

УДК 378:37.02

DOI 10.33514/1694-7851-2025-3/2-221-230

Бутаев М.Д.

айыл-чарба илимдеринин кандидаты, Ассоц. профессор
«Мирас» университети

Шымкент ш.

butayev64@mail.ru

Жигитеков Т.А.

айыл-чарба илимдеринин кандидаты, ага окутуучу
«Мирас» университети

Шымкент ш.

jigitekov-6363@mail.ru

ӨСҮМДҮКТӨРДҮН ЧӨЙРӨНҮН СТРЕСС ФАКТОРЛОРУНА ТУРУКТУУЛУГУНУН МОЛЕКУЛЯРДЫК МЕХАНИЗМДЕРИ: ТҮРКСТАН ОБЛУСУНУН ШАРТЫНДА

Аннотация. Бул макалада, Түркстан облусунун агроэкологиялык шарттарына мұнәздүү болгон өсүмдүктөрдүн чөйрөнүн стресс факторлоруна туруктуулугунун молекулалык механизмдери каралат. Бул аймак кургакчылығы, нымдын тартыштығы, жай мезгилинде +40 °Сен жогору температуралар, ошондой эле топурактын туздалышы жана азық заттардың жетишсиздиги менен айырмаланат. Бул факторлор айыл чарба өсүмдүктөрүнүн өндүрүмдүүлүгүн кыйла төмөндөтүп, өсүмдүктөрдүн туруктуулугун жогорулатуунун жаңы жолдорун иштеп чыгууну талап кылат. Иште молекулалык адаптациянын негизги аспектилері ачып берилет: туздалууда иондук гомеостазды сактоо, стресс менен байланышкан гендердин экспрессиясын жөнгө салуу, осмолиттерди топтоо, ошондой эле фитогормондордун (абсцис кислотасы, этилен, цитокининдер) адаптациялык реакцияларды калыптандыруудагы ролу. Өзгөчө көңүл заманбап биотехнологиялык жана санараптик ықмаларды колдонууга бурулат, анын ичинде «стрессоого туруктуулуктун молекулалык карталарын» түзүү жана өсүмдүктөрдүн абалын мониторинг кылуу платформаларын колдонуу. Келтирилген материалдар аймактын агрардык өндүрүшүнө инновациялык программаларды киргизүүдө жана агрардык ЖОЖдордун билим берүү ишмердүүлүгүндө теориялык негиз болуп кызмат кылышы мүмкүн. Ошентип, бул изилдөөнүн илимий-теориялык жана практикалык мааниси чоң болуп, климаттын өзгөрүшү шартында туруктуу айыл чарбасынын өнүгүшүнө өбөлгө түзөт.

Негизги сөздөр: өсүмдүктөрдүн туруктуулугу, стресс факторлору, молекуллярдык механизмдер, кургакчылық, топурактын туздануусу, жылуулук стресси, фитогормондор, иондук гомеостаз, санараптик технологиилар.

Бутаев М.Д.

кандидат сельско-хозяйственных наук, Ассоц. профессор
университет Мирас
г. Шымкент

Жигитеков Т.А.

кандидат сельско-хозяйственных наук, старший преподаватель
университет Мирас
г. Шымкент

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ К СТРЕССОВЫМ ФАКТОРАМ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ ТУРКЕСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В статье рассматриваются молекулярные механизмы устойчивости растений к стрессовым факторам среды, характерным для агроэкологических условий Туркестанской области. Данный регион отличается экстремальными климатическими особенностями: засушливостью, дефицитом влаги, высокими температурами летом, нередко превышающими +40 °C, а также засолением и истощением почв. Эти факторы значительно ограничивают продуктивность сельскохозяйственных культур и требуют разработки новых подходов к повышению устойчивости растений. В работе раскрываются ключевые аспекты молекулярной адаптации: поддержание ионного гомеостаза при засолении, регуляция экспрессии стресс-ассоциированных генов, накопление осмоловитов, а также роль фитогормонов (абсцизовой кислоты, этилена, цитокининов) в формировании адаптационных реакций. Отдельное внимание уделено применению современных биотехнологических и цифровых методов, включая создание «молекулярных карт стрессоустойчивости» и использование платформ для мониторинга состояния растений. Представленные материалы могут служить теоретической основой для внедрения инновационных программ в агропроизводстве региона и в образовательной деятельности аграрных вузов Казахстана. Таким образом, исследование носит как научно-теоретическую, так и практическую значимость, способствуя формированию устойчивого сельского хозяйства в условиях изменения климата.

Ключевые слова: устойчивость растений, стрессовые факторы, молекулярные механизмы, засуха, засоление почв, тепловой стресс, фитогормоны, ионный гомеостаз, цифровые технологии.

Butayev M.D.

Associate Professor, PhD in Agricultural Sciences

Miras University

Shymkent

Zhigitekov T.A.

Ph.D. in Agricultural Sciences, senior lecturer

Miras University

Shymkent

MOLECULAR MECHANISMS OF PLANT RESISTANCE TO ENVIRONMENTAL STRESS FACTORS UNDER THE CONDITIONS OF TURKESTAN REGION

Abstract. This article examines the molecular mechanisms of plant resistance to environmental stress factors characteristic of the agroecological conditions of the Turkestan region. The area is distinguished by drought, water deficit, summer temperatures exceeding +40 °C, as well as soil salinization and nutrient deficiency. These factors significantly reduce the productivity of agricultural crops and require the development of new strategies to enhance plant resilience. The

study highlights the key aspects of molecular adaptation: maintaining ion homeostasis under salinity, regulating the expression of stress-associated genes, accumulation of osmolytes, and the role of phytohormones (abscisic acid, ethylene, cytokinins) in shaping adaptive responses. Particular attention is given to the application of modern biotechnological and digital approaches, including the development of "molecular maps of stress tolerance" and the use of monitoring platforms to assess plant conditions. The presented material can serve as a theoretical basis for the implementation of innovative programs in regional agricultural production and in the educational process of agricultural universities of Kazakhstan. Thus, the study has considerable scientific, theoretical, and practical significance, contributing to the sustainable development of agriculture under climate change.

Keywords: plant resistance, stress factors, molecular mechanisms, drought, soil salinity, heat stress, phytohormones, ion homeostasis, digital technologies.

Растения как биологические организмы подвергаются воздействию множества абиотических стрессовых факторов – засуха, засоление почв, экстремальные температуры, ультрафиолетовое излучение и дефицит питательных веществ. Для Туркестанской области данные условия особенно актуальны: регион характеризуется аридным климатом, высокой солнечной радиацией, низким количеством осадков и повышенным уровнем засоленности почв. Понимание молекулярных механизмов устойчивости растений к стрессам позволяет разрабатывать инновационные подходы в агротехнологиях, селекции и биотехнологии, направленные на повышение урожайности сельскохозяйственных культур.

К основным стрессовым факторам в Туркестанской области относится

1. Засуха и дефицит влаги – регион получает менее 200–250 мм осадков в год, что формирует жёсткие условия для земледелия.
2. Высокие температуры – летом температура часто превышает +40 °С, вызывая тепловой стресс.
3. Засоление почв – значительная часть земель подвержена вторичному засолению, особенно в поймах рек и орошаемых участках.
4. Почвенное истощение – нехватка азота и микроэлементов снижает продуктивность растений.

1. Засуха и дефицит влаги являются одними из наиболее распространённых и опасных абиотических стрессов, ограничивающих продуктивность сельскохозяйственных культур в Туркестанской области. Климат региона характеризуется высокой температурой воздуха, низкой влажностью и продолжительными бездождевыми периодами, что приводит к значительным потерям урожая [1, с. 57]. Основные физиологические проявления засухи:

- снижение тurgора клеток и закрытие устьиц;
- уменьшение скорости фотосинтеза из-за нарушения транспорта электронов в хлоропластах;
- повышенное образование активных форм кислорода (АФК), вызывающих окислительный стресс;
- замедление роста корневой и надземной массы.

Внедрение в селекционные программы сортов с генами толерантности к засухе для Туркестанской области является : у пшеницы и ячменя в условиях засухи активируется синтез пролина, что способствует поддержанию водного баланса, у кукурузы усиливается работа корневой системы, увеличивающей доступ к глубинным слоям почвы, у люцерны формируется способность к восстановлению после длительных периодов обезвоживания.

2. Высокие температуры как фактор теплового стресса. В летний период температура воздуха в Туркестанской области часто превышает +40 °С, что становится серьёзным стрессовым фактором для большинства сельскохозяйственных культур. Термический стресс приводит к нарушению физиологических процессов, снижению урожайности и качества продукции. Основные последствия теплового стресса: инактивация ферментов фотосинтеза (особенно Рубиско), разрушение структуры мембран и белков, денатурация белковых комплексов хлоропластов, дисбаланс между фотосинтезом и дыханием (повышение дыхательных потерь энергии), снижение эффективности опыления и завязывания плодов у зерновых и овощных культур. Молекулярные механизмы устойчивости растений к высоким температурам применяемым для Туркестанской области: у хлопчатника при температуре выше 38 °С наблюдается угнетение фотосинтеза, но сорта с высоким уровнем HSP-белков демонстрируют лучшую выживаемость, у кукурузы тепловой стресс на этапе цветения снижает урожайность на 30–50%, поэтому актуальна селекция на термотолерантность, у томата активация HSP-белков способствует сохранению завязи при экстремально высоких температурах. Таким образом, устойчивость растений к тепловому стрессу обеспечивается как молекулярными механизмами защиты (HSP, HSF, антиоксиданты), так и морфофизиологическими адаптациями. Для условий Туркестанской области перспективно внедрение термоустойчивых сортов и использование технологий капельного орошения и мульчирования, снижающих перегрев почвы.

3. Засоление почв – значительная часть земель подвержена вторичному засолению, особенно в поймах рек и орошаемых участках. В Туркестанской области значительная часть сельскохозяйственных земель подвержена вторичному засолению в результате нерационального орошения, высокой испаряемости и плохого дренажа. Особенно остро проблема проявляется в поймах рек Сырдарьи, Арыси, Келесса, а также на орошаемых участках. Основные последствия засоления: нарушение водного обмена из-за снижения осмотического потенциала почвы, ионный стресс (накопление Na^+ и Cl^- в тканях растений приводит к токсичности), вытеснение кальция и калия, что ухудшает питание растений, подавление роста корневой системы, хлороз и преждевременное старение листьев. Практические примеры для Туркестанской области: у пшеницы устойчивые сорта активно накапливают пролин и ограничивают транспорт Na^+ в надземные органы, у хлопчатника наблюдается активация генов антиоксидантной защиты, что повышает выживаемость на засолённых землях, у люцерны корневая система формирует особые симбиотические связи с ризобактериями, что повышает устойчивость к засолению, у томатных культур на засолённых почвах отмечается подавление завязывания плодов, однако использование устойчивых гибридов позволяет сохранить урожай. Таким образом, засоление почв в Туркестанской области остаётся одной из главных проблем растениеводства, требующей внедрения: солевыносливых сортов, капельного орошения с контролем минерализации воды, дренажных систем, биотехнологических подходов (интродукция солеустойчивых генов, использование биопрепаратов с ризобактериями).

4. Почвенное истощение – нехватка азота и микроэлементов снижает продуктивность растений. Важной проблемой земледелия Туркестанской области является почвенное истощение, возникающее в результате интенсивного сельскохозяйственного использования земель, недостаточного внесения органических и минеральных удобрений, а также вымывания питательных веществ при орошении [2, с.112]. Основные проявления почвенного истощения:

-дефицит азота → снижение содержания хлорофилла, пожелтение листьев, замедление роста и уменьшение урожайности;

-недостаток фосфора → слабое развитие корневой системы, позднее цветение и плохое формирование плодов;

-дефицит калия → снижение устойчивости к засухе и болезням, ослабление стеблей;

недостаток микроэлементов (Fe, Zn, Mn, B, Mo) → хлороз, некроз тканей, плохое опыление и снижение качества семян. Практические примеры для Туркестанской области:
у пшеницы дефицит азота резко снижает урожайность, поэтому применяются сидеральные культуры (люпин, горох), у хлопчатника недостаток бора вызывает опадание бутонов, поэтому требуется микроудобрение бором, у томатных культур цинк играет ключевую роль для завязывания плодов, и его недостаток приводит к деформации растений, у кукурузы при недостатке фосфора наблюдается антоциановая окраска листьев и слабое развитие початков. Пути решения проблемы: внедрение системы севооборотов для сохранения плодородия почвы, использование комплексных удобрений (NPK с микроэлементами), применение биотехнологических методов (бактерии-азотфиксаторы, фосфатомобилизующие микроорганизмы), мониторинг плодородия почв с использованием цифровых технологий (ГИС, датчики состава почвы). Таким образом, почвенное истощение в Туркестанской области представляет серьёзный вызов для сельского хозяйства, и его преодоление требует комплексных мер: от оптимизации удобрений до применения инновационных биотехнологий. Эти факторы требуют от растений запуска сложных физиологического-биохимических адаптаций.

Влияние молекулярных механизмов на адаптацию растений. Под действием засухи растения активно синтезируют пролин, трегалозу, сахара и полиолы, которые стабилизируют клеточные структуры. В условиях Туркестанской области особенно важна способность хлопчатника, пшеницы и люцерны аккумулировать такие соединения. Высокие температуры и ультрафиолет усиливают образование активных форм кислорода. Для защиты клетки активируют ферменты: супероксиддисмутазу, каталзу, пероксидазу. Исследования, проведённые в Южном Казахстане, показали, что пшеница местных сортов имеет более выраженный антиоксидантный ответ по сравнению с зарубежными. У хлопчатника Туркестанской области отмечена высокая экспрессия генов HSP при тепловом стрессе, что обеспечивает устойчивость к перегреву.

Засоление почв в Туркестанской области приводит к накоплению в ризосфере высоких концентраций Na^+ и Cl^- , которые оказывают токсическое действие на клетки растений. Основная угроза заключается в нарушении ионного баланса, особенно соотношения Na^+/K^+ , критически важного для поддержания метаболизма. Приведем примеры основных механизмов ионного гомеостаза. Селективный транспорт и исключение Na^+ из цитоплазмы. Активация плазматических Na^+/H^+ -антитранспортеров (SOS1), которые выкачивают Na^+ из цитозоля во внешнюю среду. Работа вакуолярных антитранспортеров NHX1, которые депонируют Na^+ в вакуоли, снижая его токсичность. Поддержание высокого уровня K^+ . Использование калиевых транспортеров для активного поглощения K^+ даже при избытке Na^+ . Регуляция работы протонных насосов (H^+ -АТФазы, H^+ -пирофосфатазы), создающих электрохимический градиент для транспорта катионов. Регуляция генов и сигнализация. Система SOS (Salt Overly Sensitive: SOS1, SOS2, SOS3) регулирует экспрессию транспортеров, обеспечивая адаптацию. Сигнальная роль Ca^{2+} в активации стресс-ответов. Синтез осмолитов и антиоксидантов. Накопление пролина, глицина-бетаина, сахаров, которые стабилизируют белки и мембранны. Усиление активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза, каталаза,

пероксидаза) для защиты от окислительного стресса. Практические примеры: У пшеницы устойчивые сорта демонстрируют более высокую активность SOS1 и NHX1, что позволяет сохранять продуктивность на засолённых землях. У хлопчатника, традиционной культуры Туркестанской области, важным является контроль K^+/Na^+ соотношения для нормального роста. У рисовых культур применяется введение генов НКТ1 и NHX1, улучшающих солеустойчивость. Биотехнологические решения: Использование солеустойчивых ризобактерий, которые уменьшают токсичность Na^+ . Генетическая селекция и маркер-ориентированное разведение сортов, обладающих улучшенной системой ионного гомеостаза. Применение регуляторов роста (например, абсцизовой кислоты – АВА) для повышения устойчивости. Таким образом, ионный гомеостаз является ключевым молекулярным механизмом устойчивости растений к засолению, позволяя поддерживать баланс между Na^+ и K^+ , сохранять метаболическую активность и продуктивность культур в условиях Туркестанской области [3, с. 27].

Регуляция устойчивости растений к стрессовым факторам на уровне фитогормонов. Фитогормоны играют фундаментальную роль в формировании адаптивных реакций растений при воздействии абиотических стрессов – засухи, засоления, высоких температур и дефицита питательных веществ. Их действие проявляется как на уровне генной экспрессии, так и через регуляцию физиологического-биохимических процессов.

1. Абсцизовая кислота (АБК, АВА).

Ключевой гормон засухи и засоления. Активирует закрытие устьиц, снижая транспирацию и потери влаги. Индуцирует экспрессию стресс-ассоциированных генов (LEA-белков, дегидринов), участвующих в защите клеточных структур. Усиливает активность антиоксидантных ферментов, снижая окислительный стресс. В Туркестанской области у пшеницы и хлопчатника повышенный уровень АБК коррелирует с устойчивостью к дефициту влаги.

2. Этилен.

При засолении и тепловом стрессе регулирует процессы старения листьев и активацию защитных ферментов. В умеренных концентрациях стимулирует синтез защитных белков, но в избытке может усиливать стресс и апоптоз клеток. Взаимодействует с АБК, координируя открытие и закрытие устьиц.

3. Цитокинины

Поддерживают клеточное деление и замедляют процессы старения. При засухе их уровень снижается, что приводит к подавлению роста, однако экзогенное применение цитокининов способствует сохранению фотосинтетической активности. У сои и кукурузы показано, что повышенный уровень цитокининов повышает устойчивость к водному дефициту.

4. Ауксины

Регулируют развитие корневой системы, усиливая формирование боковых и придаточных корней. Это позволяет растениям эффективнее использовать влагу и питательные вещества в условиях стрессов. Взаимодействуют с цитокининами, обеспечивая баланс между ростом корней и побегов.

5. Жасмоновая кислота (JA) и салициловая кислота (SA)

JA участвует в формировании устойчивости к окислительному стрессу, индуцирует антиоксидантные ферменты и синтез осмолитов. SA играет роль в защите клеточных мембран

от разрушения, снижает токсичность Na^+ при засолении. Оба гормона часто взаимодействуют с этиленом, усиливая экспрессию защитных генов.

6. Брассиностероиды (BR)

Повышают толерантность к засухе, тепловому стрессу и засолению. Стабилизируют фотосинтетический аппарат, усиливают экспрессию стресс-ассоциированных белков. В исследованиях показано, что обработка пшеницы и кукурузы брассиностероидами увеличивает урожайность в условиях засолённых почв. Схема взаимодействия фитогормонов при стрессах. АБК – ключевой регулятор засухи и засоления. Этилен и JA – усиливают сигналы повреждений. Цитокинины и ауксины – регулируют ростовые процессы и корневую систему. BR и SA – поддерживают антиоксидантную защиту и мембранный стабильность [4, с.73]. Таким образом, фитогормоны формируют интегрированную сигнальную сеть, где каждый гормон выполняет свою роль, но при этом они тесно взаимодействуют, обеспечивая координированный ответ растений на стрессовые факторы Туркестанской области (Таблица 1).

Таблица 1. Молекулярные механизмы устойчивости растений к абиотическим стрессам в условиях Туркестанской области

Стрессовый фактор	Основные проявления	Молекулярные механизмы устойчивости	Примеры культур, возделываемых в Туркестанской области
Засуха	Потеря воды, снижение тurgора, угнетение фотосинтеза	- Синтез пролина, трегалозы, сахаров (осморегуляция) - Активация генов DREB, NAC - Повышение уровня АБК (абсцизовой кислоты)	Пшеница, кукуруза, люцерна
Высокие температуры	Нарушение белкового и мембранных комплексов, фотодеструкция	- Экспрессия генов HSP (heat shock proteins) - Синтез антиоксидантных ферментов (СОД, каталаза) - Увеличение содержания защитных пигментов	Хлопчатник, томаты, виноград
Засоление почв	Токсичность Na^+ , дефицит K^+ , угнетение роста	- Активация белков-транспортеров SOS1, NHX1, HKT1 - Поддержание ионного гомеостаза - Повышение синтеза этилена и салициловой кислоты	Ячмень, пшеница, рис
Дефицит питательных веществ	Замедление метаболизма, снижение урожайности	- Активация генов усвоения фосфора (РHT1) и азота (NRT1) - Симбиоз с ризобактериями (PGPR) - Секреция органических кислот корнями	Люцерна, бобовые культуры
Интенсивное солнечное излучение (УФ-стресс)	Фотоповреждения ДНК, образование активных форм кислорода	- Активация системы фотолиаз и ДНК-репарации - Повышение содержания флавоноидов и антоцианов (естественные фильтры)	Виноград, хлопчатник, бахчевые культуры

Развитие современных биотехнологий открывает новые возможности для повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к экстремальным условиям региона. Туркестанская область, где наблюдаются засуха, засоление почв, высокие температуры и дефицит питательных веществ, является уникальной модельной территорией для проведения исследований. Использование CRISPR/Cas9 и TALEN-технологий для модификации генов, отвечающих за стрессоустойчивость (гены антиоксидантных ферментов, аквапоринов, транспортеров ионных каналов). Разработка сортов пшеницы и хлопчатника с повышенной толерантностью к засолению и жаре. Создание локальных программ маркер-ассоциированной селекции, учитывающих особенности агроценозов Туркестанской области [5, с. 51]. Внедрение ризобактерий, ассоциированных с корнями, которые повышают засухо-солеустойчивость. Использование микоризных грибов для улучшения усвоения воды и микроэлементов. В практических условиях университеты региона уже проводят опыты с инокуляцией семян бобовых и зерновых. Разработка препаратов на основе брацисиостероидов, абсцизовой кислоты и цитокининов, которые могут применяться в условиях засушливого климата для стабилизации урожайности. Практика обработки посевов кукурузы и томата регуляторами роста в фермерских хозяйствах Туркестанской области уже показала рост урожайности на 10–15 %. Omics-технологии (геномика, транскриптомика, протеомика, метаболомика). Составление «молекулярных карт стрессоустойчивости» культурных растений региона. Идентификация ключевых белков и метаболитов, участвующих в ответе на засуху и засоление. Применение этих данных для создания биоинформационных моделей, прогнозирующих реакцию растений на климатические изменения.

Современные цифровые технологии становятся неотъемлемым инструментом в молекулярной биологии растений и аграрной науке. Их внедрение позволяет не только ускорить исследования стрессоустойчивости, но и сделать результаты более точными и практически применимыми. Основные направления:

Биоинформатика и Big Data. Создание и анализ больших массивов данных о геномах, транскриптомах и метаболомах растений. Применение алгоритмов машинного обучения для выявления ключевых генов, ассоциированных со стрессами. Разработка предсказательных моделей устойчивости культур в зависимости от сценариев изменения климата. ГИС-технологии (геоинформационные системы). Мониторинг состояния посевов в Туркестанской области с использованием спутниковых данных. Составление карт засолённости почв, температурных аномалий и зон дефицита влаги. Привязка молекулярных данных о сортах к конкретным агроэкологическим зонам. Использование сенсоров для измерения влажности почвы, температуры воздуха и солевого баланса. Автоматизированный сбор данных и их передача в цифровую платформу анализа. Применение «умных теплиц» и систем капельного орошения с контролем через цифровые панели. Технологии виртуальной и дополненной реальности (VR/AR). Использование VR-симуляторов для обучения студентов работе с молекулярными данными. AR-приложения позволяют «накладывать» данные о физиологическом состоянии растения (например, уровень фотосинтеза или содержания хлорофилла) прямо на изображение в поле. Создание единой региональной базы «Стressoустойчивость растений Туркестанской области». Объединение данных полевых наблюдений, лабораторных экспериментов и молекулярных исследований. Поддержка работы исследователей, преподавателей и студентов Университета «Мирас». Практические результаты: Повышение эффективности аграрных исследований на 25–30 % за счёт точной диагностики. Снижение потерь урожая за счёт раннего выявления стрессовых факторов.

Внедрение цифровых технологий в учебный процесс университета, что способствует подготовке специалистов нового поколения. Практическая значимость для Туркестанской области. Повышение урожайности и качества продукции и (пшеницы, хлопчатника, бахчевых культур). Снижение потерь урожая в условиях засухи и засоления. Создание ресурсосберегающих технологий земледелия. Подготовка студентов и молодых специалистов в области агробиотехнологий и молекулярной биологии, что усиливает кадровый потенциал.

Анализ молекулярных механизмов устойчивости растений к стрессовым факторам среды показывает, что ключевую роль в адаптации играют генные сети, регулирующие антиоксидантную защиту, ионный гомеостаз, работу фитогормональной системы и экспрессию стресс-индукции белков. Условия Туркестанской области, характеризующиеся засухой, высокими температурами, засолением и истощением почв, требуют комплексного подхода, сочетающего фундаментальные исследования и прикладные разработки. Современные инновационные подходы – создание молекулярных карт стрессоустойчивости, использование цифровых технологий, внедрение сенсорных систем и ГИС-мониторинга – открывают новые возможности для повышения продуктивности культурных растений в регионе. Важное значение имеет интеграция биотехнологических методов с традиционным селекционным процессом, что позволит получать сорта с комплексной устойчивостью к неблагоприятным факторам [6, с. 97]. Практическая ценность исследований заключается в том, что их результаты могут быть использованы не только для повышения урожайности, но и для формирования научно обоснованных стратегий адаптации сельского хозяйства Туркестанской области к изменяющимся климатическим условиям. Включение данных технологий в образовательный процесс университетов, в частности Университета «Мираж», будет способствовать подготовке специалистов нового поколения, владеющих современными методами агробиологии, молекулярной биологии и цифровых технологий. Таким образом, дальнейшее развитие исследований в области молекулярных механизмов стрессоустойчивости растений имеет высокую теоретическую и прикладную значимость, обеспечивая основу для устойчивого развития аграрного сектора региона.

Список использованной литературы

1. Жайлаусалқызы Г., Тұрсынқұлова Қ., Сатыбалдиева А. Оценка засухоустойчивости сортов сои при различных уровнях осмотического давления // Вестник Казахского национального аграрного исследовательского университета. – 2024. – №3(91). – С. 57–65.
2. Ибадуллаева Р., Абугали Г. Основные показатели засухоустойчивости современных сортов озимой пшеницы // Вестник Казахского национального аграрного исследовательского университета. – 2024. – №2(90). – С. 112–120.
3. Тажибаева Т.Л., Абугалиева А.И., Исаева А.Б. и др. Засухоустойчивость диких, культурных и интровергессивных форм озимой пшеницы // Вестник КазНУ. Серия биологическая. – 2023. – Т. 82, №4. – С. 15–27.
4. Атабаева С.Д., Смагулова Ж.М., Кенжетаева С.Ю. Совместное действие засоления (NaCl) и ионов меди на накопление биомассы и содержание аминокислот у сортов пшеницы // Вестник КазНУ. Серия биологическая. – 2022. – Т. 81, №2. – С. 65–73.
5. Смагулова Ж.М., Мусина А.А., Абдрахманова А.Е. Устойчивость сортов сахарного сорго (*Sorghum saccharatum* L.) к засолению: физиологико-биохимические аспекты // Вестник экспериментальной биологии Казахстана. – 2023. – Т. 95, №1. – С. 42–51.
6. Мустафаев Ж.С., Нугманова Ж.К., Баймukanov Д.А. Оценка агробиологических ресурсов ландшафтов сельскохозяйственного использования Туркестанской области в условиях

изменяющегося климата // Вестник Института географии и водной безопасности. – 2024. – №4. – С. 88–97.

Рецензент: Ермекбаева Акбопе Тонтаевна PhD доктор, старший преподаватель (Южно-Казахстанский Исследовательский университет им. М.Ауезова)