снижая их энергию прорастания даже в условиях минимального дефицита почвенной влаги. Посредством дисперсионного анализа установлено достоверное снижение ($p < 0,05$) как всхожести, так и ростовых процессов у проростков «Helianthus annuus L., сорт 'Посейдон 625'», при увеличении концентрации раствора-осмотика по вариантам опыта. Таким образом, по реакции на дефицит увлажнения на ранних этапах онтогенеза исследуемый сорт можно отнести к группе среднезасухоустойчивых.

Ключевые слова: подсолнечник, осмотический стресс, физиологическая засуха, всхожесть, проростки.

Введение

Засуха – абиотический стрессовый фактор, ограничивающий урожайность всех сельскохозяйственных культур. *Helianthus annuus* L. (подсолнечник) обладает умеренной засухоустойчивостью. Однако стрессирующее влияние засухи способно оказать выраженное негативное влияние растение на всех этапах его развития. В настоящее время зона выращивания данной культуры все больше расширяется и подсолнечник активно районирован в засушливых регионах, в первую очередь – за счет достижений современной селекции и гибридизации [1, 2].

Несмотря на то, урожайность сельскохозяйственных культур исторически имеет тенденцию роста, устойчивость растений к засухе стала серьезной проблемой в контексте глобального изменения климата. В настоящее время поиск компромисса между повышением урожайности сельскохозяйственных культур и обеспечением их устойчивости к засухе, как способности противостоять условиям низкой влагообеспеченности, является обычным явлением [3, 4].

Засуха провоцирует осмотический стресс у организмов, который вызывает обезвоживание растительных клеток [5]. В ходе онтогенетического цикла сельскохозяйственных растений каждая стадия развития, от прорастания семян до формирования

урожая, чувствительна к обезвоживанию. Особенно важным является достаточное увлажнение в фазу прорастания семян, так как оно имеет решающее значение для формирования и устойчивости всходов, а также для развития растений и их продуктивности в агросистемах в целом [6–8].

Метод моделирования недостатка почвенной влаги, основанный на лабораторном проращивании семян в растворе сахарозы, имеет большую эффективность по сравнению с полевым, так как в полевых условиях невозможно создать постоянные условия увлажнения, температурный режим, исключить сопряженное действие солей почвенного раствора. Подобные исследования проводились на важнейших продовольственных культурах: ячмень, овес и др. [9, 10]. Однако данные о влиянии недостатка почвенного увлажнения на ранних этапах онтогенеза подсолнечника в литературе отсутствуют.

Оренбуржье относится к зоне дефицитного увлажнения. Количество осадков на протяжении всего вегетационного периода является недостаточным и распределяется крайне неравномерно. Наличие суховеев также отягчает гидрологический режим региона. Поэтому изучение степени засухоустойчивости культур, имеющих важное продовольственное назначение, таких, как подсолнечник, на территории региона становится вполне целесообразным.

Для определения степени устойчивости к недостатку почвенной влаги для зерновых культур используют какую-либо одну концентрацию раствора-осмотика и в соответствии с полученными результатами приходят к выводу о степени засухоустойчивости исследуемого объекта. Нами предлагается проведение ряда экспериментов с несколькими концентрациями раствора сахарозы, так как сорт может обладать устойчивостью к разной степени дефицита увлажнения.

Данные исследования являются начальным этапом в комплексной исследовательской работе по оценке степени влияния аридизации климата на урожайность подсолнечника.

Цель исследований: изучение влияния различных концентраций осмотического вещества (сахарозы) на прорастание и дальнейший рост проростков «*Helianthus annuus L.*, сорт 'Посейдон 625'».

Материал и методы исследований

Объектом исследований являются семена «*Helianthus annuus L.*, сорт 'Посейдон 625'». Проращивание семян проведено на базе лаборатории экспериментальной ботаники ботанического сада ОГУ по ГОСТу 12038–84 [11].

Условия опыта: вегетативная камера ЛУРО ВРС500Н, отсутствие освещения. Температурный режим – постоянный (+23°C), влажность – постоянная (50%), аэрация воздуха – каждые 10 с.

Параметры опыта: чашки Петри, 3×30 шт. семян. Ложе для проращивания – фильтровальная бумага. Первичное увлажнение – 6 мл, все последующие ежедневно – по 2 мл.

Моделирование условий физиологической засухи с использованием раствора сахарозы различных концентраций проведено по методике, рекомендованной ВИР и применяемой рядом авторов [9, 10, 12]. Степень устойчивости семян в условиях осмотического стресса интерпретирована по Н.Н. Кожушко [13].

В чашки Петри было заложено 6 вариантов опыта: семена подсолнечника в растворах сахарозы с концентрацией 1,4; 4,4; 7,4; 10,5 и 16,6%. В контрольном варианте опыта проращивание осуществлено в растворе дистиллированной воды. Осмотическое давление раствора каждой концентрации рассчитывали по формуле:

$$P_{\text{осм}} = i \times C_{\text{М}} \times R \times T \text{ (кПа)},$$

где i – постоянная Вант-Гоффа; $C_{\text{М}}$ – молярная концентрация определяемого раствора, моль/л; R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль); T – температура, °К.

Поскольку сахароза не является электролитом, постоянная Вант-Гоффа принята за 1. Исследуемые концентрации раствора сахарозы 1,4; 4,4; 7,4; 10,5 и 16,6% соответствуют осмотическому давлению, равному 1, 3, 5, 8 и 12 атмосфер (атм) соответственно.

На третьи сутки эксперимента определяли энергию прорастания, на пятые – всхожесть семян в контроле. Всхожесть в растворах осмотического вещества определена в процентном соотношении количества проросших семян в растворе сахарозы к количеству семян, проросших в дистиллированной воде. Проросшими считали все семена, у которых зародышевый корешок вышел за пределы семенной кожуры.

Исследования проводили в 2 этапа:

1. Определение энергии прорастания и всхожести семян под действием различного уровня осмотического стресса.

2. Оценка степени депрессии ростовых процессов при повышении осмотического давления раствора для проращивания.

Статистическая обработка данных включает в себя базовый набор параметров математической статистики (среднее с ошибкой, коэффициент вариации), а также факторный дисперсионный и уточняющий статистические ассоциации апостериорные анализы, выполненные с использованием программного обеспечения Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного эксперимента по проращиванию семян «*Helianthus annuus L.*, сорт 'Посейдон 625'» в условиях осмотического стресса установлено, что энергия прорастания семян и их всхожесть значительно изменяются в зависимости от концентрации раствора сахарозы, используемого при проращивании.

Максимум энергии прорастания отмечен в контрольном варианте опыта и составляет 80% при среднем уровне изменчивости по пробам ($C_v = 25\%$). Близко к значению контроля регистрируется энергия прорастания семян при проращивании в 1,4%-ном растворе сахарозы. Наибольший размах изменчивости, как и степень стандартного отклонения по изучаемому параметру, отмечен в 10,5%-ном растворе сахарозы. Средний инвариантный показатель энергии прорастания, немногим более 50%, отмечен в варианте опыта с использованием 7,4%-ного раствора сахарозы. При увеличении осмотического давления до 12 атм, эквивалентных 16,6%-ному раствору сахарозы, прорастание семян спустя трое суток от начала проращивания не отмечается. Семена при данном уровне осмотического стресса теряют способность к нормальному развитию проростков (табл. 1).

В каждом варианте опыта всхожесть семян оказалась выше энергии их прорастания. Максимум проросших семян обнаружен не только в контроле, но и в 1,4%-ном растворе сахарозы (93%). В отличие от энергии прорастания в контрольном варианте опыта всхожесть является стабильной ($C_v = 8\%$) по пробам. Несмотря на первичную депрессию энергии прорастания у семян, проращиваемых в 1,4%-ном растворе сахарозы, также сохраняется их высокая всхожесть.

Всхожесть семян, равная 64%, регистрируется в 4,4- и 7,4%-ном растворах сахарозы, причем в последнем варианте опыта ее показатель является абсолютно стабильным по пробам ($C_v = 0$).

Низкий показатель всхожести, равный 29%, с самым высоким уровнем изменчивости отмечен при проращивании семян в 10,5%-ном растворе сахарозы. Ввиду действия стресса от физиологической засухи в 16,6%-ном растворе сахарозы отмечается минимальное инвариантное значение всхожести, равное 7%.

Установлено, что энергия прорастания и всхожесть семян в контроле и в различных растворах сахарозы имеют значимые различия ($p \ll 0,05$). Энергия прорастания семян в контроле и в растворе с осмотическим давлением в 1 атм достоверно выше, чем в растворах 8 и 12 атм. Отмечено также, что энергия прорастания семян в растворах 1 и 3 атм является значимо выше, чем в растворе, создающем осмотическое давление 12 атм (табл. 2).

На всхожесть недостаточный запас почвенной влаги оказывает большее влияние, чем на энергию прорастания семян. Всхожесть семян в контроле имеет значимые отличия от вариантов опытов с растворами 3, 5, 8 и 12 атм. Разница прорастания в растворе с осмотическим давлением 1 атм является несущественной. Однако отмечено, что всхожесть семян в растворах 1, 3 и 5 атм достоверно выше, чем в растворах 8 и 12 атм (табл. 3).

Таблица 1

**Всхожесть и энергия прорастания семян подсолнечника
в различных концентрациях осмотического вещества**

Раствор сахарозы		Лабораторная всхожесть					
		энергия прорастания, %			всхожесть, %		
%	атм.	x^*	Sx^{**}	$C_v, \%$	x	Sx	$C_v, \%$
1,4	1	73	2,1	18	93	2,1	16
4,4	3	60	2,5	29	64	2,5	29
7,4	5	56	0,6	7	64	0	0
10,5	8	20	2,6	88	29	1,5	35
16,6	12	-	-	-	7	1,0	0
Контроль (дистил. вода)		80	3,1	25	93	1,2	8

*Среднее значение признака.

**Стандартное отклонение.

Таблица 2

**Определение степени влияния различного осмотического давления
на энергию прорастания семян подсолнечника (HSD тест Тьюки)**

Давление, атм.	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
Контроль {1}	-					
1 {2}	0,99	-				
3 {3}	0,35	0,54	-			
5 {4}	0,35	0,54	1,00	-		
8 {5}	0,002	0,003	0,06	0,06	-	
12 {6}	0,0003	0,0004	0,003	0,003	0,54	-

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

На втором этапе исследований проведено наблюдение за динамикой роста проростков. В растворе с концентрацией сахарозы 16,6% единичные проростки появились только в последний день опыта, поэтому считаем возможным эти данные из анализа исключить и констатировать факт того, что осмотический стресс при действии давления 12 атм значительно угнетает физиологическую активность семян, и это приводит к невозможности полноценного осуществления ими ростовых процессов.

По истечении первых суток опыта проросшие семена регистрировали только в контроле. Средняя длина корешка – $1,48 \pm 0,05$ мм. Затем отмечен интенсивный их прирост ежесуточно. Величина стандартного отклонения прироста в контроле была максимальной по истечении вторых суток эксперимента, в последующие дни рост стабилизировался (рис. 1).

Таблица 3

Определение степени влияния различного осмотического давления на всхожесть семян подсолнечника (HSD тест Тьюки)

Давление, атм.	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
Контроль {1}	-					
1 {2}	0,8	-				
3 {3}	0,008*	0,07	-			
5 {4}	0,013	0,11	0,99	-		
8 {5}	0,0002	0,0004	0,047	0,0304	-	
12 {6}	0,0002	0,0002	0,0006	0,0004	0,111	-

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

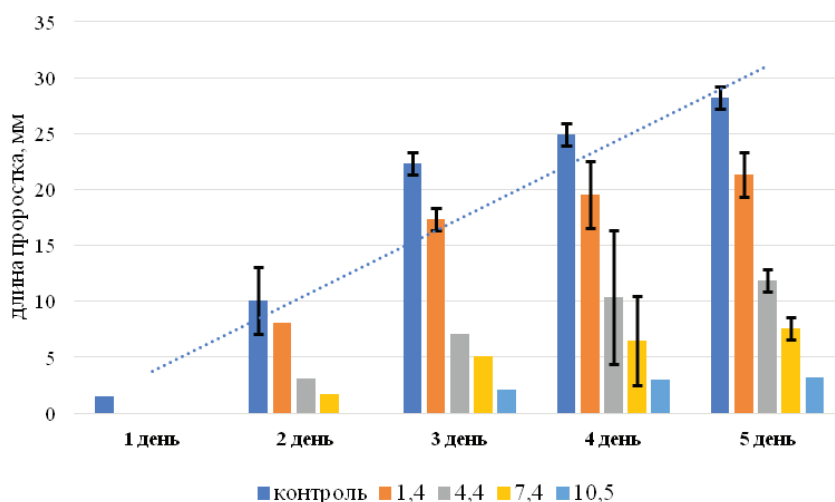


Рис. 1. Динамика изменения длины проростков (по вертикали, мм) по дням проращивания (по горизонтали) при различном уровне осмотического стресса. Расчеты авторов по вариантам опытов: контроль (дистиллированная вода); 1,4%-ный раствор сахарозы (P = 1 атм); 4,4%-ный раствор сахарозы (P = 3 атм); 7,4%-ный раствор сахарозы (P = 5 атм); 10,5%-ный раствор сахарозы (P = 8 атм)

Прирост по истечении вторых суток эксперимента был отмечен в концентрации раствора сахарозы 1,4% и составил $8,06 \pm 2,57$ мм. Неравномерность прироста нарастала и достигла своего максимума к четвертому дню эксперимента ($C_v = 20\%$). К моменту завершения эксперимента была отмечена тенденция стабилизации ростовых процессов.

В концентрации раствора сахарозы 4,4 и 7,4% прирост корешка в длину был значительно ниже, чем в вышеописанных вариантах опыта, и составил к исходу вторых суток $3,13 \pm 1,1$ и $1,66 \pm 0,72$ мм соответственно. У ростовых процессов отмечена та же динамика, что и в концентрации 1,4%, однако с большей вариацией степени прироста, достигающей максимума ($C_v = 38\%$) к четвертым суткам эксперимента.

В концентрации 10,5% первые проростки обнаружены только на третьи сутки эксперимента. По истечении пятых суток длина проростков в среднем составила $3,17 \pm 1,55$ мм.

Поскольку третьи и пятые сутки эксперимента являются контрольными, в эти периоды произведена оценка влияния условий дефицита увлажнения на интенсивность роста проростков. По вариантам опыта установлено достоверное его снижение ($p \ll 0,05$) при увеличении осмотического давления. Оценка депрессии роста проростков показала, что на третьи сутки эксперимента темпы роста значительно снижались во всех вариантах опыта по сравнению с контролем и концентрацией раствора сахарозы 1,4%, эквивалентному осмотическому давлению в 1 атм (табл. 4).

На пятые сутки эксперимента длина проростков в условиях осмотического давления, равного 1 атм, практически достигла значений контрольного. Однако тенденция депрессии прироста по сравнению с вариантами опыта с растворами сахарозы с осмотическим давлением 3, 5, 8 и 12 атм продолжила сохраняться (табл. 5).

Таблица 4

Определение степени влияния различного осмотического давления на рост проростков (третьи сутки эксперимента)

Давление, атм.	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
Контроль {1}	-					
1 {2}	0,023	-				
3 {3}	0,0002	0,025	-			
5 {4}	0,0002	0,004	0,89	-		
8 {5}	0,0002	0,0008	0,28	0,82	-	
12 {6}	0,0002	0,0003	0,045	0,26	0,87	-

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Определение степени влияния различного осмотического давления на рост проростков (пятые сутки эксперимента)

Давление, атм.	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
Контроль {1}	-					
1 {2}	0,73	-				
3 {3}	0,0007	0,005	-			
5 {4}	0,0006	0,004	0,99	-		
8 {5}	0,0002	0,0005	0,56	0,63	-	
12 {6}	0,0002	0,0002	0,17	0,21	0,94	-

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Выводы

Максимум энергии прорастания семян «*Helianthus annuus* L., сорт ‘Посейдон 625’» отмечен в контрольном варианте опыта и составляет 80% всхожести, определяющейся на уровне 93%, – в контроле и в варианте опыта с концентрацией сахарозы 1,4%. Установлено, что энергия прорастания семян в контроле и в растворе с осмотическим давлением 1 атм достоверно выше ($p << 0,05$), чем в растворах 8 и 12 атм. Всхожесть семян в контроле и растворе с осмотическим давлением в 1 атм является несущественной. Однако осмотическое давление в 1 атм оказывает раннее стрессорное действие на семена, снижая их энергию прорастания.

При проращивании в растворе сахарозы 10,5%, создающей осмотическое давление 8 атм, получен наиболее широкий размах вариации по признакам «Энергия прорастания семян» ($C_v = 88\%$) и «Всхожесть» ($C_v = 35\%$). Данная концентрация раствора-осмотика обеспечивает лучшую дифференциацию семян «*Helianthus annuus* L., сорт ‘Посейдон 625’» по степени их прорастания в условиях дефицита увлажнения.

Установлено, что незначительное влияние на рост проростков оказывает раствор сахарозы концентрацией 1,4%. При увеличении осмотического стресса энергия прорастания, всхожесть и интенсивность роста проростков достоверно снижаются ($p << 0,05$) и практически полностью ингибируются в варианте опыта с раствором сахарозы 16,6% (12 атм).

Таким образом, исходя из показателей всхожести семян в условиях осмотического стресса установлено, что «*Helianthus annuus* L., сорт ‘Посейдон 625’» относится к группе среднезасухоустойчивых.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–76–10060, <https://rscf.ru/project/23-76-10060/>

Библиографический список

1. Wu Y., Wang Y., Shi H., Hu H., Yi L., Hou J. Time-course transcriptome and WGCNA analysis revealed the drought response mechanism of two sunflower inbred lines // *PLoS One*. – 2022. – № 17 (4). DOI: 10.1371/journal.pone.0265447.
2. Ghaffari M., Gholizadeh A., Rauf S., Shariati F. Drought-stress induced changes of fatty acid composition affecting sunflower grain yield and oil quality // *Food Sci Nutr*. – 2023. – № 11 (12). – Pp. 7718–7731. DOI: 10.1002/fsn3.3690.
3. Gao H., Cui J., Liu S., Wang S., Lian Y., Bai Y., Zhu T., Wu H., Wang Y., Yang S., Li X., Zhuang J., Chen L., Gong Z., Qin F. Natural variations of ZmSRO1d modulate the trade-off between drought resistance and yield by affecting ZmRBOHC-mediated stomatal ROS production in maize // *Mol Plant*. – 2022. – № 15 (10). – Pp. 1558–1574. DOI: 10.1016/j.molp.2022.08.009.
4. Парфенова Е.С., Шамова М.Г., Набатова Н.А., Псарева Е.А. Оценка относительной засухоустойчивости сортов озимой ржи способом проращивания на растворе сахарозы // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2018. – № 11 (2). – С. 347–351. DOI: 10.17513/mjpf.12503.
5. Nakashima K., Yamaguchi-Shinozaki K. ABA signaling in stress-response and seed development // *Plant Cell Rep*. – 2013. – № 32 (7). – Pp. 959–70. DOI: 10.1007/s00299-013-1418-1.
6. Baudouin E., Puyaubert J., Bailly C. Physiological and Environmental Regulation of Seed Germination: From Signaling Events to Molecular Responses // *Int J Mol Sci*. – 2022. – № 23 (9). – P. 4839. DOI: 10.3390/ijms23094839.
7. Zhang Y., Su J., Cheng D., Wang R., Mei Y., Hu H., Shen W., Zhang Y. Nitric oxide contributes to methane-induced osmotic stress tolerance in mung bean // *BMC Plant Biol*. – 2018. – № 18 (1). – P. 207. DOI: 10.1186/s12870-018-1426-y.
8. Лисицын Е.М. Эдафическая устойчивость растений и методы ее оценки // *Методы и технологии в селекции растений: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – 2014. – С. 52–59.
9. Любимова А.В., Мамаева В.С., Меницкова А.А. Генетическая засухоустойчивость современных сортов овса посевного как ответ глобальному изменению климата // *Аграрный вестник Урала*. – 2022. – № 6 (221). – С. 49–59. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-221-06-49-59.
10. Газе В.Л., Лобунская И.А., Костылев П.И., Филиппов Е.Г. Оценка засухоустойчивости образцов ярового ячменя в начальный период развития на растворе осмотиков // *Зерновое хозяйство России*. – 2022. – № (4). – С. 34–38. DOI: 10.31367/2079-8725-2022-82-4-34-38.
11. ГОСТ 12038–84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: дата введения 1986–07–01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 11 с.
12. Дроздов С.Н., Удовенко Г.В. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: Методическое руководство. – Л.: ВИР, 1988. – 228 с.
13. Кожушко Н.Н. Оценка засухоустойчивости полевых культур // *Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: метод. руководство* / Под ред. Г.В. Удовенко. – Л.: ВИР, 1988. – С. 10–24.

EFFECT OF OSMOTIC STRESS ON THE GERMINATION OF *HELIANTHUS ANNUUS* L. SEEDS: SUCROSE AS AN OSMOTIC REGULATOR

D.G. FEDOROVA, N.M. NAZAROVA, A.M. GVOZDIKOVA

(Orenburg State University)

Orenburg region belongs to the zone of risky agriculture, which is characterized by droughts alternating with dry and hot winds. *Helianthus annuus* L., variety 'Poseidon 625' is an important food crop cultivated in the region, therefore it is important to identify the influence of climatic drought already at the earliest stages of its ontogenesis. The aim of this study is to investigate the effect of different concentrations of osmotic substance (sucrose) on the germination and further growth of seedlings of *H. annuus* 'Poseidon 625'. The laboratory germination was carried out in a vegetative chamber according to GOST 12038–84. The method of N.N. Kozhushko recommended by FRC VIR was used for evaluation of seed germination in physiological drought conditions. There are six variants of experiments on germination of seeds in sucrose solutions with concentrations of 1.4% ($P = 1$ atm), 4.4% ($P = 3$ atm), 7.4% ($P = 5$ atm), 10.5% ($P = 8$ atm), and 16.6% ($P = 12$ atm) and distilled water as a control. The study showed that the effect of osmotic pressure equal to 1 atm has no significant effect on germination, but has an early stress effect on seeds, reducing their germination energy even in conditions of minimal soil moisture deficiency. By means of a dispersion analysis, a significant decrease ($p \ll 0.05$) in both germination and growth processes of seedlings of *H. annuus* 'Poseidon 625' was found with increasing concentration of the osmotic solution by variants of the experiment. Thus, according to the reaction to the lack of moisture in the early stages of ontogenesis the studied variety can be assigned to the group of medium drought resistant.

Keywords: sunflower; osmotic stress, physiological drought, germination, seedlings.

References

1. Wu Y., Wang Y., Shi H., Hu H. et al. Time-course transcriptome and WGCNA analysis revealed the drought response mechanism of two sunflower inbred lines. *PLoS One*. 2022;17(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265447>
2. Ghaffari M., Gholizadeh A., Rauf S., Shariati F. Drought-stress induced changes of fatty acid composition affecting sunflower grain yield and oil quality. *Food Sci Nutr*. 2023;11(12):7718–7731. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3690>
3. Gao H., Cui J., Liu S., Wang S. et al. Natural variations of ZmSRO1d modulate the trade-off between drought resistance and yield by affecting ZmRBOHC-mediated stomatal ROS production in maize. *Mol Plant*. 2022;15(10):1558–1574. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.08.009>
4. Parfenova E.S., Shamova M.G., Nabatova N.A., Psareva E.A. Assessment of the relative drought resistance of varieties of winter rye, method of germination on sucrose. *Mezhdunarodniy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2018;11(2):347–351. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/mjpf.12503>
5. Nakashima K., Yamaguchi-Shinozaki K. ABA signaling in stress-response and seed development. *Plant Cell Rep*. 2013;32(7):959–70. <https://doi.org/10.1007/s00299-013-1418-1>
6. Baudouin E., Puyaubert J., Bailly C. Physiological and Environmental Regulation of Seed Germination: From Signaling Events to Molecular Responses. *Int J Mol Sci*. 2022;23(9):4839. <https://doi.org/10.3390/ijms23094839>

7. Zhang Y., Su J., Cheng D., Wang R. et al. Nitric oxide contributes to methane-induced osmotic stress tolerance in mung bean. *BMC Plant Biol.* 2018;18(1):207. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1426-y>

8. Lisitsyn E.M. Edaphic resistance of plants and methods of its assessment. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem "Metody i tekhnologii v seleksii rasteniy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem"*, Kirov, April 9–10, 2014. Kirov, Russia: NIISH, 2014:52–59. (In Russ.)

9. Lyubimova A.V., Mamaeva V.S., Menshikova A.A. Genetic drought resistance of modern oat varieties as a response to global climate change. *Agrarian Bulletin of the Urals.* 2022;6(221):49–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-221-06-49-59>

10. Gaze V.L., Lobunskaya I.A., Kostylev P.I., Filippov E.G. Estimation of drought tolerance of spring barley samples in their initial period of development on an osmotic solution. *Grain Economy of Russia.* 2022;4:34–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-4-34-38>

11. GOST 12038–84. *Agricultural seeds. Methods for determination of germination.* Effective date: January 07, 1986. Moscow, Russia: Standartinform, 2011:11. (In Russ.)

12. Drozdov S.N., Udovenko G.V. *Diagnostics of plant resistance to stress: methodical manual.* Leningrad, USSR: VIR, 1988:228. (In Russ.)

13. Kozhushko N.N. Assessment of Drought Resistance of Field Crops. In: *Udovenko G.V. (Ed.). Diagnostics of Plant Resistance to Stress. Methodological Guidance.* Leningrad: VIR, 1988. P. 10–24. (In Russ.)

Сведения об авторах

Федорова Дарья Геннадьевна, канд. биол. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»; 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; e-mail: daryaorlova24@rambler.ru; тел.: (961) 901–84–77

Назарова Наталья Михайловна, канд. биол. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»; 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; e-mail: Nazarova-1989@yandex.ru; тел.: (922) 897–58–85

Гвоздикова Анастасия Михайловна, канд. биол. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»; 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; e-mail: anastasiaporv@mail.ru; тел.: (982) 208–42–20

Information about the authors

Darya G. Fedorova, CSc (Bio), Orenburg State University (13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; phone: (961) 901–84–77; e-mail: daryaorlova24@rambler.ru)

Natalia M. Nazarova, CSc (Bio), Orenburg State University (13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; phone: (922) 897–58–85; e-mail: Nazarova-1989@yandex.ru)

Anastasia M. Gvozdikova, CSc (Bio), Orenburg State University (13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; phone: (982) 208–42–20; e-mail: anastasiaporv@mail.ru)