

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРОРОСТКОВ КАРТОФЕЛЯ НА ОСМОТИЧЕСКИЙ СТРЕСС РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Аргумбаева А.К.^{1,3} , Қали Б.Р.¹ , Абеуова Л.С.¹ , Насиев Б.Н.³ , Манабаева Ш.А.^{1,2,3*} ¹ Национальный центр биотехнологии, 010000, Казахстан, г. Астана, Кургальжинское шоссе, 13/5² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, 010000, Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2³ Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, 090009, Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51

Автор для корреспонденции: *manabayeva@biocenter.kz

АБСТРАКТ

Засуха остается одним из наиболее значимых абиотических стрессов, ограничивающих рост растений и продуктивность сельскохозяйственных культур. В данном исследовании проанализированы физиологические реакции проростков картофеля (*Solanum tuberosum* L.) на осмотический стресс, индуцированный полиэтиленгликолем (ПЭГ-6000) в концентрациях 0, 2, 4, 6 и 8%. Установлено, что высокие концентрации ПЭГ-6000 достоверно подавляют рост проростков и снижают содержания хлорофилла. Физиологический анализ показал снижение уровня малонового диальдегида (МДА) и увеличение активности каталазы (КАТ) в условиях осмотического стресса. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию физиологических процессов и внутренних механизмов устойчивости картофеля к засухе, включая изменения содержания хлорофилла, и могут быть использованы в селекционных программах по созданию сортов, устойчивых к абиотическим стрессам.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., in vitro, ПЭГ-6000, хлорофилл, МДА, КАТ

ВВЕДЕНИЕ

Засуха является одной из наиболее серьезных угроз для глобального сельского хозяйства, оказывая негативное влияние на рост растений и продуктивность важнейших продовольственных культур. Согласно современным климатическим прогнозам, в период с 2021 по 2040 гг. ожидается дальнейшее повышение глобальной температуры с вероятным достижением порогового значения в 1,5 °С. Это усилит проявление различных климатических рисков и экстремальных погодных явлений, оказывающих значительное влияние на экосистемы и аграрное производство [1]. В настоящее время засухи характерны для 110 стран мира и охватывают около 43% обрабатываемых земель. Почти половина суши представлена пустынями или засушливыми территориями, а 70% сельскохозяйственных угодий подвергаются засолению (по данным ООН). Сильные засухи фиксируются на глобальном уровне практически ежегодно. Казахстан ежегодно сталкивается с выраженными засушливыми аномалиями, охватывающими все его регионы. Согласно данным РГП «Казгидромет», в текущем году засуха прогнозируется в 12 регионах страны. При этом средняя температура воздуха местами превышает климатическую норму на 2-4 °С, а количество атмосферных осадков в отдельных районах снижено на 30-50% относительно многолетних показателей.

Картофель (*Solanum tuberosum* L.), занимающий четвертое место в мировом производстве после пшеницы, риса и кукурузы, особенно чувствителен к водному дефициту [2]. Даже кратковременные засухи могут существенно снизить качество клубней. Водный дефицит отрицательно сказывается на урожайности картофеля на всех этапах развития, особенно в период формирования клубней, что может привести к увеличению продолжительности вегетационного периода [3, 4].

Засуха также снижает объем и скорость фотосинтеза, ограничивая поступление углекислого газа, что влияет

на накопление крахмала и сахаров в клубнях картофеля. Хлорофилл, как основной пигмент фотосинтеза, необходим для усвоения углерода [5] и напрямую связан со его скоростью в растениях [6]. Снижение содержания хлорофиллов часто служит надёжным индикатором стресса, так как отражает нарушение фотосинтетических процессов [7].

Короткая и слаборазвитая корневая система делает картофель более уязвимым к почвенной засухе, а сочетание почвенной и атмосферной засухи оказывает более разрушительное воздействие на растения. Недавние исследования показали, что стресс, вызванный засухой, у картофеля влияет на физиологические, биохимические и молекулярные процессы, что приводит к снижению продуктивности и урожайности клубней [8-10]. Морфологические характеристики картофеля, включая высоту растений, длину и архитектуру корней, а также размер и массу клубней, заметно ухудшается в стрессовых условиях [11]. Значительные успехи достигнуты в изучении архитектуры корневой системы картофеля в различных стрессовых условиях, что подробно описано Zinta и соавторами [12].

С биохимической точки зрения, тепловой и засушливый стресс вызывают дисбаланс питания, приводя к чрезмерному накоплению активных форм кислорода (АФК) и супероксидных анион-радикалов в растениях. Это в свою очередь, вызывает окислительное повреждение белков, нуклеиновых кислот и клеточных мембран. Толерантные генотипы, как правило, характеризуются более высокой эффективностью использования воды, развитой архитектурой корней и усиленной активностью антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза (СОД), пероксидаза (ПОД), каталаза (КАТ) и тиоредоксинпероксидаза (ТПХ), которые играют ключевую роль в антиоксидантной защите [10, 13]. Реакции проростков картофеля на физиологические и биохимические эффекты теплового, засушливого и комбинированного стрессов на стадии про-

растения были подробно рассмотрены Wang и соавторами [8] в 2024 году.

Длительная засуха приводит к дестабилизации и разрушению клеточных мембран: повышается их проницаемость, усиливается перекисное окисление липидов, что сопровождается накоплением малонового диальдегида (MDA), деградацией пигментов и значительной утечке ионов, вплоть до гибели клеток [14, 15]. Уровень MDA служит надежным маркером окислительного повреждения мембран при стрессе [16, 17].

Одним из широко применяемых методов моделирования засухи *in vitro* является использование полиэтиленгликоля (ПЭГ), который создает контролируемый осмотический стресс без токсического действия на клетки [18]. Такой подход позволяет в контролируемых условиях изучать ранние физиологические и биохимические реакции растений на водный дефицит.

Хлорофилл, MDA и КАТ являются важными биохимическими маркерами, широко используемыми для оценки засухоустойчивости растений. Снижение содержания хлорофилла отражает угнетение фотосинтетической активности под действием стресса, тогда как уровень MDA служит индикатором степени окислительного повреждения клеточных мембран. Повышение активности КАТ свидетельствует об активации антиоксидантной системы растения в ответ на стрессовые условия. Комплексный анализ этих показателей позволяет оценить уровень устойчивости растений к водному дефициту и эффективности их адаптивных механизмов.

В условиях изменения климата проблема засухоустойчивости картофеля становится все более актуальной, что требует углубленного изучения механизмов устойчивости растений к водному стрессу [19, 20]. Несмотря на значительный объем исследований в этой области, многие аспекты физиологических и молекулярных адаптаций к осмотическому стрессу остаются недостаточно изученными. Целью настоящего исследования являлось комплексное изучение физиологических и биохимических реакций проростков картофеля на осмотический стресс, индуцированный с ПЭГ, с акцентом на динамику содержания хлорофиллов, активность антиоксидантных ферментов и уровень окислительного стресса, связанных с устойчивостью к засухе. Полученные результаты имеют важное значение для разработки стратегий повышения засухоустойчивости картофеля в условиях глобального изменения климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Условия выращивания и роста картофеля

В качестве объектов исследований использовали два сорта картофеля отечественной селекции Тохтар и Аксор. Сорт Аксор был выведен в Казахском НИИ картофелеводства и овощеводства методом ступенчатой внутривидовой гибридизации и включен в Государственный реестр селекционных достижений РК в 1998г. Сорт Тохтар – среднеранний, высокоурожайный, с высокой полевой устойчивостью к вирусным и грибным болезням, отличается относительной жаро- и засухоустойчивостью. Оба сорта устойчивы к вирусным заболеваниям и жарким почвен-

но-климатическим условиям, районированы в Южном Казахстане [21].

Первичное микроразмножение проводили на твердой питательной среде Мурасиге и Скуга (МС) [22]. Культивирование осуществляли в стеклянных пробирках размером 10×160 мм в климатической камере с контролируемыми параметрами: температура 25±2°C, фотопериод 16/8 ч (свет/темнота) и интенсивность освещения 2500 лк.

Для моделирования засухи использовали двухнедельные проростки с развитыми двумя листьями, которые асептически переносили на модифицированную среду МС, содержащую ПЭГ-6000 в концентрациях 0 (контроль), 2, 4, 6 и 8%. Такой подход позволил воспроизвести водный дефицит различной степени интенсивности и оценить устойчивость растений к стрессовым условиям.

Физиологические анализы

Определение содержания хлорофиллов

Для определения хлорофилла в экстрактах зеленых листьев использовали 96% этиловый спирт. Навеску из 100 мг растирали в гомогенизаторе (Qiagen) с добавлением 1 мл 96% этилового спирта в течение 2-3 мин. Полученный гомогенат переносили в центрифужную пробирку объемом 2 мл и доводили до этого объема 96% этиловым спиртом. Пробирки выдерживали при температуре +4°C в течение 10-20 минут, затем центрифугировали 2 минут при 14 000 об/мин. Супернатант отбирали в кюветы для спектрофотометра (Россия, ПЭ-5400УФ), в качестве бланка использовался 96% этиловый спирт. Оптическую плотность измеряли при длинах волн 665 нм (хлорофилл а) и 649 нм (хлорофилл b). Концентрации пигментов в экстракте рассчитывали по формуле Lichtenthaler [23]. Концентрацию хлорофиллов, a (C_a , мг/л) и b (C_b , мг/л) рассчитывали по формуле: $C_a = 13,70 \times A_{665} - 5,76 \times A_{649}$, $C_b = 25,8 \times A_{649} - 7,60 \times A_{665}$, где A_{665} и A_{649} – оптическая плотность раствора при соответствующих длинах волн [23, 24].

Определение содержания MDA

Для измерения MDA брали навеску из листьев (50 мг) измельчали в гомогенизаторе (Qiagen) с добавлением 2 мл дистиллированной воды в течение 3 мин, переносили в центрифужную пробирку 15 мл и добавили еще 3 мл дистиллированной воды. Затем добавили 5 мл 0,5% тиобарбитуровой кислоты (ТБА) и тщательно перемешивали. Смесь кипятили в течении 10 минут (от момента появления первых пузырьков) в пробирке. После быстро охлаждали в холодной воде и центрифугировали при 3 000 об/мин в течении 15 мин. Отбирали надосадочную жидкость и поглощение измеряли при длинах волн: 450 нм, 532 нм и 600 нм. Содержание MDA рассчитывали по методу Peng [25, 26]. $MDA (X) = [6,452 \times (OD_{532} - OD_{600}) - 0,559 \times OD_{450}] \times V_t / (F_w \times 1000)$ [33], где X – содержание MDA (мкмоль/г), V_t – общий объем экстракционного раствора (мл), а F_w – масса свежего образца (г).

Определение активности КАТ

Активность КАТ определяли по методике Navig и Mchale с некоторыми модификациями [27]. Сначала навеску листьев и стеблей картофеля (0,5 г) гомогенизировали с 4 мл фосфатно-солевого буфера (0,2 М, pH 7,8; Gibco, UK) с добавлением магнитных шариков. Затем смесь переносили в центрифужную пробирку и центри-

фугировали при $12\,000 \times g$ в течение 10 мин. Надосадочную жидкость (2,5 мл) смешивали с 2,5 мл 0,1 М H_2O_2 и инкубировали на водяной бане при температуре $30^\circ C$ в течение 10 мин. Реакцию останавливали добавлением 2,5 мл 10% H_2SO_4 , после чего проводили титрование 0,1 М $KMnO_4$ до появления устойчивого розового окрашивания. Поглощение регистрировали при длине волны 240 нм с помощью спектрофотометра. Активность КАТ выражали в мкмоль H_2O_2 , разложившейся за минуту на мг белка (мкмоль $мин^{-1} / мг^{-1}$).

Статистический анализ

Статистическую обработку данных проводили в программе GraphPad Prism 8.0. Результаты представлены как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение (SD) трёх биологических повторов. Для анализа использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние ПЭГ-6000 на рост проростков картофеля

Согласно полученным данным, уже при концентрации ПЭГ-6000 в 2% наблюдалось замедление роста побегов и угнетение корневой системы проростков картофеля. С увеличением концентрации ПЭГ-6000 высота растений снижалась по сравнению с контролем (рисунок 1).

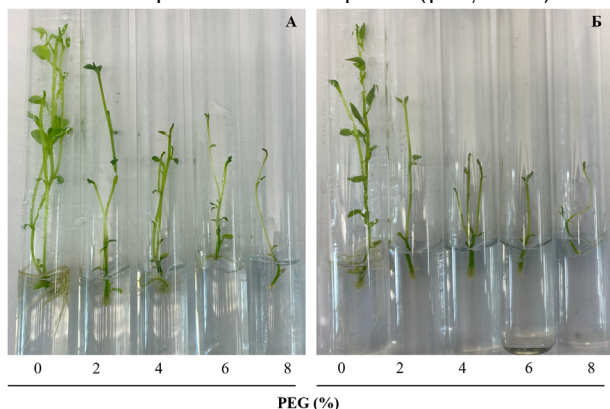


Рисунок 1. Рост проростков картофеля сортов Аксор (А) и Тохтар (Б), при различных концентрациях ПЭГ-6000 (0% до 8%)

Влияние осмотического стресса на содержание хлорофилла в листьях

На рисунке 2 представлены данные по содержанию хлорофилла (мг/г сырой массы) в листьях сортов Аксор и Тохтар в условиях осмотического стресса, вызванного добавлением ПЭГ-6000 в питательную среду в различных концентрациях. В контрольных условиях без добавления ПЭГ-6000 сорт Тохтар демонстрировал наибольшее содержание хлорофилла 21,7 мг/г сырой массы, в то время как у сорта Аксор этот показатель составлял 17,1 мг/г. При увеличении концентрации ПЭГ-6000 до 8% содержание хлорофилла снизилось до 12,9 мг/г у сорта Тохтар и до 10,2 мг/г у сорта Аксор. На всех этапах эксперимента сорт Тохтар сохранял более высокое содержание хлорофилла по сравнению с сортом Аксор, что указывает на его потенциально более высокую устойчивость к осмотическому стрессу и возможно, лучшую адаптацию к условиям засухи.

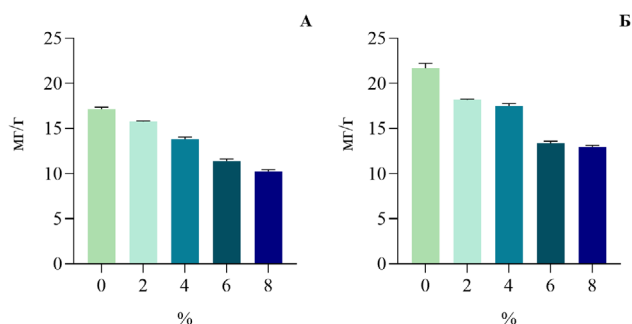


Рисунок 2. Содержание хлорофилла (мг/г) в листьях сортов картофеля Аксор (А) и Тохтар (Б) при воздействии ПЭГ-6000 (0 – 8%). Значения представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение (SD), рассчитанные по трём повторностям. Статистические различия определены при уровне значимости $p < 0,05$

Влияние концентрации ПЭГ-6000 на уровень МДА у сортов Аксор и Тохтар

На рисунке 3 представлены данные по содержанию МДА (нмоль/г сырой массы) в листьях растений сортов Аксор и Тохтар вызванного добавлением ПЭГ-6000 в питательную среду в различных концентрациях. Увеличение концентрации ПЭГ-6000 сопровождалось ростом уровня МДА в тканях растений обоих сортов. В контрольных условиях (0 % ПЭГ-6000) уровень МДА составлял 14,3 нмоль/г у сорта Аксор и 12,8 нмоль/г у сорта Тохтар, что отражает базовый уровень перекисного окисления липидов. При максимальной концентрации (8 % ПЭГ-6000) содержание МДА увеличилось до 20,8 нмоль/г у сорта Аксор и до 18,3 нмоль/г у сорта Тохтар. На всех этапах эксперимента сорт Аксор демонстрировал более высокий уровень МДА по сравнению с сортом Тохтар, свидетельствует о большей чувствительности его клеток к окислительному повреждению. В то же время у сорта Тохтар, несмотря на общий рост уровня МДА, отмечалось меньшее накопление продуктов перекисного окисления, что может указывать на более эффективную работу антиоксидантной системы.

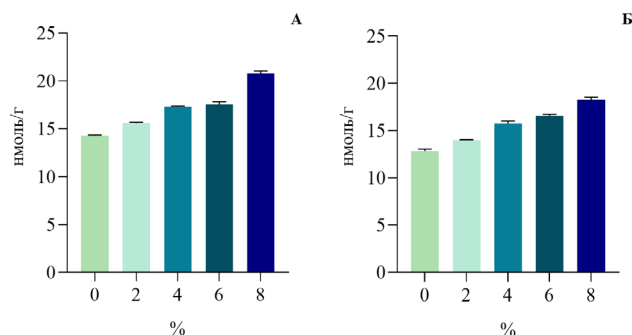


Рисунок 3. Содержание МДА (нмоль/г) в листьях сортов картофеля Аксор (А) и Тохтар (Б) при воздействии ПЭГ-6000 (0-8%). Значения представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение (SD), рассчитанные по трём повторностям. Статистические различия определены при уровне значимости $p < 0,05$

Влияние концентрации ПЭГ-6000 на активность КАТ у сортов Аксор и Тохтар

На рисунке 4 приведены данные по активности фермента КАТ, одного из ключевых компонентов антиоксидантной системы растений. КАТ катализирует разложение

перекиси водорода, предотвращая развитие окислительного стресса. Активность выражена в условных единицах на мг белка (ед/мг) при воздействии различных концентраций ПЭГ-6000. Согласно полученным данным, по мере увеличения концентрации ПЭГ в питательной среде активность каталазы в листьях обоих сортов возрастала, достигая максимальных значений при концентрации 6 % ПЭГ-6000 – 37,1 ед/мг у сорта Аксор и 36,2 ед/мг у сорта Тохтар. Это указывает на активацию антиоксидантных защитных механизмов растений в ответ на осмотический стресс, индуцированный ПЭГ-6000. Значительное усиление активности свидетельствует о мобилизации ферментативной защиты для нейтрализации избытка перекиси водорода, образующейся при стрессовых условиях. При дальнейшем увеличении концентрации до 8 % ПЭГ-6000 наблюдалось снижение активности КАТ по сравнению с максимальными значениями. Возможно, это связано с угнетением метаболических процессов на фоне чрезмерного стрессового воздействия, что приводит к снижению ферментативной активности.

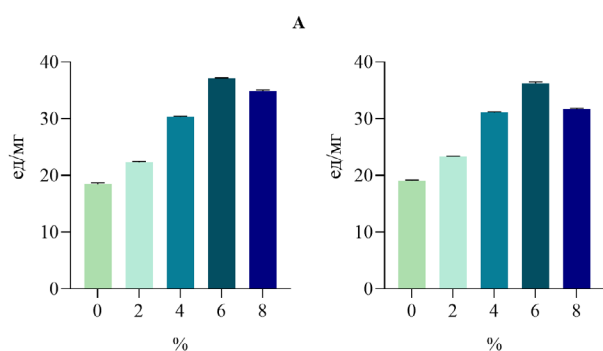


Рисунок 4. Активность каталазы (ед/мг) в листьях сортов картофеля Аксор (А) и Тохтар (Б), при воздействии ПЭГ-6000 (0–8%). Значения представлены как среднее $\pm$ SD, рассчитанное по трём повторностям. Статистические различия определены при уровне значимости $p < 0,05$

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показали, что повышение концентрации ПЭГ-6000 в питательной среде приводило к угнетению роста проростков картофеля, снижению содержания хлорофилла и усилению перекисного окисления липидов, о чём свидетельствовал рост уровня МДА. Параллельно фиксировалась активация антиоксидантной системы, в частности каталазы, с максимальными значениями активности при 6 % ПЭГ-6000 и снижением при 8 %, что указывает на стимуляцию защитных механизмов на фоне умеренного стресса и их подавление при чрезмерной нагрузке. При этом сорт Тохтар на протяжении эксперимента демонстрировал более высокое содержание хлорофилла и меньший уровень МДА по сравнению с сортом Аксор, что свидетельствует о большей физиологической устойчивости к осмотическому стрессу. Эти наблюдения подчёркивают сортоспецифичность адаптационных реакций и их значение для селекции стрессоустойчивых форм.

В нашем исследовании, как и в других работах [4, 28], водный стресс, индуцированный ПЭГ, приводил к уменьшению размеров листовой пластинки, числа листьев и высоты побегов, что связано с потерей тургора и снижением водного потенциала листа. Подобные морфологические

изменения являются типичными признаками адаптационного ответа на дефицит влаги и были ранее зафиксированы у картофеля и других культур при *in vitro* моделировании засухи [29–31] [32].

Снижение содержания хлорофилла в условиях осмотического стресса отражает подавление фотосинтетической активности и повреждение хлоропластов, вызванное, вероятно, окислительным стрессом, изменением липидно-белковых комплексов мембран или усилением активности хлорофиллазы [33, 34] [35]. Напротив, сохранение высокого уровня хлорофилла рассматривается как один из признаков засухоустойчивости [36], что согласуется с лучшими показателями сорта Тохтар в нашем эксперименте.

Повышение уровня МДА указывает на интенсификацию перекисного окисления липидов и повреждение клеточных мембран под воздействием активных форм кислорода (АФК) [37, 38]. Наши данные соответствуют результатам других исследований [39] [40], в которых обработка ПЭГ вызывала накопление МДА у картофеля и других культур, что подтверждает ключевую роль окислительного стресса в патогенезе повреждений, вызванных засухой.

Каталаза, локализованная в пероксисомах, является одним из основных ферментов детоксикации АФК, катализируя разложение перекиси водорода до воды и кислорода [41]. Умеренное повышение её активности при концентрациях ПЭГ до 6 % отражает активацию защитных механизмов, тогда как снижение активности при 8 % ПЭГ связано, вероятно, с повреждением клеточных структур и подавлением метаболических процессов. Аналогичная динамика описана и в других работах [39] что подтверждает нами полученные результаты.

Таким образом, комплекс зафиксированных физиолого-биохимических изменений отражает адаптационные механизмы картофеля к осмотическому стрессу: снижение фотосинтетической активности, активацию антиоксидантных систем и ограничение окислительного повреждения клеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показали, что повышение концентрации ПЭГ-6000 в питательной среде приводит к комплексным физиолого-биохимическим изменениям у проростков картофеля, связанным с осмотическим стрессом. Установлено, что стрессовые условия индуцированные в культуре *in vitro* вызывают замедление роста побегов, снижение содержания хлорофилла и усиление перекисного окисления липидов, сопровождающееся активацией каталазы как ключевого фермента антиоксидантной защиты. Максимальная активность каталазы наблюдалась при умеренном стрессе (6 % ПЭГ-6000) и снижалась при чрезмерной нагрузке (8 % ПЭГ-6000), что указывает на предел компенсаторных возможностей растений. Сорт Тохтар на протяжении эксперимента характеризовался более высоким содержанием хлорофилла и меньшим уровнем МДА по сравнению с сортом Аксор, что свидетельствует о более эффективных механизмах защиты от окислительного повреждения и потенциально большей засухоустойчивости. Полученные данные могут быть использованы для предварительного скрининга

генотипов картофеля на устойчивость к дефициту влаги и для отбора перспективных форм для селекционной работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан и выполнено в рамках грантового проекта ИРН AP23490126.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang G. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment // *Climate Dynamics*. – 2005. – Vol. 25, № 7. – P. 739-753.
2. Gao H.J., et al. Ultrastructural and physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets to gradient saline stress // *Frontiers in Plant Science*. – 2014. – Vol. 5. – Article 787.
3. Levy D., Veilleux R.E. Adaptation of potato to high temperatures and salinity – a review // *American Journal of Potato Research*. – 2007. – Vol. 84, № 6. – P. 487-506.
4. Deblonde P., Ledent J.-F. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars // *European Journal of Agronomy*. – 2001. – Vol. 14, № 1. – P. 31-41.
5. Yamori W., et al. Effects of Rubisco kinetics and Rubisco activation state on the temperature dependence of the photosynthetic rate in spinach leaves from contrasting growth temperatures // *Plant, Cell and Environment*. – 2006. – Vol. 29, № 8. – P. 1659-1670.
6. Ma Q., et al. Sodium chloride improves photosynthesis and water status in the succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* // *Tree Physiology*. – 2012. – Vol. 32, № 1. – P. 4-13.
7. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology*. – 1987. – Vol. 148. – P. 350-382.
8. Wang X., et al. Dynamics of physiological and biochemical effects of heat, drought and combined stress on potato seedlings // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. – 2024. – Vol. 11, № 1. – Article 109.
9. Demirel U., et al. Physiological, biochemical, and transcriptional responses to single and combined abiotic stress in stress-tolerant and stress-sensitive potato genotypes // *Frontiers in Plant Science*. – 2020. – Vol. 11. – Article 169.
10. Gervais T., et al. Potato response to drought stress: physiological and growth basis // *Frontiers in Plant Science*. – 2021. – Vol. 12. – Article 698060.
11. Boguszevska-Mańkowska D., Zarzyńska K., Wasilewska-Nascimento B. Potato (*Solanum tuberosum* L.) Plant Shoot and Root Changes under Abiotic Stresses – Yield Response // *Plants*. – 2022. – Vol. 11, № 24. – Article 3568.
12. Zinta R., et al. Root system architecture for abiotic stress tolerance in potato: Lessons from plants // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – Article 926214.
13. Nasir M.W., Toth Z. Effect of drought stress on potato production: A review // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, № 3. – Article 635.
14. Fang G., et al. Research progress on physiological, biochemical, and molecular mechanisms of potato in response to drought and high temperature // *Horticulturae*. – 2024. – Vol. 10, № 8. – Article 827.
15. Sharma A., et al. Nitric oxide-mediated regulation of oxidative stress in plants under metal stress: a review on molecular and biochemical aspects // *Physiologia Plantarum*. – 2020. – Vol. 168, № 2. – P. 318-344.
16. Han Q.Q., et al. Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover // *Frontiers in Plant Science*. – 2014. – Vol. 5. – Article 525.
17. Singh M., et al. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2015. – Vol. 14, № 3. – P. 407-426.
18. Lawlor D. Absorption of polyethylene glycols by plants and their effects on plant growth // *New Phytologist*. – 1970. – Vol. 69, № 2. – P. 501-513.
19. Deinlein U., et al. Plant salt-tolerance mechanisms // *Trends in Plant Science*. – 2014. – Vol. 19, № 6. – P. 371-379.
20. Chaves M.M., Oliveira M.M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture // *Journal of Experimental Botany*. – 2004. – Vol. 55, № 407. – P. 2365-2384.
21. Абеуова Л.С., Кали Б.Р., Рахимжанова А.О., Беккужина С.С., Манабаева Ш.А. Особенности прямой регенерации отечественных сортов картофеля в культуре in vitro. // *Вестник КазНУ. Серия биологическая*. – 2020. – Т. 83, № 2. – С. 34-41.
22. Murashige, T. and F. Skoog, A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*. – 1962. – P. 15(3).
23. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // *Portland Press Ltd*. – 1983.
24. Шлык А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // *Биохимические методы в физиологии растений*. М.: Наука. – 1971. – Т. 19, № 1. – С. 154-161.
25. Peng Zhen, He Shou-Pu, Sun Jun-Ling, Xu Fei-Fei, Jia Yin-Hua, Pan Zhao-E, Wang Li-Ru, Du Xiong-Ming. An Efficient Approach to Identify Salt Tolerance of Upland Cotton at Seedling Stage // *Acta Agron Sin*. – 2014. – Vol.40(03). – P. 476-486.
26. Dilnur T., Peng Z., Pan Z., Palanga K.K., Jia Y., Gong W., Du X. Association Analysis of Salt Tolerance in Asiatic cotton (*Gossypium arboreum*) with SNP Markers. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2019. – Vol. 20, № 9. – Article 2168.
27. Havir E.A., McHale N.A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves // *Plant Physiology*. – 1987. – Vol. 84, №

2. – P. 450-455.

28. Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, Zhao CX. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C R Biol.* 2008 Mar;331(3):215-25. *Comptes rendus biologiques.* – 2008. – Vol. 331, № 3. – P. 215-225.

29. Gopal J., Iwama K. In vitro screening of potato against water-stress mediated through sorbitol and polyethylene glycol // *Plant Cell Reports.* – 2007. – Vol. 26, № 5. – P. 693-700.

30. Claussen W. Proline as a measure of stress in tomato plants // *Plant Science.* – 2005. – Vol. 168, № 1. – P. 241-248.

31. GEORGE S., NASIR M. M., SHAKEEL A. J., SADAR U. S., GHAFOOR A. Impact of polyethylene glycol on proline and membrane stability index for water stress regime in tomato (*Solanum lycopersicum*) // *Pakistan Journal of Botany.* – 2015. – Vol. 47, № 3. – P. 835-844.

32. Sahoo, M.R., Devi, T.R., Dasgupta, M. et al. Reactive oxygen species scavenging mechanisms associated with polyethylene glycol mediated osmotic stress tolerance in Chinese potato // *Scientific Reports.* – 2020. – Vol. 10, № 1. – Article 5404.

33. Ueda A., Shi W., Sanmiya K., Shono M., Takabe T. Functional analysis of salt-inducible proline transporter of barley roots // *Plant and Cell Physiology.* – 2001. – Vol. 42, № 11. – P. 1282-1289.

34. Kidokoro S, Maruyama K, Nakashima K, Imura Y, Narusaka Y, Shinwari ZK, Osakabe Y, Fujita Y, Mizoi J, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. The phytochrome-interacting factor PIF7 negatively regulates DREB1 expression under circadian control in *Arabidopsis* // *Plant Physiology.* – 2009. – Vol. 151, № 4. – P. 2046-2057.

35. Kaya C., Tuna L., Higgs D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions // *Journal of Plant Nutrition.* – 2006. – Vol. 29, № 8. – P. 1469-1480.

36. Dhanda S., Sethi G., Behl R. Indices of drought tolerance in wheat genotypes at early stages of plant growth // *Journal of Agronomy and Crop Science.* – 2004. – Vol. 190, № 1. – P. 6-12.

37. Yazici, I., Turkan, I., Sekmen, A.H. and Demiral, T. Salinity tolerance of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline Accumulation // *Environmental and Experimental Botany.* – 2007. – Vol. 61, № 1. – P. 49-57.

38. Li L., Van Staden J., Jäger A. Effects of plant growth regulators on the antioxidant system in seedlings of two maize cultivars subjected to water stress // *Plant Growth Regulation.* – 1998. – Vol. 25, № 2. – P. 81-87.

39. Gao H.J., Yang H.Y., Bai J.P., Liang X.Y., Lou Y., Zhang J.L., Wang D., Zhang J.L., Niu S.Q., Chen Y.L. Ultrastructural and physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets to gradient saline stress // *Acta Physiologiae Plantarum.* – 2016. – Vol. 38, № 7. – Article 182.

40. Диловарова Н.С., Норкулов Н.Х., Давлятназарова З.Б., Каспарова И.С., Садриддинов М., Алиев К. Индукция антиоксидантной системы растений картофеля *Solanum tuberosum* L. в условиях засухи // *Известия Ака-*

демии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. – 2020. № 2. – С. 38-45.

41. Киргизова И., Гаджимурадова А., Омаров Р. Особенности накопления антиоксидантных ферментов у картофеля в условиях биотического и абиотического стресса // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* – 2018. – Т. 8, № 4 (27). – С. 42–54.

REFERENCE

1. Wang G. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment // *Climate Dynamics.* – 2005. – Vol. 25, № 7. – P. 739-753.

2. Gao H.J., et al. Ultrastructural and physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets to gradient saline stress // *Frontiers in Plant Science.* – 2014. – Vol. 5. – Article 787.

3. Levy D., Veilleux R.E. Adaptation of potato to high temperatures and salinity – a review // *American Journal of Potato Research.* – 2007. – Vol. 84, № 6. – P. 487-506.

4. Deblonde P., Ledent J.-F. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars // *European Journal of Agronomy.* – 2001. – Vol. 14, № 1. – P. 31-41.

5. Yamori W., et al. Effects of Rubisco kinetics and Rubisco activation state on the temperature dependence of the photosynthetic rate in spinach leaves from contrasting growth temperatures // *Plant, Cell and Environment.* – 2006. – Vol. 29, № 8. – P. 1659-1670.

6. Ma Q., et al. Sodium chloride improves photosynthesis and water status in the succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* // *Tree Physiology.* – 2012. – Vol. 32, № 1. – P. 4-13.

7. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology.* – 1987. – Vol. 148. – P. 350-382.

8. Wang X., et al. Dynamics of physiological and biochemical effects of heat, drought and combined stress on potato seedlings // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture.* – 2024. – Vol. 11, № 1. – Article 109.

9. Demirel U., et al. Physiological, biochemical, and transcriptional responses to single and combined abiotic stress in stress-tolerant and stress-sensitive potato genotypes // *Frontiers in Plant Science.* – 2020. – Vol. 11. – Article 169.

10. Gervais T., et al. Potato response to drought stress: physiological and growth basis // *Frontiers in Plant Science.* – 2021. – Vol. 12. – Article 698060.

11. Boguszevska-Mańkowska D., Zarzyńska K., Wasilewska-Nascimento B. Potato (*Solanum tuberosum* L.) Plant Shoot and Root Changes under Abiotic Stresses – Yield Response // *Plants.* – 2022. – Vol. 11, № 24. – Article 3568.

12. Zinta R., et al. Root system architecture for abiotic stress tolerance in potato: Lessons from plants // *Frontiers in Plant Science.* – 2022. – Vol. 13. – Article 926214.

13. Nasir M.W., Toth Z. Effect of drought stress on potato production: A review // *Agronomy.* – 2022. – Vol. 12, № 3. – Article 635.

14. Fang G., et al. Research progress on physiological, biochemical, and molecular mechanisms of potato in response to drought and high temperature // *Horticulturae*. – 2024. – Vol. 10, № 8. – Article 827.
15. Sharma A., et al. Nitric oxide-mediated regulation of oxidative stress in plants under metal stress: a review on molecular and biochemical aspects // *Physiologia Plantarum*. – 2020. – Vol. 168, № 2. – P. 318-344.
16. Han Q.Q., et al. Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover // *Frontiers in Plant Science*. – 2014. – Vol. 5. – Article 525.
17. Singh M., et al. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2015. – Vol. 14, № 3. – P. 407-426.
18. Lawlor D. Absorption of polyethylene glycols by plants and their effects on plant growth // *New Phytologist*. – 1970. – Vol. 69, № 2. – P. 501-513.
19. Deinlein U., et al. Plant salt-tolerance mechanisms // *Trends in Plant Science*. – 2014. – Vol. 19, № 6. – P. 371-379.
20. Chaves M.M., Oliveira M.M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture // *Journal of Experimental Botany*. – 2004. – Vol. 55, № 407. – P. 2365-2384.
21. Abeuova, L. S., Kali, B. R., Rakhimzhanova, A. O., Bekkuzhina, S. S., Manabayeva, S. A. Osobennosti pryamoy regeneratsii otechestvennykh sortov kartofelya v kul'ture in vitro // *Vestnik KazNU. Biological series*. – 2020. – T. 83, № 2. – C. 34-41. [in Russian]
22. Murashige, T. and F. Skoog, A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*. – 1962. – P. 15(3).
23. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // *Portland Press Ltd*. – 1983.
24. Shlyk A. Opredeleniye khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'yev // *Biochemical methods in plant physiology*. Moscow: Science. – 1971. – T. 19, № 1. – C. 154-161. [in Russian]
25. Peng Zhen, He Shou-Pu, Sun Jun-Ling, Xu Fei-Fei, Jia Yin-Hua, Pan Zhao-E, Wang Li-Ru, Du Xiong-Ming. An Efficient Approach to Identify Salt Tolerance of Upland Cotton at Seedling Stage // *Acta Agron Sin*. – 2014. – Vol.40(03). – P. 476-486.
26. Dilnur, T., Peng, Z., Pan, Z., Palanga K.K., Jia Y., Gong W., Du X. Association Analysis of Salt Tolerance in Asiatic cotton (*Gossypium arboreum*) with SNP Markers. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2019. – Vol. 20, № 9. – Article 2168.
27. Havir E.A., McHale N.A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves // *Plant Physiology*. – 1987. – Vol. 84, № 2. – P. 450-455.
28. Shao H.B., Chu L.Y., Jaleel C.A., Zhao C.X. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C R Biol*. 2008 Mar;331(3):215-25. *Comptes rendus biologiques*. – 2008. – Vol. 331, № 3. – P. 215-225.
29. Gopal J., Iwama K. In vitro screening of potato against water-stress mediated through sorbitol and polyethylene glycol // *Plant Cell Reports*. – 2007. – Vol. 26, № 5. – P. 693-700.
30. Claussen W. Proline as a measure of stress in tomato plants // *Plant Science*. – 2005. – Vol. 168, № 1. – P. 241-248.
31. George S., Nasir M. M., Shakeel A. J., Sadar U. S., Ghafoor A. Impact of polyethylene glycol on proline and membrane stability index for water stress regime in tomato (*Solanum lycopersicum*) // *Pakistan Journal of Botany*. – 2015. – Vol. 47, № 3. – P. 835-844.
32. Sahoo, M.R., Devi, T.R., Dasgupta, M. et al. Reactive oxygen species scavenging mechanisms associated with polyethylene glycol mediated osmotic stress tolerance in Chinese potato // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10, № 1. – Article 5404.
33. Ueda A., Shi W., Sanmiya K., Shono M., Takabe T. Functional analysis of salt-inducible proline transporter of barley roots // *Plant and Cell Physiology*. – 2001. – Vol. 42, № 11. – P. 1282-1289.
34. Kidokoro S, Maruyama K, Nakashima K, Imura Y, Narusaka Y, Shinwari ZK, Osakabe Y, Fujita Y, Mizoi J, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. The phytochrome-interacting factor PIF7 negatively regulates DREB1 expression under circadian control in Arabidopsis // *Plant Physiology*. – 2009. – Vol. 151, № 4. – P. 2046-2057.
35. Kaya C., Tuna L., Higgs D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions // *Journal of Plant Nutrition*. – 2006. – Vol. 29, № 8. – P. 1469-1480.
36. Dhanda S., Sethi G., Behl R. Indices of drought tolerance in wheat genotypes at early stages of plant growth // *Journal of Agronomy and Crop Science*. – 2004. – Vol. 190, № 1. – P. 6-12.
37. Yazici, I., Turkan, I., Sekmen, A.H. and Demiral, T. Salinity tolerance of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline Accumulation // *Environmental and Experimental Botany*. – 2007. – Vol. 61, № 1. – P. 49-57.
38. Li L., Van Staden J., Jäger A. Effects of plant growth regulators on the antioxidant system in seedlings of two maize cultivars subjected to water stress // *Plant Growth Regulation*. – 1998. – Vol. 25, № 2. – P. 81-87.
39. Gao H.J., Yang H.Y., Bai J.P., Liang X.Y., Lou Y., Zhang J.L., Wang D., Zhang J.L., Niu S.Q., Chen Y.L. Ultrastructural and physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets to gradient saline stress // *Acta Physiologiae Plantarum*. – 2016. – Vol. 38, № 7. – Article 182.
40. Dilovarova N.S., Norkulov N.KH., Davlyatnazarova Z.B., Kasparova I.S., Sadridinov M., Aliyev K. Induksiya antioksidantnoy sistemy rasteniy kartofelya *Solanum tuberosum* L. v usloviyakh zasukhi // *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Biological and Medical Sciences*. – 2020. № 2. – C. 38-45. [in Russian]
41. Kirgizova I., Gadzhimuradova A., Omarov R. Osobennosti nakopleniya antioksidantnykh fermentov u

kartofelya v usloviyakh bioticheskogo i abioticheskogo stressa

// News of universities. Applied chemistry and biotechnology.

– 2018. – T. 8, № 4 (27). – С. 42–54. [in Russian]

**КАРТОП ӨСКІНДЕРІНІҢ ФИЗИОЛОГИЯЛЫҚ РЕАКЦИЯЛАРЫН ӘРТҮРЛІ ҚАРҚЫНДЫЛЫҚТА
ОСМОСТЫҚ КҮЙЗЕЛІС ЖАҒДАЙЫНДА САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ****Аргумбаева А.К.^{1,3}, Қали Б.Р.¹, Абеуова Л.С.¹, Насиев Б.Н.³, Манабаева Ш.А.^{1,2,3*}**¹ Ұлттық биотехнология орталығы, Қорғалжын көшесі 13/5, Астана, 010000, Қазақстан² Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көшесі 2, Астана, 010000, Қазақстан³ Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Жәңгір хан көшесі 51, Орал, 090009, Қазақстан

*manabayeva@biocenter.kz

АБСТРАКТ

Құрғақшылық – өсімдіктердің өсуі мен ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігін шектейтін ең маңызды абиотикалық күйзелістердің бірі. Бұл зерттеуде *Solanum tuberosum* L. түріне жататын картоп өскіндерінің полиэтилен-гликольмен (ПЭГ-6000) 0, 2, 4, 6 және 8% концентрацияларында индукцияланған осмостық күйзеліс жағдайындағы физиологиялық реакциялары талданды. Жоғары концентрациядағы ПЭГ-6000 өскіндердің өсуін айтарлықтай тежеп, хлорофилл мөлшерінің төмендеуі анықталды. Физиологиялық талдау нәтижелері бойынша осмостық күйзеліс жағдайында малондальдегид (МДА) деңгейінің төмендегені және каталаза (КАТ) ферментінің белсенділігінің артқаны байқалды. Бұл нәтижелер картоптың құрғақшылыққа төзімділігін қамтамасыз ететін физиологиялық үдерістер мен ішкі механизмдерді тереңірек түсінуге мүмкіндік береді және абиотикалық күйзелістерге төзімді сұрыптарды шығару мақсатындағы селекциялық бағдарламаларда пайдалануға болады.

Түйін сөздер: *Solanum tuberosum* L., *in vitro*, ПЭГ-6000, хлорофилл, МДА, КАТ**COMPARATIVE ANALYSIS OF PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF POTATO SEEDLINGS TO
OSMOTIC STRESS OF DIFFERENT INTENSITIES****Argumbayeva A.K.^{1,3}, Kali B.R.¹, Abeuova L.S.¹, Nasiyev B.N.³, Manabayeva S.A.^{1,2,3*}**¹ National Center for Biotechnology, 13/5, Qorghalzhyn Hwy., Astana, 010000, Kazakhstan² L.N.Gumilyov Eurasian National University, Satpayev st. 2, Astana, 010000, Kazakhstan³ West Kazakhstan Agro-Technical University named after Zhangir Khan, Zhangir khan street 51, Oral, 090009, Kazakhstan

Corresponding author: *manabayeva@biocenter.kz

ABSTRACT

Drought is one of the most significant abiotic stresses that limit plant growth and crop productivity. This study analyzed the physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) seedlings to osmotic stress induced by polyethylene glycol (PEG-6000) at concentrations of 0, 2, 4, 6, and 8%. High concentrations of PEG-6000 were found to significantly inhibit seedling growth and reduce chlorophyll content. Physiological analysis revealed decreased malondialdehyde (MDA) levels and increased catalase (CAT) activity under osmotic stress conditions. These results deepen our understanding of the physiological processes and internal mechanisms of potato drought tolerance, including changes in chlorophyll content. This knowledge can be applied to breeding programs that develop cultivars resistant to abiotic stresses.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., *in vitro*, PEG-6000, chlorophyll, MDA, CAT