

Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина

УДК 633.351 :631.52(574.2) (079.2)

На правах рукописи

ЛУЩАК ПАВЕЛ

**«Разработка адаптивных приёмов повышения продуктивности и
засухоустойчивости мягкой пшеницы в условиях сухостепной зоны
Центрального Казахстана»**

8D08102 Органическое земледелие

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
кандидат сельскохозяйственных наук,
ассоциированный профессор
Амантаев Б.О.

Зарубежный научный консультант
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор Российский университет дружбы
народов им.П. Лумумбы (Россия, Москва)
Мейсам Заргар

Республика Казахстан
Астана, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	14
1.1 Современное состояние проблемы возделывания яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального и Северного Казахстана	14
1.2 Влияние стресса засухи на растение пшеницы	16
1.3 Оценка устойчивости мягкой пшеницы к засухе	21
1.4. Агротехнологические решения по снижению негативного влияния засухи на продуктивность пшеницы	23
2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	30
2.1 Почвенно-климатические условия места проведения опыта	30
2.1.1 Климатическая характеристика зоны	30
2.1.2 Почвы зоны и опытного участка	31
2.2 Агрометеорологические условия в годы проведения полевых исследований	33
2.3 Объекты исследований	37
2.4 Схемы опытов и методика исследований	41
2.5 Агротехника на опытных делянках	50
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	54
3.1 Молекулярно-генетический скрининг сортов яровой мягкой пшеницы на засухоустойчивость	54
3.2 Влияние комплексных стимулирующих средств на засухоустойчивость яровой пшеницы (<i>Triticum aestivum</i> L.) на ранних стадиях развития	60
3.2.1 Влияние комплексных стимулирующих средств на морфологические параметры всходов семян яровой мягкой пшеницы	60
3.2.2 Влияние комплексных стимулирующих средств на всхожесть семян яровой мягкой пшеницы	63
3.2.3 Фитотоксичный эффект стимулирующих средств на всхожесть семян яровой мягкой пшеницы	67
3.2.4 Корреляционные взаимосвязи и факторная обусловленность яровой мягкой пшеницы на ранних стадиях развития при дефиците влаги	69
3.3 Влияние агротехнических мероприятий на формирование продуктивности сортов яровой мягкой пшеницы в засушливых условиях Центрального Казахстана	71
3.3.1 Влияние агротехнических мероприятий на	71

продолжительность вегетационного периода сортов яровой мягкой пшеницы	
3.3.2 Густота стояния растений сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от агротехнических мероприятий	75
3.3.3 Биометрические параметры посевов сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от изучаемых агроприемов	79
3.3.4 Влияние агротехнических мероприятий на урожайность сортов яровой мягкой пшеницы	84
3.4 Влияние агротехнических мероприятий на качество урожая сортов яровой мягкой пшеницы	90
3.5 Моделирование засухоустойчивого и высокопродуктивного сорта яровой мягкой пшеницы для условий Центрального Казахстана	94
3.6 Экономическая эффективность возделывания сортов яровой мягкой пшеницы при применении различных вариантов опыта	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	133

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

Закон Республики Казахстан «О науке» от 18.02.2011г. №407-IVЗРК.

Государственный общеобязательный стандарт высшего и послевузовского образования, утвержденный приказом Министра науки и высшего образования Республики Казахстан от 20 июля 2022 года №2.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 12036-85 Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Правила приёмки и методы отбора проб.

ГОСТ 12040-66. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения силы роста.

ГОСТ 31640-2012. Межгосударственный стандарт. Корма. Методы определения содержания сухого вещества.

ГОСТ 26205-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО.

ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.

ГОСТ 26489-85 Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО.

ГОСТ 26488-85 Почвы. Определение нитратов по методу ЦИНАО.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Ауксины - фитогормоны ауксиновой природы и синтетические аналоги ауксинов стимулирующие ростовые процессы.

Вегетационный период - период года, в котором возможны рост и развитие (вегетация) растений.

Всхожесть семян - способность семян за установленный срок давать нормальные проростки при определённых условиях проращивания.

Ген - часть молекулы ДНК, кодирующий синтез белка, который определяет определенный признак.

Генотипирование - использование ДНК для модификации биологических популяций с помощью молекулярных инструментов.

Делянка - площадь поля, определённого размера, занятая отдельным вариантом эксперимента.

ДНК-маркер - генетический маркер на основе последовательности ДНК непосредственно в конкретном гене или рядом с ним.

Засуха - явление продолжительной нехватки воды, будь то атмосферные (осадки ниже среднего), поверхностные или грунтовые воды.

Засухоустойчивость - свойство растений переносить периоды значительного обезвоживания и выживать при сильной засухе с наименьшим снижением урожайности.

Метеорологические условия - состояние атмосферы в конкретном районе на определённый момент или период времени, обусловленное происходящими в ней физическими процессами и характеризующее определённым сочетанием метеорологических элементов.

Микроэлементы - химические элементы, необходимые для протекания жизненно важных процессов в живых организмах, и содержащиеся в них в очень небольших количествах (менее 0,001%).

Наименьшая существенная разность - величина, указывающая границу возможных случайных отклонений в эксперименте.

Однонуклеотидный полиморфизм (SNP) - Последовательность ДНК, в которой существует различие только по одному нуклеотиду.

Ошибка опыта - мера расхождения между результатами выборочного исследования и истинным значением измеряемой величины.

Полимеразная цепная реакция - метод молекулярной биологии, при котором возможно экспериментальное увеличение в значительных размерах малых концентраций фрагментов дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в биологическом материале или пробе.

Праймеры - короткие одноцепочечные синтетические фрагменты ДНК (олигонуклеотиды), имеющие длину от 15 до 50 оснований, комплементарные специфичным участкам матричной ДНК.

Продуктивность растения - средняя урожайность одного растения.

Сорт - группа культурных растений, полученная в результате селекции и обладающая определенным набором характеристик, который отличает эту группу растений от других растений того же вида.

Секвенирование - метод определения нуклеотидной последовательности ДНК или РНК.

Стресс растений - биологическая реакция сопротивления растения тем факторам, которые негативно воздействуют на его здоровье.

Урожайность - количество продукции растениеводства с единицы посевной площади.

Фенологические наблюдения - наблюдения за сезонными явлениями и процессами в жизни растений и предсказание сроков их наступления.

Фенотип - совокупность всех признаков и свойств организма, которые выявляются в процессе индивидуального развития в конкретных условиях, и являются результатом взаимодействия генотипа с комплексом факторов внутренней и внешней среды.

Фитотоксичность - способность пестицидов или других веществ оказывать угнетающее (токсическое) действие на растения.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В представленной диссертации применяются следующие обозначения и сокращения:

Amplifluor - (Amplification with Fluorescence) - усиление с помощью флуоресценции;

A_m - (Accuracy simulation) - точность моделирования;

GI - (Germination index) - индекс всхожести;

GMP - (geometric middle productivity) - средняя геометрическая производительность;

PCA - (Principal component analysis) - анализ основных компонентов;

QTL - (Quantitative Trait Loci) - локусы количественных признаков;

V- (variation coefficient) - коэффициент вариации;

SI - (Stress resistance) - стрессоустойчивость;

SVI - (Shoot vitality index) - индекс жизнеспособности проростка;

SNP - Single Nucleotide Polymorphism - различия (полиморфизм) по единственному нуклеотиду;

SSI - (Stress susceptibility index) - индекс восприимчивости к стрессу;

STI - (Stress tolerance index) - индекс толерантности к стрессу;

S_x - (average arithmetic error) - средняя арифметическая ошибка;

$S_x\%$ - (relative error of the sample mean) - относительная ошибка выборочной средней;

Tol - (Tolerance) – толерантность;

r - (correlation relationship) - корреляционная связь;

R_x - (the level of reliability of the forecast) - уровень достоверности прогноза;

АФК - активные формы кислорода;

ГОСТ - государственный общесоюзный стандарт;

ГТК - гидротермический коэффициент;

ДНК - дезоксирибонуклеиновая кислота;

Карабалыкская СХОС - Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция;

КАТИУ - Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина;

КОКНВО РК - комитет по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан;

ООН - организация Объединенных Наций;

НПЦЗХ - научно-производственный центр зернового хозяйства им. А.И. Бараева;

НСР - наименьшая существенная разность;

ПРООН - программа развития Организации Объединенных Наций;

ПЦР - полимеразная цепная реакция;

РГП - Республиканское государственное предприятие;
РНК - рибонуклеиновая кислота;
ТОО - товарищество с ограниченной ответственностью;
г.- грамм;
га – гектар;
гг. – годы;
с/х – сельскохозяйственный;
г/м² - грамм на метр квадратный;
м – метр;
м² - квадратный метр;
мм - миллиметр, единица измерения количества выпавших осадков;
мг/л - миллиграмм на литр;
млн га - миллион гектар;
см – сантиметр;
С⁰ - показатель температуры по шкале Цельсия;
ср.мн. – среднемноголетние;
ЦИНАО - центральное информационное научно-аналитическое
объединение;
% - процент.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Пшеница является ключевой сельскохозяйственной культурой, обеспечивающей глобальную продовольственную безопасность, и источником 20% мирового потребления калорий.

В настоящее время Казахстан является крупным производителем пшеницы и основным экспортёром зерна на мировом рынке. За последние 20 лет в Республике Казахстан объём производства пшеницы варьируется от 8,36 - 26,7 млн. тонн ежегодно, из них экспортируется от 3,4-9,1 млн. тонн зерна и 0,6-2,0 млн. тонн муки [1], основная часть экспортируется в страны Центральной Азии. Доля экспорта пшеницы показывает высокую изменчивость от 20% до 65% годового производства [2].

Пшеница является крупнейшей сельскохозяйственной культурой в стране по посевным площадям: на её долю приходится около 80% производства зерна. Посевная площадь пшеницы варьируется от 10,74 до 13,81 млн гектаров, большая часть посевных площадей (около 10,9 млн га в 2020 году) приходится на богарные условия центрального и северного Казахстана [3]. Однако несмотря на то, что большая часть сельскохозяйственных угодий занята пшеницей, урожайность с гектара остаётся ниже региональных и мировых показателей. Средняя многолетняя урожайность пшеницы в Казахстане составляет 10,9 центнера с гектара.

Основным лимитирующим фактором низкой урожайности являются климатические условия зерносеющих регионов Казахстана (короткий вегетационный период, высокие температуры в период вегетации, а также ограниченная доступность воды) и низкий уровень использования ресурсов (удобрений и пестицидов) [4]. Это серьёзно ограничивает потенциал урожайности яровой мягкой пшеницы и объясняет существенные колебания урожайности из года в год.

Климат Центрального Казахстана характеризуется преимущественно засушливым и остро засушливым режимом влагообеспечения, что создаёт дополнительную нагрузку на агросистемы [5]. Высокая зависимость зернового производства от погодных условий подтверждается статистическими данными, демонстрирующими высокие урожаи в благоприятные годы (2011, 2024) и резкое снижение в засушливые периоды (2010, 2023) [6].

Многочисленные полевые исследования показывают, что участившиеся засухи в Казахстане приводят к значительному уменьшению урожайности пшеницы, и это особенно заметно в последние годы [7,8,9,10]. По данным R. Kumar (2021), климатически обусловленные засухи, наблюдаемые на территории страны, вызвали снижение урожайности зерновых культур на 10-30% [11].

Смягчение последствий изменения климата остаётся одной из важных проблем в основных зерносеющих регионах Казахстана. Одной из надёжных стратегий снижения воздействия засухи на пшеницу является адаптация существующих агротехнологических мероприятий на уровне управления посевами сельскохозяйственных культур.

Таким образом совершенствование элементов технологии выращивания яровой мягкой пшеницы с целью повышения продуктивности и засухоустойчивости в настоящее время востребовано и имеет большое производственное значение для сухостепной зоны Центрального Казахстана, где именно такие подходы способны наиболее эффективно использовать имеющиеся агробиологические ресурсы. Корректировка элементов агротехнологического приема возделывания яровой мягкой пшеницы, таких как: подбор устойчивых сортов к засухе, применение способов поверхностной обработки почвы, стимулирование роста и развития, является динамической долгосрочной стратегией для противодействия стрессам, связанным с засухой.

Цель исследований - разработка комплекса агротехнических мероприятий с целью повышения засухоустойчивости и продуктивности яровой мягкой пшеницы в засушливых почвенно-климатических условиях Центрального Казахстана с применением методов математического моделирования.

В задачи исследований входило:

- подобрать более засухоустойчивые сорта яровой мягкой пшеницы с использованием методов генотипирования на основе SNP маркеров;
- разработать оптимальные параметры комплексного стимулирующего средства для снижения негативных действий засухи на яровую мягкую пшеницу;
- оценить эффективность комплекса агротехнических мероприятий на повышение продуктивности и засухоустойчивости сортов яровой мягкой пшеницы;
- составить математическую модель засухоустойчивого и высокопродуктивного сорта яровой мягкой пшеницы для условий Центрального Казахстана;
- определить экономическую эффективность рекомендуемых приёмов возделывания яровой мягкой пшеницы с учетом почвенно-климатических условий Центрального Казахстана.
- провести производственную апробацию технологических приемов возделывания сортов яровой мягкой пшеницы в условиях темнокаштановых почв Центрального Казахстана.

Научная новизна исследований. Разработаны наиболее эффективные элементы технологических приёмов возделывания яровой мягкой пшеницы, повышающих продуктивность и устойчивость к засухе в условиях сухостепной зоны Центрального Казахстана, а также установлены

оптимальные параметры применения комплексного стимулирующего средства, обеспечивающие максимальный уровень продуктивности яровой мягкой пшеницы.

Практическая значимость и реализация результатов исследований.

Получен патент на полезную модель (№ 10033 от 13.05.2024г.) на комплексное средство и способ обработки для стимуляции роста и развития пшеницы, предназначенное для повышения всхожести семян, засухоустойчивости растений и увеличения продукционного потенциала.

Результаты исследований успешно внедрены в ТОО «Найдоровское» Осакаровского района Карагандинской области на площади 40 га. Уровень рентабельности яровой мягкой пшеницы сорта Таймас на варианте (семена обработаны комплексным средством, а также оно внесено в качестве листовой подкормки, с прикатыванием после посева и боронованием в период кущения) составила 32,8%, что значительно выше, в сравнении с контрольным вариантом на 19,5%. Внедрение разработанных технологических приёмов возделывания сортов яровой мягкой пшеницы обуславливает достоверное повышение засухоустойчивости на 35,74% и обеспечивает устойчивое формирование урожайности на уровне 25 ц/га с высокими показателями качества зерна.

Результаты исследований внесены в технологические регламенты возделывания яровой мягкой пшеницы в условиях ТОО «Найдоровское».

Объект исследований. Объектами исследований были 11 среднеспелых сортов яровой мягкой пшеницы, включённых в реестр селекционных достижений, рекомендуемых к использованию в Республике Казахстан, а также комплексное стимулирующее средство.

Предмет исследований - особенности формирования урожайности и качества зерна, повышение устойчивости к засухе сортов яровой мягкой пшеницы в условиях сухостепной зоны Центрального Казахстана в зависимости от технологических приёмов возделывания.

Методология и методы исследований. Лабораторные и полевые эксперименты проводились по принятым методикам в растениеводстве. При статистической обработке результатов исследований применялся метод дисперсионного анализа с использованием программы Microsoft Excel 2010 и Statistica 8,0. Калибровка и оценка модели сортов яровой мягкой пшеницы проведен по эмпирическим и статистическим методам программе STICS (версия 24).

Основные положения, выносимые на защиту:

- теоретическое и экспериментальное обоснование оптимальных параметров применения комплексных стимулирующих средств, обеспечивающих повышение интенсивности ростовых процессов, реализация продукционного потенциала сортов яровой пшеницы, выявленных на основе результатов генотипирования.

- закономерности формирования урожайности и основных элементов структуры урожая сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от комплекса применяемых агротехнических мероприятий, в т.ч. от применения комплексных стимулирующих средств.

- научно обоснованная модель засухоустойчивых сортов яровой мягкой пшеницы, адаптированных к условиям сухостепной зоны Центрального Казахстана, а также оценка экономической эффективности внедрения разработанных технологических приёмов её возделывания.

Достоверность результатов исследований обеспечена за счёт проведения достаточного количества полевых и лабораторных наблюдений и учётов, а также комплексного анализа экспериментальных данных с использованием современных статистических методов обработки результатов.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 научных публикаций, в том числе две статьи были опубликованы в международных изданиях, входящих в базу данных Web of Science - Scopus:

1. Lutschak P., Amantayev B., Kipshakbayeva G., Stybayev G., Zargar M., Ebzeev D., Soltani Nejad M. Enhancing drought resistance in early-stage development of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.) using trace elements in a dry steppe zone. Research on Crops 25 (3): 394-402 (2024). <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2024.ROC-1092>. (Scopus, Cite Score -38, Q3)

2. Amantayev B., Kipshakbayeva G., Turbekova A., Kulzhabayev Y., d Lutschak P. Enhancing Drought Resistance in Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) Through Chelated Zinc Seed Treatment: An Experimental Study. OnLine Journal of Biological Sciences 2025, 25 (1): 53-64. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2025.53.64>. (Scopus, Cite Score -54, Q2).

Три статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных КОКНВО МНВО РК;

1. Амантаев Б.О., Кипшакбаева Г.А., Кульжабаев Е.М., Луцак П.В. Жаздық бидай сорттары тұқымдарының өңгіштік көрсеткіштеріне құрғақшылықтың әсері. Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина. Астана. - 2023. -№ 3(118). - Б.181-192.

2. Луцак П., Амантаев Б.О., Мейсам Заргар, Кипшакбаева Г.А., Стыбаев Г.Ж., Кульжабаев Е.М. Жаздық жұмсақ бидай сорттарының бастапқы даму кезеңіндегі құрғақшылықтың кері әсерін төмендетуге фитогормон қолдану. Ж. Қорқыт ата атындағы Қызылорда университетінің жаршысы. №2 (69), 2024. Б.140-150.

3. Амантаев Б.О., Кипшакбаева Г.А., Мейсам Заргар, Кульжабаев Е.М. Кашкаров А.А., Луцак П.В., Каримова А.М. Жаздық жұмсақ бидай сорттарының өнімділігі мен құрғақшылыққа төзімділігін арттырудың кешенді агротехнологиялық шаралары. Вестник науки Казахского

агротехнического исследовательского университета им.С.Сейфуллина. - Астана: 2025. -№ 2 (125). - Р.30-39.

По результатам научно-исследовательских работ получен патент на полезную модель «Комплексное средство и способ обработки для стимуляции роста и развития пшеницы» № 10033. (авторы: Амантаев Б.О., Кульжабаев Е.М., Луцак П.В.; дата регистрации - 13.05.2024г.

Апробация работы.

Основные положения диссертации были доложены и опубликованы в материалах научно-практических конференций:

1. International Scientific and Practical Conference. «World science priorities», November 20-21, 2025, Vienna. Austria. на тему: «Kazakhstan: Genotyping of wheat varieties usins SNP ampliflour markers for drought tolerance».

2. International Scientific and Practical Conference «Scientific advances and innovative approaches», February 26-27, 2026, Tokyo. Japan. на тему: «Economic efficiency of sprins wheat cultivation depending on various agrotechnological measures».

Связь диссертации с госпрограммами. Работа выполнена в рамках грантового финансирования научных и (или) научно-технических проектов на 2022-2024 гг. комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан AP14870923 «Разработка адаптивных приёмов повышения продуктивности и засухоустойчивости мягкой пшеницы в засушливых условиях Центрального и Северного Казахстана с использованием математического моделирования», № гос. регистрации 0122РК00548 и AP23488514 «Изучение последствий гербицидов сульфонилмочевины в почве и пшенице, и влияние их остатков на культуры в севообороте земледелия Северного Казахстана».

Личный вклад автора состоит в обосновании актуальности выбранной темы, формулировании цели и задач исследования, разработке экспериментальных схем и методических подходов, проведении экспериментальной части работы, сборе и обработке данных с применением современных методов и их анализе, а также в написании научных публикаций и диссертационной работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 3 глав, заключения и рекомендаций производству, списка литературы из 189 источников. Работа изложена на 126 страницах компьютерного текста, содержит 21 таблиц, 29 рисунков и 7 приложений.

Благодарности. Автор искренне благодарит отечественного научного консультанта ассоциированного профессора Амантаева Б.О. и зарубежного консультанта Заргар М. за оказанную помощь на всех этапах исследований и подготовки диссертации, а также сотрудников ГОП «Растениеводство» за методическую помощь, за советы, оказанные при выполнении полевых и лабораторных исследований.

1 АГРОНОМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ И ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ (Обзор литературы)

1.1 Современное состояние и проблемы возделывания яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального и Северного Казахстана

Зерновые культуры, имеющие многолетнюю историю выращивания в рамках человеческой цивилизации, по-прежнему занимают одно из наиболее важных мест среди основных возделываемых культур. В настоящее время пшеница обеспечивает продовольствием более 2,5 миллиардов человек на земном шаре и является важнейшим источником углеводов, белков и других жизненно важных питательных веществ [12,13,14].

Мягкая пшеница содержит обширный ассортимент биологически активных веществ, необходимых для поддержания здоровья, включая витамины (особенно группы В), пищевые суплементы и биохимические вещества. Только зерновые культуры обеспечивают до 20% суточной потребности человека в пищевых волокнах, что подтверждает их важность в рационе питания.

В мировом сельском хозяйстве *Triticum aestivum* L., встречается наиболее часто. На долю мягкой пшеницы или гексаплоидной «хлебная пшеница» приходится конститутивная часть мирового производства зерна. Широкое использование мягкой пшеницы обусловлено её высокой экологической пластичностью, устойчивостью к полеганию и частичной устойчивостью ко многим фитопатогенам, значительным потенциалом урожайности и высокими технологическими свойствами зерна и продуктов его переработки.

Наряду с нею культивируется *Triticum turgidum* var. durum, тетраплоидная «твёрдая» (или «макаронная») пшеница, приспособленная к жаркому и сухому климату, которая часто используется в производстве макаронных изделий. Другие виды пшеницы занимают относительно небольшие площади и, как правило, выращиваются в рамках традиционных систем земледелия или для удовлетворения спроса на здоровые продукты питания человека [15]. Поэтому мягкая пшеница остаётся одной из важных сельскохозяйственных культур, обеспечивающих глобальную продовольственную безопасность и способствующих экономическому развитию многих стран.

На текущий момент мягкая пшеница является наиболее распространённой зерновой культурой на земном шаре, ежегодно занимая более 220 миллионов гектаров площади в разных климатических зонах. Согласно официальным данным Сельскохозяйственной службы Министерства сельского хозяйства США, самыми крупными производителями зерна мягкой пшеницы являются Китай (18%), Европейский союз (17%), Индия (13%), Россия (12%) и США (6%). В этом списке Казахстан занимает 11-е место и на его удельный вес приходится около 2,3% мирового производства зерна

пшеницы [16]. Среднее многолетнее мировое производство зерна пшеницы составляет около 768,31 млн.т. в год [17]. Несмотря на огромный объём производства, мировая потребность в пшенице на сезон 2024-2025 гг. составила 800,1 млн.т., в том числе по направлениям продовольственное, семенное, промышленное и кормовое использование [18]. Более половины производимого объёма используется для потребления человеком, а остальная часть - в качестве корма для животных и в перерабатывающей промышленности [19].

Урожайность и характеристики систем выращивания пшеницы значительно различаются в зависимости от агроэкологических условий, эффективности использования различных ресурсов и технологического уровня зернопроизводящих хозяйств. Средняя амплитуда урожайности пшеницы на неорошаемых землях Казахстана колеблется от 0,61 т/га до 6 т/га, и более в странах с интенсивным земледелием, таких как Ирландия, Бельгия и Нидерланды [20].

Несмотря на широкую экологическую пластичность растений пшеницы, умеренный климат является оптимальным для её выращивания. При оптимальных условиях возделывания, в том числе умеренных температурах, достаточном количестве влаги, питательных веществ и средств защиты растений - урожайность зерна может превышать 10 т/га. Однако в последние десятилетия глобальное изменение климата значительно осложнило условия выращивания этой культуры во многих регионах мира.

Развитие сельского хозяйства как отрасль наиболее тесно связано с природными и климатическими факторами, и изменение климата оказало на него наиболее сильное воздействие. Сокращение объёма доступной влаги и повышение среднегодовой температуры за последние 30 лет привели к ухудшению продуктивности многих культур, включая пшеницу, что, в свою очередь, влияет на продовольственную безопасность многих стран [21,22].

Тенденции изменения температуры в прошлом показывают уменьшение продуктивности мягкой пшеницы на 5,5% в период с 1980 по 2010 год из-за повышения средней глобальной температуры на 0,13 °С. Снижение урожайности в связи с повышением температуры продолжается [23].

Согласно многочисленным исследованиям, каждый последующий градус глобального потепления земного шара может снизить урожайность пшеницы примерно на 6 процентов [24,25,26].

Помимо теплового стресса на формирование урожая пшеницы существенное влияние оказывает также недостаток влаги. Из-за неблагоприятных климатических факторов общие потери продуктивности зерна за последнее десятилетие составляли от 5,5 до 12% в зависимости от сезонных и региональных особенностей выращивания [27,28].

Влияние климатических факторов больше всего заметно в зерносеющих регионах Казахстана, где производство зерна пшеницы в значительной степени зависит от погодно-климатических условий. Обширность территории,

охватывающей несколько природных и климатических зон, обуславливает существенные различия в интенсивности наступления засух. Засухи носят региональный характер и проявляются по-разному в зависимости от местных климатических условий. Агроклиматические параметры вегетационного периода во многом зависят от поступления влаги.

Тесная взаимосвязь между урожайностью пшеницы и изменчивостью климата доказана в работе В.Павлова и др. [9]. Коллектив авторов отмечает, что урожайность зерна пшеницы в степной зоне Казахстана тесно связана с изменчивостью климата, которая характеризуется высокими межгодовыми колебаниями за последние 10 лет при низкой доступности влаги и высокими температурами воздуха.

Согласно результатам исследования Fehér I. и др., агроэкологическое состояние производства пшеницы в Казахстане в долгосрочном векторе изменяется в худшую сторону [29]. Результаты их моделирования показывают, что климат в зернопроизводящих регионах Казахстана станет ещё теплее и суше, а амплитуда засушливых периодов и экстремальных погодных явлений сокращается. Если не будет увеличено сокращение использования ресурсов и не будут адаптированы методы управления за посевами, урожайность пшеницы в Казахстане может понизиться.

Согласно прогнозам климатологов, к каждому году ожидается снижение уровня урожайности, например к 2050 году прогнозируется повышение средней климатической температуры на 0,6-2,5 °С, а к 2100 году ещё на 1,4-5,8 °С. По прогнозам ожидается дальнейшее усиление засушливых явлений каждый год по математической прогрессии [30].

Такие же прогнозы приводят по результатам исследований, выполненных в рамках программы развития ПРООН, где отмечают высокую климатическую уязвимость зерносеющих регионов Казахстана. При сохранении текущих технологических подходов возделывания пшеницы в основных зерносеющих регионах страны к 2030 году ожидается снижение урожайности зерна яровой пшеницы в пределах 13-37%, к 2050 году в амплитуде 20-49% [31]. Эти прогнозы взаимообусловлены расположением Казахстана. Основные зерносеющие регионы находятся в центре Азии, где климат является резко континентальным с повышенной чувствительностью агроклиматических систем к изменениям климатических условий.

Несмотря на прогнозируемое обострение условий выращивания пшеницы, производство зерна в Казахстане имеет потенциал увеличения до 33 процентов к 2035 году.

1.2 Влияние стресса засухи на растения пшеницы

Сельскохозяйственные культуры регулярно подвергаются влиянию различных неблагоприятных факторов - стрессоров, которые по происхождению подразделяются на биотические и абиотические. Биологические агенты стресса преимущественно включают патогенные

организмы, в том числе фитопатогенные грибы, бактерии и вирусы. К абиотическим факторам стресса относят засуху, критические температуры, повышенную засоленность почвы и другие неблагоприятные условия среды. Среди них значительный вред производству продуктов растениеводства, как правило, вызывает засуха. Под засухой понимают недостаток влаги и метеорологических осадков, складывающийся в регионах с дефицитом или неустойчивым увлажнением.

Засухи делят на почвенную, атмосферную и комбинированную. Почвенная засуха характеризуется острым дефицитом доступной влаги в почве, атмосферная - низкой относительной влажностью воздуха в сочетании с повышенными температурами. Комбинированная засуха проявляется одновременным недостатком почвенной влаги и повышенными температурами воздуха.

В зависимости от времени возникновения, засухи подразделяют на весенние, летние и осенние. Также по степени выраженности делят на слабые, умеренные и сильные. Ранневесенние засухи обычно отрицательно влияют на полевую всхожесть семян и формирование корневой системы растений. Острый дефицит влаги в период активного роста вегетативной массы растений (фазы выхода в трубку и колошения) является одной из жизненно важной причиной уменьшения продуктивности зерна яровой пшеницы.

По происхождению и по своим биологическим особенностям *Triticum aestivum* L. относится к растениям умеренного климата. В начальных этапах онтогенеза пшеницы, в том числе в период прорастания семян и последующего появления всходов - рост надземной массы и корневой системы проходят относительно медленно. После появления проростков пшеницы на поверхности почвы через 12-17 дней наступает фаза кущения. Этот период сочетается с ускорением физиологических процессов, и растение переходит с гетеротрофного на автотрофное питание. Более активный рост вегетативной массы растений пшеницы наблюдается с момента выхода в трубку, когда усиливаются механизмы формирования будущих репродуктивных органов.

Потребление влаги яровой пшеницей в течение вегетационного периода осуществляется неравномерно и зависит от конкретной фазы онтогенеза. От посева до появления всходов яровая пшеница потребляет примерно 5-7% общего необходимого объема влаги, в период кущения - 15-20%, а в период выхода в трубку и колошения - 50-60%. В фазе молочной спелости яровой пшеницы потребление влаги составляет 20-30%, а в фазе восковой спелости - 3-5% от суммарного влагоиспользования [32,33]. Максимальный расход влаги наблюдается в периоды формирования репродуктивных органов (IV...VII этапы органогенеза), поэтому фазы выхода в трубку и колошения являются наиболее критическими для яровой мягкой пшеницы [34]. Недостаток влаги, повышение температуры воздуха, увеличение количества жарких дней,

продолжительная засуха в этот период роста и развития растений приводят к значительному снижению продуктивности яровой пшеницы. Такое явление может повлиять пагубно для растений, особенно в условиях Центрального и Северного Казахстана, где дефицит влаги является доминирующим лимитирующим фактором [35].

Длительная засуха является наиболее разрушительным абиотическим стрессором. Засуха может повлиять на широкий спектр молекулярных, биохимических, физиологических, морфологических и экологических процессов, которые определяют дальнейший рост и развитие растений и уровень формирования продуктивности. При длительном дефиците влаги растение подвергается стрессу, нарушаются основные метаболические реакции и обмен веществ, влияющие на формирование продуктивности. Длительная засуха приводит к уменьшению размера ассимиляционного аппарата, снижению роста вегетативных масс и корневой системы, ухудшает взаимодействие между растением и водной средой, снижает коэффициент полезного водопотребления.

По данным многочисленных исследований, ранняя засуха угрожает оптимальному развитию растений, которое определяет потенциал будущей продуктивности пшеницы [27,36,37]. В условиях острого недостатка влаги снижаются основные характеристики раннего роста, в том числе всхожести: длина корешка, длина coleoptily, процент прорастания, индекс энергии прорастания и способность семян к быстрому поглощению влаги. В отличие от многих сельскохозяйственных культур, мягкая пшеница особенно чувствительна к дефициту воды на ранних стадиях развития. В этом периоде покоящиеся семена, начиная впитывать влагу, переходят в фазу интенсивных морфологических и биохимических преобразований, приводящих к формированию всхода. Различные критические стрессы в этот период развития оказывают негативный эффект, определяя способность растения развиваться в дальнейшем и формировать урожай. Более длительная нехватка влаги в начале периода роста и развития растений снижает количество продуктивных побегов и отрицательно влияет на развитие репродуктивных органов.

Оценка устойчивости к засухе в период появления всходов имеет важное значение, так как она определяет последующие фазы роста и урожайности пшеницы [38,39,40]. При воздействии засухи на семена снижается полевая всхожесть, поэтому необходимо применить оптимальные методы снижения водного стресса от подготовки почвы к посеву до появления проростков [41, 42].

Использование оптимальных методов снижения негативных действий стресса от засухи в период подготовки семян к посеву и прорастание семян является очень рациональным элементом технологии выращивания яровой мягкой пшеницы [43,44,45,46].

По данным Aksenov M. и др., урожайные свойства семян зависят от численности жизнеспособных побегов, поэтому предпосевная обработка семян ростостимулирующими препаратами является основным механизмом повышения их биологического потенциала [47]. Wu S. и др. подтверждает, что одним из самых результативных методов повышения устойчивости к засухе в ранние периоды развития является регулирование оптимального фитогормонального и питательного баланса растений. Высокоэффективные методы повышения засухоустойчивости способствуют снижению уровня активных форм кислорода, повышению активности антиоксидантных ферментов, улучшению осмотической регуляции и способности растений оптимальному водопотреблению [48,49].

В фазе кущения пшеницы формируется число членков колосового стержня, что делает её чрезвычайно существенной в структурообразовании будущего урожая. Недостаток почвенной влаги в сочетании с высокими температурами воздуха является одним из критических факторов продуктивности в зерносеющих регионах Казахстана [50]. Стресс, вызванный засухой в периоды кущения-налива зерна, способен снижать урожайность пшеницы до 69%. Более поздние сроки поступления стресса в периоды колошения и цветения, сочетающиеся с сокращённым периодом налива, часто взаимосвязаны с более высокой урожайностью в условиях засухи раннего периода развития пшеницы [51].

Острый недостаток влаги в критические периоды развития пшеницы, особенно в период появления генеративных органов, приводит к увеличению количества бесплодных колосков. В фазах формирования и налива зерна стресс из-за засухи снижает массы 1000 зёрен и крупности зерна. Воздействие суховеев приводит к явлению захвата (запала) растений. В этом случае листья из-за потери тургора скручиваются, уменьшается транспирация и повышается температура листа. Из других органов растений пшеницы, в том числе из генеративных, влага распределяется к листовому аппарату, что приводит к образованию щуплого или недоразвитого зерна [52,53].

Согласно данным Ghadirnezhad Shiade S.R. и других [54], если засуха происходит в период кущения пшеницы, устойчивость сортов к засухе в основном определяется периодом развития, на который приходится стресс от засухи. В этом случае наблюдается уменьшение общего числа продуктивных стеблей, количества колосков в колосе. Восстановление растений после стресса засухи зависит от количества колосков, развившихся до и после засухи.

Засуха в стадии выхода в трубку снижает рост стебля и подавляет клеточное расширение из-за изменения метаболизма гиббереллинов [55]. Воздействие засухи в ранние стадии выхода в трубку наиболее существенно снижает количество колосков. Засуха в период цветения нарушает оплодотворение и уменьшает число зёрен в колосе, а также снижает массу

тысячи зёрен [56]. Сильный стресс повышает чувствительность пыльцы к стерильности, что напрямую снижает урожайность.

Водный дефицит во время налива зерна ограничивает фотосинтез, ускоряет старение листьев и сокращает продолжительность периода налива [57]. Это одна из ключевых причин снижения урожайности, поскольку в этот период происходит формирование массы зерна.

Восстановление роста и развитие растений после засухи, происходящей на вегетативной стадии, важно для формирования урожайности зерна [58].

Воздействие засухи оказывает угнетающее влияние на рост сельскохозяйственных культур, вызывая комплексные изменения на физиологическом, биохимическом и молекулярном уровнях. [9,35, 59,60].

Стресс, возникающий от засухи, вызывает морфологические изменения в пшенице, том числе, уменьшается объём листьев и снижается высота растений и длина колоса. При сильном недостатке влаги из-за потери тургора и нехватки осмотической регуляции в тканях происходит скручивание листьев. При скручивании листьев уменьшается воздействие солнечной радиации на 41-48%, снижается температура и транспирация листьев. При остром недостатке влаги в верхнем слое почвы сокращается количество корней, которое может повысить уровень абсцизовой кислоты, потенциально снижая устьичную проводимость и урожайность [61,62,63].

Водный дефицит ограничивает физиологические процессы растений, что в конечном итоге приводит к существенному снижению урожайности.

Засуха снижает содержание хлорофилла, нарушает водный потенциал, осмотический потенциал и тургор листьев, снижает относительное содержание влаги и ускоряет закрытие устьиц. Ограничение поступления CO_2 уменьшает интенсивность фотосинтеза. Он влияет на фотосистему II, замедляя транспорт электронов, увеличивая способность нефотохимических веществ и, в конечном итоге, снижая относительное содержание влаги в пшенице [64,65,66]. Активация хлорофиллазы и инаktivация ферментов энергетического обмена приводят к снижению синтеза АТФ на 13-15%, что замедляет метаболизм и усиливает физиологические нарушения [67].

В ответ на водный стресс активируются антиоксидантные защитные системы. Избыточные активные формы кислорода (ROS) вызывают перекисное окисление липидов, что приводит к увеличению активности супероксиддисмутазы (SOD), пероксидазы (POD), каталазы (CAT) и аскорбатпероксидазы (APX). Абсцизовая кислота (АБК) играет ключевую роль в реакции растений на засуху, регулируя закрытие устьиц, поддержание водного баланса, активируя транскрипцию генов стрессоустойчивости [68].

Для поглощения влаги из почвы при засухах растение для регулирования осмотического давления увеличивает объём углеводов и пролина. Наибольший объём углеводов и пролина создаёт в организме растений высокое осмотическое давление, которое даёт возможность использовать небольшое количество влаги из почвы [69]. Растения обладают

свойствами с различными механизмами адаптаций и ответных реакций на стресс от засухи, которые вызывают заметное изменение физиологических, биохимических и морфологических реакций организма растений [70].

При умеренном стрессе растения регулируют осмотическое давление путём накопления углеводов и пролина, которые повышают осмотический потенциал и позволяют использовать минимальные количества влаги. При длительной засухе нарушается водный баланс, скорость транспирации, обмен питательных веществ, процессы фотосинтеза и другие метаболические процессы растений [71]. Вышеуказанные отрицательные влияния приводят к ухудшению роста и развития растений, к снижению урожайности. На этом уровне засухи включается молекулярный механизм регулирования. Сигнализация стресса индуцирует экспрессию генов, что приводит к синтезу белков, ответственных за различные виды деятельности, включая регуляцию транскрипции, защиту клеточной мембраны, биосинтез антиоксидантов и поглощение воды и ионов. Гены, участвующие в поддержании и защите клеточной структуры, являются ключевыми целями для развития устойчивых к засухе сельскохозяйственных культур со сложной регуляцией в ответ на ограниченную доступность воды. Эти гены участвуют в синтезе гормонов (АБК, метаболизм пролина, ферменты, нейтрализующие ROS), в метаболизме углеводов, в делении клеток корней [72] и в качестве [73] получаемой продукции.

Климатически обусловленные засушливые условия также ограничивают доступность ключевых микроэлементов, таких как железо и цинк, что в сочетании с другими неблагоприятными факторами представляет серьёзную угрозу для устойчивого производства зерна пшеницы в засушливых регионах мира [74,75].

1.3 Оценка устойчивости растений мягкой пшеницы к засухе

Устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессу засухи является казуальным, поликомпонентным признаком. На уровень засухоустойчивости влияет огромное количество физиологических, морфологических и биохимических стрессоров. При определении устойчивости различных сортов мягкой пшеницы по одному признаку или по признакам одного типа нередко возникают существенные методологические ошибки.

Существует широкий спектр методов оценки засухоустойчивости растений, включающий как полевые, так и лабораторные подходы. К основным методам относят, полевую оценку, определение засухоустойчивости в засушниках, метод географических посевов и экологических испытаний, пинцировка колоса, определение числа зелёных листьев и степени их окраски, проращивание семян в растворах осмотического стресса, анализ содержания пролина, определение эластичности и вязкости протоплазмы и другие.

Однако ни один из перечисленных методов не обеспечивает абсолютной точности в оценке уровня засухоустойчивости. Поэтому для объективной

характеристики исходного материала необходимо сочетать лабораторные и полевые методы диагностики.

В настоящее время не существует единственного параметра, который можно было бы использовать для полной и точной характеристики засухоустойчивости. В связи с этим чрезвычайно важным является выбор комплекса информативных признаков и адекватных методов оценки, позволяющих объективно охарактеризовать устойчивость сортов в различных условиях.

Дополнительную сложность создаёт взаимосвязанность многих показателей устойчивости к засухе. Выраженная корреляция между параметрами приводит к перекрывающимся реакциям, что затрудняет выделение отдельных механизмов устойчивости. В связи с этим Mdluli S. и соавторы рекомендуют применять многомерные методы анализа, включая методы факторной оценки [76]. Применение анализа главных компонент (РСА) позволяет объединить большое число показателей в несколько основных факторов, уменьшить влияние отсутствующих данных и обеспечить более точную группировку генотипов по уровню засухоустойчивости.

Для оценки устойчивости всходов мягкой пшеницы к засухе наиболее информативными признаками являются процент прорастания, длина побегов, длина корня и соотношение массы корневой и надземной частей проростков [77]. При исследовании засухоустойчивости на ранних этапах развития, особенно в период появления всходов, большое значение имеют параметры всхожести, их устойчивость, жизнеспособность проростков и их реакция на дефицит влаги [78].

Реальный потенциал прорастания семян характеризуется широким набором показателей [79,80,81]. Семена пшеницы, независимо от сортовой принадлежности, в условиях дефицита влаги демонстрируют высокую корреляцию между параметрами всхожести, что свидетельствует об усилении адаптационных механизмов и стремлении к выживанию в условиях ограниченного водоснабжения.

Большинство исследователей оценивают засухоустойчивость сортов мягкой пшеницы на основе морфологических показателей и элементов структуры урожая. К основным из них относятся высота растения, количество продуктивных стеблей, число колосков в колосе, количество зёрен в колосе, выполненность зерна, листовой поверхности, биологическая урожайность и фактическая урожайность зерна [82,83,84]. Данные параметры отражают интегральное действие стрессовых факторов и позволяют оценить продуктивность растения в разнообразных агроэкологических условиях.

При отборе сортов мягкой пшеницы на засухоустойчивость важнейшими критериями выступают индекс восприимчивости к засухе и эффективность засухоустойчивости, которые позволяют количественно выразить степень адаптации генотипа к стрессу [85]. Полевые исследования Kumar P. и др. подтверждают, что индекс толерантности к стрессу, средняя относительная

продуктивность и индекс стабильности урожайности имеют достоверную положительную корреляцию с урожайностью зерна, продолжительностью вегетационного периода, скоростью и длительностью налива зерна, а также с другими ключевыми признаками, определяющими продуктивность растений как при нормальном влагообеспечении, так и под воздействием засушливого стресса [86].

Следует учитывать, что оцениваемые признаки засухоустойчивости существенно зависят от исследовательской среды, времени проведения скрининга и репрезентативности выбранных индексов [87]. Поэтому при оценке реакций сортов мягкой пшеницы на засуху важно рассматривать каждый показатель как часть комплексной характеристики. В условиях Центрального Казахстана данный подход особенно актуален, поскольку продуктивность и качество зерна, устойчивость к абиотическим факторам и продолжительность вегетационного периода тесно взаимосвязаны с адаптивными возможностями сортов, испытывающих выраженный дефицит влаги.

1.4. Агротехнологические решения по снижению негативного влияния засухи на продуктивность пшеницы

Изменение климата продолжает представлять серьёзную угрозу для человечества из-за широкомасштабных последствий для здоровья людей, экологической безопасности и, в особенности, сельского хозяйства, что в конечном итоге затрагивает мировую продовольственную безопасность. Современное сельское хозяйство сталкивается с необходимостью удовлетворять растущий мировой спрос на продовольствие в условиях усугубляющихся климатических стрессов. Среди них засуха является одним из наиболее значимых абиотических факторов, ограничивающих производство сельскохозяйственных культур. Пшеница, как одна из основных продовольственных культур мира, особенно уязвима к водному дефициту, что приводит к существенному снижению её продуктивности [88]. Так, в последние годы глобальные климатические изменения обусловили снижение урожайности яровой мягкой пшеницы на 5,5%, а ежегодные потери зерна вследствие недостатка влаги могут достигать 42,25 млн т. [23].

Пшеница (*Triticum aestivum* L.), являясь культурой умеренного пояса, чрезвычайно чувствительна к повышению температуры и засушливым условиям. Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения вызывают существенные колебания её урожайности. В условиях степной зоны Казахстана недостаток влаги в вегетационный период может привести к недобору урожая в размере 20-25%, а в экстремальные годы - до 40%, а также к увеличению коэффициента вариации урожайности.

Климатические изменения, наблюдаемые в Казахстане за последние десятилетия, существенно обусловили снижение урожайности яровой пшеницы.

Водный стресс в период вегетации приводит к значительному сокращению продуктивности, что требует разработки и внедрения адаптационных мер, направленных на управление тепловым и водным стрессами в условиях изменяющегося климата. Ключевым направлением является переход к климатически оптимизированным системам земледелия, способным снижать негативное воздействие климатических изменений до того, как оно окажет критическое влияние на производство продовольствия [89,90].

Наличие адаптационных технологий, уменьшающих потери урожая, приобретает особое значение для обеспечения устойчивости к климатическим стрессам [91,92,93].

Одним из наиболее перспективных подходов является использование сортов сельскохозяйственных культур, устойчивых к абиотическим стрессам, включая засуху. По мнению Shahzad S. и др., для эффективной адаптации необходимы комплексные и междисциплинарные стратегии, объединяющие геномные исследования, генетический анализ и биотехнологические методы [94]. Внедрение современных и традиционных биотехнологических инструментов в национальные аграрные программы позволит повысить адаптивный потенциал культур к изменяющимся условиям среды.

Геном мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L., $2n = 6x = 42$; AABBDD) составляет около 17 Гб, и значительное количество генов, маркеров и QTL, ассоциированных с полигенными признаками, картировано вдоль 21 хромосомы [95]. Эти геномные ресурсы критически важны для понимания механизмов засухоустойчивости у сложных полиплоидных культур.

Singh C. и др. подчеркивают необходимость использования генетического разнообразия пшеницы при создании засухоустойчивых сортов, включая признаки строения корневой системы, эффективность водопользования и активность стресс-чувствительных генов [96]. Важную роль играют молекулярные методы - маркер-ассистированная селекция и редактирование генов - позволяющие ускорить интеграцию генов засухоустойчивости в элитные генотипы.

Реакция растений на дефицит влаги определяется генотипическими особенностями и скоростью включения осмотических регуляторных механизмов [97,98]. Ответ на засушливый стресс проявляется на различных уровнях организации растения и зависит от физиологических и фенологических характеристик сорта. Поэтому отбор генотипов с повышенной засухоустойчивостью и стабильной урожайностью остаётся центральной задачей селекции. Оценка генотипов пшеницы по индексам толерантности, физиологическим параметрам и фенологическим признакам в условиях засухи является актуальной и позволяет выделять наиболее перспективные линии. Генотипы пшеницы могут по-разному реагировать на засухоустойчивость с точки зрения фенологических и физиологических признаков из-за различного генетического потенциала и скрининга наиболее

превосходных генотипов, которые могут повысить урожайность пшеницы в условиях изменяющегося климата [99].

Современные исследования показывают, что корректировка количества копий определённых генов способствует развитию более мощной и глубокой корневой системы, что облегчает доступ растений к воде из глубоких горизонтов почвы. Полученные методом редактирования генов CRISPR линии характеризуются увеличенной биомассой и более высоким урожаем зерна [100]. Дополнительную значимость приобретают исследования генотип $\times$ среда $\times$ управление ($G \times E \times M$), позволяющие оценивать адаптивные реакции генотипов на долгосрочные климатические изменения. Несмотря на высокую эффективность, такие подходы требуют значительных временных и финансовых ресурсов [101].

Результаты кластерного анализа и анализа главных компонентов, проведённых Guizani A. и др. [102], подтверждают наличие генетической изменчивости в реакции пшеницы на засушливый стресс. Наиболее информативными оказались индекс восприимчивости к стрессу (SSI) и индекс толерантности (TOL), высоко коррелирующие с уровнями генотипической устойчивости. Генотипирование с использованием 12 высокополиморфных маркеров SSR позволило амплифицировать 101 аллель со средним уровнем полиморфизма 74%. Dorostkar S.L. и др. установили, что засуха приводит к значительному снижению урожайности и её компонентов, но высокие значения STI, MP и GMP и низкие значения SSI служат надёжными критериями отбора устойчивых генотипов [103].

Одним из эффективных направлений смягчения последствий засухи является использование полуккарликовых сортов пшеницы. По данным Zhao Z. и др., такие сорта, обладающие удлинёнными coleoptилями, обеспечивают повышение урожайности на 18-20% по сравнению с сортами средней высоты [104].

Значительную роль в смягчении неблагоприятных воздействий высоких температур и недостатка влаги на пшеницу играют агротехнические приёмы, среди которых предпосевная обработка семян, оптимальные сроки сева, минимальная обработка почвы, мульчирование, дополнительный полив в период цветения, листовые подкормки растворами KNO_3 и применение органической мульчи [105]. Эти меры позволяют смягчить негативное воздействие засушливых и высокотемпературных условий.

Стабилизация или повышение урожайности возделываемых сортов возможны только при строгом соблюдении агротехнических требований: рациональная структура посевов, научно обоснованные севообороты, компенсация выноса питательных веществ, контроль фитосанитарного состояния, своевременная уборка урожая [106].

Создание оптимальных условий для прорастания семян и раннего развития растений способствует ускоренному формированию листовой поверхности, снижению испарения почвенной влаги и повышению

эффективности её использования, что приводит к увеличению биомассы и урожайности в условиях терминальной засухи [107].

Дополнительные возможности оценки адаптивного потенциала открывает моделирование роста растений на основе физиолого-биохимических процессов. Подобные подходы к моделированию позволяют прогнозировать влияние раннего развития на продуктивность в различных климатических и агротехнических условиях [108].

Изменяющийся климат оказывает значительное отрицательное влияние на производство пшеницы. Исследования Malko M.M. и др. показали, что химическая обработка растений способствует смягчению засушливого стресса за счёт усиления экспрессии стрессовых белков и антиоксидантных ферментов, регулирующих образование активных форм кислорода [37]. Применение различных препаратов в пред-и послевсходовый период повышает устойчивость растений, поддерживая их физиологическую активность.

Засуха приводит к морфологическим, физиологическим и биохимическим изменениям в растении: снижению энергии прорастания, уменьшению площади листьев, замедлению роста, ослаблению фотосинтеза и синтеза хлорофилла, а также накоплению активных форм кислорода, вызывающих повреждение биомолекул. Для противодействия стрессу растения задействуют механизмы засухоустойчивости и избегания засухи. Создание адаптивных генотипов и корректировка агротехнических мероприятий (рациональный полив, сохранение влаги, изменение сроков сева, прайминг семян) существенно снижает последствия водного дефицита [109].

Адаптация культуры к условиям выращивания является ключевым свойством, определяющим её продуктивность. Полевые эксперименты Shestakova N. и др. показали, что корректировка сроков сева, норм высева и доз удобрений усиливает реализацию генетического потенциала сорта «Шортандинская 2012» в двух климатических зонах Казахстана. В степной зоне на хозяйственный результат наиболее сильно влияли более поздние сроки сева и повышенные нормы высева, обеспечившие прибавку урожайности на 16-21% [110].

Микроэлементы играют важную роль в повышении устойчивости растений к стрессам, влияя на физиологические процессы и развитие [111,112,113,114]. По мнению Hasanuzzaman M. и др., усиление антиоксидантной системы - один из наиболее эффективных способов смягчения окислительного стресса [115]. Роль внесения микроэлементов в усвоении питательных веществ, их оптимальное соотношение, норма внесения, влияние на параметры всхожести, роста и развития растений в условиях стресса от засухи изучены недостаточно.

Полевые исследования Mehrinfar A.R. и др. (2023) показывают, что внекорневое внесение микроэлементов на посевах мягкой пшеницы повышает урожайность и содержание микроэлементов в зерне [116]. Работы Mahdy R.E. и

др. доказывают, что достаточное количество микроэлементов ослабляют напряжение от засухи, активизируя ростовые процессы, особенно корневых систем растений [117]. По данным Ma D. и др. [118], внесение оптимальных доз микроудобрений увеличивает содержание антиоксидантов, в том числе аскорбатов, восстановленного глутатиона, фенолов, флавоноидов. Тем самым снижают содержание липидов. Аналогичные результаты отмечены Raeisi Sadati S.Y. [119] и Taran N. [120]. Применение микроэлементов также повышает активность α -амилазы и стимулирует метаболическую активность проростков [121].

Обработка семян наночастицами микроэлементов улучшает всхожесть и начальное развитие проростков, повышая их устойчивость к засухе [122]. Так, применение кремния увеличивает экспрессию генов, уровень ауксина и фруктозы, способствует синтезу осмопротекторов и активирует антиоксидантные ферменты [123,124]. Цинк повышает содержание антиоксидантов, количество фотосинтетических пигментов, активирует стрессовые гены и снижает перекисное окисление липидов [118]. Обработка семян марганцем (Mn) стимулирует фотосинтетический аппарат, улучшает детоксикацию активных форм кислорода и участвует в биосинтезе лигнина и репарации ДНК [11,125].

В результате, за счёт вышеуказанных функций микроэлементов происходит повышение всхожести семян сортов яровой мягкой пшеницы, особенно интенсивно развивается корневая система.

Эффективность обработки семян пшеницы зависит от концентрации и соотношения препаратов, а также времени прайминга. При обработке семян ZnO (10 мг/л, 18 часов) наблюдается максимальное улучшение всхожести, биомассы и энергии роста по сравнению с контролем и гидропраймингом [121]. Листовая подкормка цинком (0,2%) увеличивает урожайность на 25–40% и повышает индекс засухоустойчивости [75]. При применении хелатных форм цинка, по сравнению с наночастицами микроэлементов, отмечено эффективное влияние на негативные последствия засухи в период появления всходов пшеницы, увеличивается свежая и сухая масса побегов и корешков [126].

Обработка ZnO (10 мг/л) семян пшеницы показала значительное положительное влияние на всхожесть семян и индекс жизнеспособности по сравнению с непраймированными (контрольными) и гидропраймированными семенами [121].

Неправильный подбор концентрации и соотношение микроэлементов для обработки семян наносят большой вред корневой системе проростков пшеницы. Необоснованное повышение оптимальных концентраций микроэлементов вызывает фитотоксичность, которая вызывает уменьшение всхожести, повреждение корней и проростков, разрушение антиоксидантных систем и обмен веществ [127].

При высоком содержании микроэлементов наблюдается ингибирующий эффект с отрицательным влиянием на всхожесть, длину корней и проростков, а также снижается показатель индекса переносимости стресса [128,129,130].

Высокие дозы микроэлементов приводят к уменьшению площади клеток и скорости деления клеток. Тем самым, этот отрицательный эффект приводит к уменьшению всхожести семян и продуктивности зерна мягкой пшеницы [131,132,133].

Данные исследований Imtiaz M.И. и др. по изучению антагонистических действий микроэлементов [134] показали, что увеличение концентрации микроэлементов приводит к уменьшению содержания Fe в растениях. Цинк также препятствует усвоению Mn и Si растениями. Применение различных концентраций микроэлементов по-разному влияет на усвоение других элементов в зависимости от видов растений [11, 135]. Например, в проростках пшеницы низкое содержание Zn (<1мкМ) способствует усвоению калия (K), магния (Mg) и марганца (Mn), высокое содержание Zn (>1мкМ) значительно ингибирует поглощение этих элементов [136].

Использование микробиологических препаратов является перспективным направлением повышения засухоустойчивости пшеницы. По данным Yang B. и др., такие препараты повышают содержание хлорофилла, эффективность фотосинтеза, активность антиоксидантных ферментов и уровень осмолитов, снижая содержание МДА и увеличивая биомассу и урожайность [137]. Ahmad A. и др. показали, что внесение вермикомпоста (4 т/га) способствует стабилизации клеточных мембран, увеличению содержания элементов питания, хлорофилла и антиоксидантной активности [138].

Инокуляция растений высокоактивными бактериальными изолятами повышает водопоглощение, устойчивость мембран, активность супероксиддисмутазы и каталазы, что уменьшает окислительные повреждения. Инокуляция также улучшила биомассу побегов и корней растений пшеницы, по сравнению с неинокулированным контролем в условиях засухи. У обработанных растений наблюдалось повышение активности супероксиддисмутазы и каталазы, по сравнению с контрольными, что защищало растения от окислительного повреждения [139].

Применение биопрепарата Азолен в условиях естественной засухи стабилизирует водный режим, снижает уровень МДА и АБК, повышает содержание цитокининов и ауксинов, усиливает фотосинтез и увеличивает урожайность. При сочетании с гербицидами его эффективность возрастает. Все эти факторы в совокупности привели к повышению ростовых характеристик побегов, улучшению структуры урожая и качества зерна. Применение биопрепарата в период засухи повысило урожайность зерна на 545 ц/га; в тех же условиях совместное применение гербицидной обработки и биопрепарата увеличило урожайность на 1366 ц/га [140].

Несмотря на многочисленные исследования, единого мнения относительно преимуществ конкретных методов повышения

засухоустойчивости пшеницы не имеется. Однако очевидна перспективность комплексного подхода, объединяющего агротехнические приёмы, предпосевную обработку семян и оптимизацию почвенной поверхности для сокращения потерь влаги. Данные положения стали основанием для выбора направления исследования, предполагающего изучение комплекса агротехнических мероприятий, направленных на повышение продуктивности и засухоустойчивости яровой мягкой пшеницы в резко континентальных засушливых условиях Центрального Казахстана с применением методов математического моделирования.

2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Почвенно-климатические условия места проведения опыта

Полевые опыты проведены в период с 2023 по 2025 годы в условиях экспериментального участка ТОО «Найдоровское», Осакаровского района Карагандинской области по координатам - 50° С.Ш. и 72° В.Д. (рисунок 1).



Рисунок 1. Место проведения полевого опыта.

2.1.1 Климатическая характеристика зоны

Карагандинская область охватывает наиболее возвышенную часть Казахского мелкосопочника - Сарыарки, представляющую собой специфическую и в геоморфологическом отношении неоднородную приподнятую территорию с абсолютными отметками рельефа от 400 до 1000 м. Рельеф региона характеризуется повышенной морфоструктурой расчленённости и представлен совокупностью мелкосопочных понижений, речных долин, сухих русел водооттоков, лощин с проявлениями грунтовых вод, бессточных впадин и озёрных котловин.

Карагандинская область расположена в центральной части Казахстана.

На севере территория граничит с Акмолинской областью и Павлодарской областью, на востоке - с Восточно-Казахстанской областью, на юге - с Алматинской, Жамбылской и Жетысуской областями, на западе - с Улытауской областью, на северо-западе - с Костанайской областью. Общая площадь территории составляет 398,8 тыс. км².

Северная часть региона занята злаково-полынной степью, сформированной на тёмно-каштановых и каштановых почвах, что делает её основным районом неполивного земледелия и освоения целинных земель. В южных районах преобладает разреженная полупустынная и пустынная

попынно-солянковая растительность, характерная для частично засоленных светло-каштановых почв.

Климат Карагандинской области резко континентальный и крайне засушливый. Осень короткая: уже в октябре наблюдаются первые снегопады, а в конце ноября - начале декабря устанавливается продолжительная, зачастую до пяти месяцев, морозная зима. Зима холодная, в отдельные годы - суровая, сопровождающаяся буранами. Средняя температура января составляет $-16...-17^{\circ}\text{C}$; в экстремально холодные зимы она может понижаться до -46°C , при вероятности таких значений не более 5 %. Лето жаркое, засушливое и ветреное, со средними температурами июля $20-21^{\circ}\text{C}$. Максимальные температуры до $+46^{\circ}\text{C}$ отмечаются примерно один раз в десять лет. В феврале максимальная относительная влажность воздуха достигает до 80,9 %, наименьшая - в августе доходит до 47,4 %. Суточная амплитуда колебаний температуры воздуха значительно высока, в некоторые дни она может достичь до $25-30^{\circ}\text{C}$.

Поступление осадков на территории неодинаковы. На северных частях области годовое количество поступление осадков составляет от 250 до 300 мм, на юге - 150-210 мм и 300-400 мм в низкогорных регионах. Преобладающая часть осадков выпадает в тёплый период года - с апреля по октябрь, при этом их распределение по территории и в пределах вегетационного периода остаётся неравномерным.

Снеговой покров - невелик, его максимальная высота достигает 30 см в северных районах и около 12 см на юге, тогда как на большей части территории он составляет примерно 20 см.

Ветровой режим области характеризуется преобладанием северо-восточных ветров в южной части и южных, и юго-восточных - в северной. Средняя скорость ветра составляет 4-6 м/с, максимальная - в отдельные зимние дни достигает 30 м/с. Длительность вегетационного периода в среднем составляет 160-165 дней. Средняя многолетняя сумма активных температур варьирует от 2600 до 2900 $^{\circ}\text{C}$.

Природно-климатические условия и географическое положение Карагандинской области являются благоприятными для возделывания зерновых культур, картофеля и овощей, особенно в северной части, а также для развития животноводства и отраслей, связанных с производством и переработкой сельскохозяйственной продукции.

2.1.2 Почвы зоны и опытного участка

Исследования проводились в 2023-2025 гг. в Карагандинской области, Осакаровском районе, на поле № 1 ТОО «Найдоровское», расположенном в сухостепной зоне Северного Казахстана в 30 км к северо-западу от г. Темиртау. Почва - тёмно-каштановая карбонатная легко глинистая. Почвы опытного участка характеризуются средней мощностью гумусового горизонта (An+B1) в пределах 26-29 см. Средневзвешенное содержание

гумуса в горизонте A_n+B₁ составляет - 2,92%, с глубиной количество его уменьшается. Почва относится к слабогумусированным.

Морфологические характеристики почв под экспериментальным полигоном по заложенному ГосНПЦзем разрезе приведена ниже:

A_n 0-16 см. Тёмно-каштановый, увлажнённый, сложение - уплотнённый, иногда слитизированное, пылеватокомковатый, вскипает бурно с поверхности, легкоглинистый. Переход постепенный по цвету и уплотнению относится к заметный по сложению.

B₁ 16-29 см. Каштаново-бурый, свежий, плотный, комковатый, пятно - карбонатов с глубины 26 см в виде беловатых пятен, легкоглинистый. Переход постепенный.

B₂ 30-55 см. Буровато-палевый, свежий, плотный, комковатый-крупноблочная, карбонатный с многочисленными тонкими прожилками, легкоглинистый. Переход постепенный вниз.

BC 56-80 см. Светло-бурый с отметками гумуса, свежий, плотный, часто слитое, комковатый, карбонаты выраженной конкрецией, легкоглинистый. Переход постепенный.

C 81-150 см. Желто-бурый, свежий, плотный, бесструктурный, карбонатный, крупной конкрецией, тяжелосуглинистый.

Реакция почвенного раствора в верхних слоях почвы относится к слабощелочным с содержанием - pH 7,65-8,04, в нижних горизонтах щелочность почвы увеличивается до pH-8,7. В среднем величина pH почвы опытных полей составил - 7,8.

Таблица 1- Основные агрохимические характеристики почвы

№	pH водной вытяжки	Гумус, %	Содержание, мг/кг		
			легко гидролизуемый азот	подвижный фосфор	обменный калий
1	7,72	2,91	10,2	9,7	821
2	7,65	3,07	14,2	8,9	647
3	8,04	2,78	16,5	11,1	726
Среднее	7,8	2,92	13,63	9,9	731,3

Содержание легко гидролизуемого азота в пахотном слое почвы (0-30 см) за годы исследований составило -13,63 мг/кг. По категориям обеспеченности азотом относится к низкому. По содержанию подвижного фосфора свойственно низкое (9,9мг/кг) содержание, по калию - высокое (731,3 мг/кг почвы) содержание.

Емкость поглощения катионов в гумусовых горизонтах достаточно высокая - 21,2 мг/экв на 100 г почвы, доминируют катионы кальция в количестве - 17,01-18,77 мг/экв на 100 г. Содержание катионов магния составляет в среднем - 4,02-74,87 мг/экв на 100 г.

По механическому составу почва относится к лёгкой глине, а содержание отдельных фракций лишь незначительно различается в генетических горизонтах. Содержание физической глины (частиц не менее 0,001 мм) в пахотном горизонте составляет в среднем 58,77%, что соответствует разновидностям лёгкой глины. Механический состав нижележащих горизонтов почвенного профиля (до 80 см) - лёгкая глина с преобладанием илистой фракции (<0,001 мм) 32,43% в пахотном горизонте.

По результатам агрономических оценок состояние почвы экспериментального участка ТОО «Найдоровское» характеризуется как слабо плодородное, что обусловлено сочетанием нескольких неблагоприятных химических и агрохимических показателей. Почва относится к слабощелочным.

Содержание органического вещества находится на пониженных значениях, что указывает на недостаточный уровень органических веществ. Дефицит органических веществ ухудшает структурно-агрегатное состояние почвы, снижает её влагоёмкость, буферность и биологическую активность. На фоне уменьшения гумуса наблюдается низкое содержание легкогидролизуемого азота, что дополнительно ограничивает азотное питание растений и замедляет процессы почвообразования.

Концентрация подвижного фосфора также на низком уровне, что в условиях щелочной реакции значительно усугубляет его недоступность для растений вследствие перехода в труднорастворимые формы. Это создаёт риск фосфорного голодания даже при наличии его общего содержания в почве. Комплексная характеристика указывает на то, что почва опытного участка имеет пониженное естественное плодородие, обусловленное щелочной реакцией среды, недостатком органического вещества и дефицитом ключевых элементов питания - азота и фосфора.

2.2 Агрометеорологические условия в годы проведения полевых исследований

Метеорологические условия в годы проведения исследований на местах закладки полевого опыта характеризовались (по данным метеостанции - iMetos 3.3. <https://ng.fieldclimate.com/dashboard>) различным сочетанием погодных факторов - температуры и относительной влажности воздуха, количества выпавших атмосферных осадков (таблица 4, рисунок 2).

По механическому составу почва относится к лёгкой глине, а содержание отдельных фракций лишь незначительно различается в генетических горизонтах. Содержание физической глины (частиц не менее 0,001 мм) в пахотном горизонте составляет в среднем 58,77%, что соответствует разновидностям лёгкой глины. Механический состав нижележащих горизонтов почвенного профиля - лёгкая глина с преобладанием илистой фракции (<0,001 мм) 32,43% в пахотном горизонте.

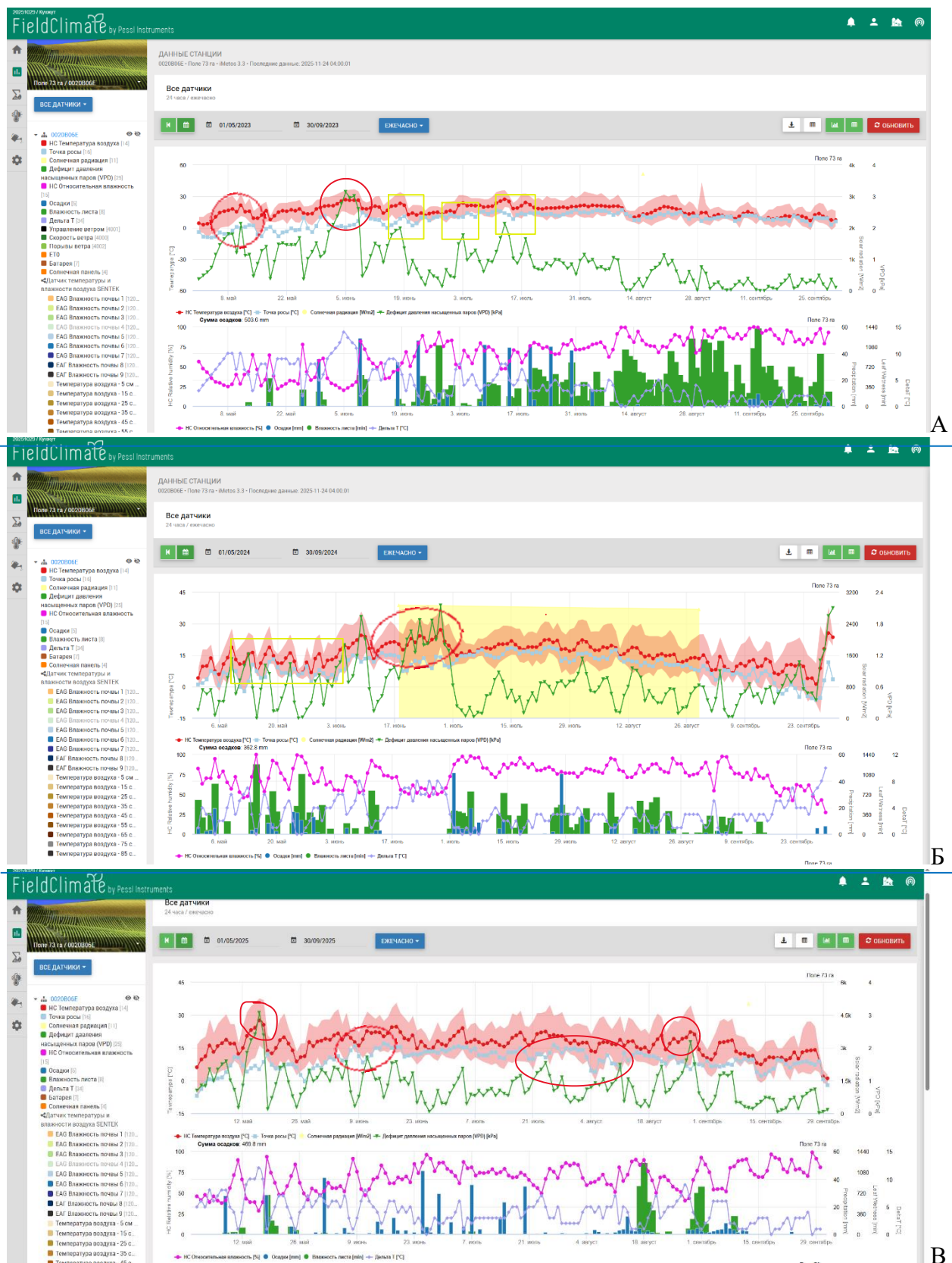


Рисунок 2. Основные климатические показатели за 2023-2025 гг. (по данным метеостанции ТОО «Найдоровское», Осакаровский район, Карагандинской области)

Таблица 2 - Основные агроклиматические показатели на разных стадиях вегетации яровой мягкой пшеницы в ТОО «Найдоровское» за 2023-2025 гг.

Месяцы	Декада	Средняя температура воздуха, С°				Количество осадков, мм				Сумма активных температур, С°			Гидротермический коэффициент			Межфазный период вегетаций
		2023 год	2024 год	2025 год	Средне многолетние	2023 год	2024 год	2025 год	Средне многолетние	2023 год	2024 год	2025 год	2023 год	2024 год	2025 год	
Май	I	9,78	10,71	14,23	9,4	0	7,8	4,2	11	75,9	70,0	126,3	0,00	1,11	0,33	посев- всходы
	II	13,31	13,34	18,95	12,7	4,6	16,6	8,6	12	108,0	125,8	189,5	0,43	1,32	0,45	
	III	15,85	11,18	15,44	15,4	17,2	11	10,6	8	174,4	103,3	161,0	0,99	1,07	0,66	
Июнь	I	22,41	18,70	19,28	16,5	7,8	5,2	8,7	4	224,1	187,0	192,8	0,35	0,28	0,45	всходы – кущение
	II	18,62	18,92	22,22	18,1	11	10,2	11,8	13	186,2	189,2	222,2	0,59	0,54	0,53	
	III	16,15	22,75	16,81	19,7	2,6	5	8,4	24	141,5	227,5	168,1	0,18	0,22	0,50	
Июль	I	20,31	16,70	19,13	20,1	6,4	15,2	15,2	22	203,1	167,0	191,3	0,32	0,91	0,79	кущение – колошение
	II	22,12	19,62	18,27	20,3	4,8	19	20,2	14	221,2	196,2	182,7	0,22	0,97	1,11	
	III	19,33	19,86	20,04	20,9	16	18,8	4,4	6	212,3	199,6	220,4	0,75	0,94	0,20	
Август	I	21,14	18,77	16,45	20,4	3,6	17,4	10,0	10	190,2	187,7	164,5	0,19	0,93	0,61	колошение - восковая спелость
	II	24,26	15,98	16,50	17,7	14,4	19,8	13,2	14	142,2	159,8	165,0	1,01	1,24	0,80	
	III	25,05	13,54	17,98	15,6	37	24,4	8,6	17	165,6	134,1	197,8	2,23	1,82	0,43	
Сентябрь	I	12,03	9,74	23,6	12,6	37,2	33,8	24,2	19	120,3	97,4	132,65	3,09	3,47	1,83	восковая спелость - полная спелость
	II	9,01	16,41	6,2	10,1	68,8	17,3	20,0	11	107,1	111,2	65	6,42	1,56	3,07	
	III	7,1	14,22	2,6	7,2	14,3	9,1	10,0	8	112,1	82,1	88,14	1,28	1,11	1,14	
Всего за вегетационный период		17,1	16,0	17,2	15,8	245,7	230,6	178,1	193,0	2384,2	2237,9	2467,4	1,20	1,17	0,86	

Понижение температуры в период вегетации яровой мягкой пшеницы отмечено 22 июня до $+7,2^{\circ}\text{C}$ в ночное время.

Сумма осадков за период с мая по сентябрь 2023 года составила 245,7 мм (на 52,7 мм больше нормы). Дефицит осадков наблюдался 1-2 декады мая, 1 и 2 декады июня, а также 1-2 декады июля. Обильные осадки выпали со 2 декады августа по 3- декаду сентября, сумма осадков в этот период составила 157,4 мм.

2023 год был по ГТК (1,2) незначительно засушливый. Острая нехватка влаги наблюдалась в начальных периодах развития (ГТК - 0,35), особенно в период кущение – колошение (ГТК -0,18-0,35), и в период налива зерна (ГТК -0,19). Недостаток влаги и повышенные температуры в период налива зерна пшеницы способствовали формированию щуплого зерна. Поступление количества атмосферных осадков в период роста и развития пшеницы было на 23,3 % меньше климатической нормы, что на фоне увеличения среднегодовой среднесуточной температуры воздуха на $2,7^{\circ}\text{C}$ подтверждает засушливость этого года. Большое количество осадков в период спелости яровой пшеницы (с 3 декады августа по 3 декады сентября) отрицательно повлияло на урожайность и качество зерна, обильные и продолжительные осадки привели к прорастанию зерна на корню и просрочили сроки сбора урожая.

Вегетационный период 2024 года отличался обильным выпадением влаги и наличием температуры воздуха в рамках многолетней нормы. Температура воздуха в период вегетации была ниже на $+0,86^{\circ}\text{C}$, по сравнению со среднемноголетней нормой в ТОО Найдоровское. Повышение температуры, по сравнению со среднемноголетними, наблюдалось в период появления всходов и период кущение пшеницы на $+2,2+3,05^{\circ}\text{C}$.

Условия 2024 года отмечаются обильным поступлением влаги. Всего за вегетацию в ТОО «Найдоровское» выпало 221,6 мм, что превышало на 28,6 мм соответственно по сравнению со среднемноголетними данными. Дефицит влаги отмечался с 7 по 28 июня в период кущение яровой мягкой пшеницы, что оказало влияние на густоту стояния посева. В этот период гидротермический коэффициент находился в низкой отметке (от 0,22 до 0,54 ед.). Увлажнение по ГТК в период появления всходов до колошение яровой пшеницы находилось в сухом состоянии. В целом ГТК 2024 года составил в среднем - 1,37 - слабозасушливая.

Обильные дожди (88,0 мм) и пониженная температура воздуха ($9,74^{\circ}\text{C}$ - 1 декада сентября) в период спелости зерна яровой пшеницы способствовали передвижению сроков сбора урожая на более поздние даты.

Метеорологические условия 2025 года характеризовались повышенной температурой воздуха и минимальным количеством осадков по сравнению со среднемноголетними показателями.

Температура воздуха во 2- декаде мая, 1-2 декады июня и 1 декаде сентября была на 6,25; 2,78; 4,12 и $11,0^{\circ}\text{C}$ соответственно, выше

среднемноголетней нормы. В целом за 2025 год средняя температура воздуха превышала среднемноголетнюю норму на +1,4⁰С.

Сумма осадков за вегетационный период яровой мягкой пшеницы составил 178,1 мм (на 14,9 мм ниже нормы). Год характеризовался наименьшим количеством выпавших осадков, в том числе и за время летней вегетации яровой пшеницы. В мае выпало 23,4 мм осадков (ниже нормы на 7,6 мм), за июнь выпало 28,9 мм (ниже нормы на 12,1 мм), в июле выпало в пределах нормы, в августе выпало 31,8 мм (ниже нормы на 9,2 мм) и сентябре выпало 54,2 мм (выше нормы на 16,2 мм). За период вегетации дефицит осадков наблюдался в период посева, в период кушение, в период налива зерна, это оказало отрицательное влияние на урожайность яровой мягкой пшеницы.

ГТК вегетации яровой мягкой пшеницы 2025 г. = 0,86 – средне засушливый. Острая нехватки влаги отмечена в 3-декаду июля с ГТК 0,2 ед., приходилась на период колошение – цветение пшеницы.

В целом за 2025 год повышенная температура воздуха и низкое увлажнение почвы создали относительно неблагоприятные условия для возделывания яровой мягкой пшеницы.

По общей характеристике вегетационных периодов яровой мягкой пшеницы в условиях ТОО «Найдоровское» периоды проведения исследований в 2023 и 2025 годы были слабозасушливыми, неблагоприятными для роста и развития растений пшеницы.

2.3 Объекты исследований

Объектами исследования являлись 11 сортов яровой мягкой пшеницы из средней группы спелости и комплексное стимулирующее средство, предназначенное для повышения всхожести семян, засухоустойчивости и продуктивности растений (таблица 3).

Все сорта яровой мягкой пшеницы среднеспелой группы рекомендованы к использованию в Республике Казахстан [141].

Ламис. Сорт создан методом индивидуального отбора из пятого поколения гибридной комбинации (Лютесценс 181 × Иртышанка 10). Оригинатор - ТОО «Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция». Относится к разновидности лютесценс. Растения формируют полупрямостоячий куст. Антоциановая окраска ушек флагового листа отсутствует либо выражена крайне слабо. Колос веретеновидной формы, рыхлый, содержит 15-20 колосков; на верхушке заметны остевидные отростки. Плечо нижней колосковой чешуи широкое, приподнятой формы; зубец нижней колосковой чешуи короткий, прямой; зубец наружной цветковой чешуи слегка изогнут. Зерновка красная, средняя, полуудлиненная. Высота растений около 75 см. Урожайность варьирует в пределах 24,6-46,3 ц/га. Масса 1000 зерен - 31,2-41,8 г. Содержание белка - 11,8-12,8 %, сырой клейковины - 27–28,7 %. Хлебопекарная оценка - 3,2 балла.

Таблица 3 - Сорты яровой мягкой пшеницы

Сорт	Оригинатор	Страна происхождения	Разновидность
Ламис	Карабалыкская СХОС	Казахстан	Лютесценс
Ликамеро	Secobra Recherches	Франция	Лютесценс
Гранни	Saatbau Linz eGen	Австрия	Эритроспермум
Акмола 2	НПЦ ЗХ им.А.И.Бараева	Казахстан	Лютесценс
Карабалыкская 90	Карабалыкская СХОС	Казахстан	Лютесценс
Асыл Сапа	НПЦ ЗХ им.А.И.Бараева	Казахстан	Лютесценс
Фантазия	Карабалыкская СХОС	Казахстан	Лютесценс
Шортандинская 2014	НПЦ ЗХ им.А.И.Бараева	Казахстан	Лютесценс
Айна	Карабалыкская СХОС	Казахстан	Лютесценс
Таймас	НПЦ ЗХ им.А.И.Бараева	Казахстан	Эритроспермум
Целина 50	НПЦ ЗХ им.А.И.Бараева	Казахстан	Лютесценс

Фантазия. Получен в ТОО «Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция» от скрещивания Лютесценс 18 × Диас 2. Разновидность - лютесценс. Сорт относится к среднеспелой группе. Куст прямостоячий, колос слабо веретеновидный, средних размеров. Зерновка красная, полуудлиненная, средняя по крупности. Урожайность - 18,9–55,2 ц/га. Масса 1000 зерен - 34,7 г. Белок - 13,4 %, сырой клейковины - 32,4 %. Объём хлеба - около 1000 мл; хлебопекарная оценка - хорошая. Устойчивость к полеганию, к осыпанию и к засухе - высокая. Рекомендован для возделывания в Костанайской и Северо-Казахстанской областях.

Айна. Создан методом скрещивания и последующего индивидуально-семейственного отбора из гибридной комбинации TSELINNAYA YUBILIENAYA/2xPASTOR/3BABAX/LR43//BABAX в ТОО «Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция».

Разновидность - лютесценс. Куст полупрямостоячий, окраска ушек флаг-листа отсутствует либо очень слабая. Колос веретеновидный, рыхлый, с 15-20 колосками и остевидными отростками на верхушке. Плечо нижней колосковой чешуи средней ширины, формы - прямое. Зерновка полуудлиненная. Высота растений 81-110 см. Урожайность варьирует от 13,0 до 51,9 ц/га. Масса 1000 зерен - 36,5-39,8 г. Содержание белка - 13,8 %, сырой клейковины - 28-34,4 %. Хлебопекарная оценка - 4 балла.

Рекомендован для выращивания в Акмолинской, Костанайской и Северо-Казахстанской областях.

Карабалыкская 90. Создан селекционерами ТОО «Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция» методом гибридизации сортов Лютесценс 5714 × Целинная 21.

Сорт среднеспелый, продолжительность вегетации - 82-89 дней. Разновидность - лютесценс. Колос слабо веретеновидный, белый, средней длины и плотности. Колосковая чешуя удлинённо-овальная, со слабой

нервацией, зубец короткий, прямой; плечо варьирует от скошенного до приподнятого; киль выражен сильно. Зерновка красная.

Средняя урожайность - 22,9 ц/га. По качеству зерна сорт относится к группе сильных пшениц; устойчив к засухе и пыльной головне. Рекомендован для возделывания в Акмолинской, Карагандинской, Костанайской, Павлодарской и Северо-Казахстанской областях.

Целина 50. Вегетационный период 90-95 дней; наблюдается замедленное развитие фазы «прорастания – колоса» (50-53 дня) и ускоренное созревание (40-42 дня). Сорт относится к разновидности лютесценс.

Зерно светло-красное, среднего размера, яйцевидной формы. Листья в фазе кущения зелёные, с флаговым листом со слабым восковым налётом снизу. Куст прямостоячий. Средняя урожайность за 3 года – 24,4 кг/га. Масса 1000 зерен – 32-34 г, натуральная масса – 802 г/л. Содержание сырой клейковины – 29,6%. Хлебопекарные качества высокие, класс относится к ценной пшенице. Рекомендуются для выращивания в Акмолинской и Карагандинской областях.

Акмола 2. Создан методом простого парного скрещивания (линия Лютесценс М-808 × Целинная 60) с последующим индивидуальным отбором и трансформацией озимых форм в яровые. Оригинатор - ТОО «НПЦ зернового хозяйства им. А.И.Бараева».

Сорт среднеспелый, вегетационный период 83-88 дней. Вид – лютесценс. На наружных чешуйках цветка образуются колючие образования длиной от 0,5 мм в средней части колоса до 10 мм в верхней части. Максимальная урожайность – 37,5 ц/га. Масса 1000 зёрен – 33-41 г. Содержание белка – 15,4-17,0%, сырой глютен – 28,0-33,2%. Качество зерна высокое, сорт включён в список крепких сортов. Устойчив к полеганию и обеспечивает стабильное формирование крепкого зерна. Рекомендуются для выращивания в Акмолинской и Северо-Казахстанской областях.

Асыл сапа. Выведен в ТОО «НПЦ зернового хозяйства им. А.И.Бараева». Разновидность - лютесценс. Среднеспелый сорт. Урожайность - 16,9-43,2 ц/га. Масса 1000 зерен - 40,4 г. Белок - 15,1 %, сырой клейковины - 25,8 %. Объём хлеба достигает 1100 мл; хлебопекарная оценка высокая. Сорт устойчив к полеганию, осыпанию и засухе. Рекомендован для возделывания в Акмолинской и Северо-Казахстанской областях.

Таймас. Создан методом гибридизации (Дуэт × Лютесценс 101/94-1) с последующим индивидуальным отбором из пятого поколения в ТОО «НПЦЗХ им. А.И. Бараева». Сорт - Эритроспермум. Колос белый, колючий, неочищенный, пирамидальной формы, длиной 7-9 см, рыхлый (15-20 сегментов на 10 см стебля). Чешуйки колосков овально-ланцетные, неочищенные, плечо приподнятое, узкое; зубец прямой, длинный; киль узкий. Зерно красное, среднего размера, овальной формы. Высота растений 70-90 см. Урожайность 17,9-32,6 кг/га. Масса 1000 зёрен 51,1 г. Содержание белка 15,2%, сырой клейковины 33,6%. Сорт устойчив к полеганию, осыпанию и

отличается высокой засухоустойчивостью. Рекомендуется для выращивания в Акмолинской области.

Шортандинская 2014. Получен от скрещивания Ишимская 92 × Омская 28 в ТОО «НПЦЗХ им. А.И. Бараева». Разновидность - лютесценс. Колос белый, заострённый, неочищенный, пирамидальный, средней длины и рыхлый по структуре. Зерно красное, овальное, среднего размера. Урожайность: в Акмолинской области - 20,9-40,3 кг/га, максимальная урожайность в Костанайской области - 54,3 кг/га. Масса 1000 зёрен - 32 г. Белок - 12,6%, клейковина - 29,4%. Высокая устойчивость к полеганию и осыпанию; высокая засухоустойчивость. Рекомендуется для выращивания в Акмолинской, Костанайской и Северо-Казахстанской областях.

Ликамеро. Сорт создан во Франции селекционерами SECOBRA Recherches методом скрещивания (Hanno x Devon) x (STRU689 x Quattro). Относится к разновидности лютесценс. Куст полупрямостоячий, растение среднего размера. Солома среднего размера. Восковое покрытие на колосе слабое или среднее. Колос пирамидальный, белый, средней плотности; на верхушке имеются короткие или средние колючие выступы. Плечо приподнятое, средней ширины; зубец слегка изогнутый, короткий. Средняя урожайность составляет 37,3 ц/га, максимальная - 83,4 ц/га. Сорт отличается высокой устойчивостью к болезням и климатическим стрессам. Масса 1000 зёрен составляет 33-40 г. Пшеница - ценный хлебопекарный сорт.

Гранни. Получен методом педигри из гибридной комбинации U23 × U513 селекционерами компании SAATBAU Linz e Gen (Австрия). Разновидность - Эритроспермум. Куст прямостоячий или полупрямостоячий. Растение низкое или средневысокое, солома слабая или средней высоты. Восковое покрытие на верхнем междоузлии и влагалище флагового листа толстое или очень толстое. Колос веретеновидный, рыхлый или среднеплотный, белый. Плечо прямое или приподнятое, средней ширины; верхушка прямая или слегка изогнутая, короткая или средней длины. Урожайность сильно варьирует - 8,8-54,2 кг/га. Масса 1000 зёрен составляет 31,8 г. Содержание белка 15,6%, сырой глютен 32,5%. Сорт отличается высокой засухоустойчивостью, устойчивостью к полеганию и осыпанию. Рекомендуется для выращивания в Костанайской, Восточно-Казахстанской, Абайской, Акмолинской и Павлодарской областях.

Одним из основных объектов исследований, по сути, была разработка комплексного стимулятора, предназначенного для повышения всхожести семян, засухоустойчивости растений и увеличения урожайности яровой мягкой пшеницы. Комплексный продукт содержит хелатированные микроэлементы (цинк - 0,5%, марганец - 0,5%, медь - 0,25%, железо - 0,5% и кремний - 0,75%), полисахарид (альгинат натрия - 0,5%) и фитогормон 24-эпибрассинолид - 0,0025%.

2.4 Схемы опытов и методика исследований

Решение поставленной цели и задач диссертационной работы осуществлялось путём закладки двух лабораторных опытов и одного полевого эксперимента.

Лабораторный опыт 1. Подбор засухоустойчивых сортов яровой мягкой пшеницы на основе генотипирования. Для проведения генотипирования сортов яровой мягкой пшеницы были разработаны маркеры к генам TaDrl1, TaDREB1, TaLTP, TaPARG-2A, COMT3B. Разработку маркеров проводили на основе аннотированных SNP (однонуклеотидный полиморфизм) к вышеуказанным генам. Скрининг на засухоустойчивость проводился на 11 сортах яровой мягкой пшеницы по 5 целевым генам.

Лабораторный опыт 2. Влияние комплексного стимулирующего средства на посевные качества семян яровой мягкой пшеницы в различных условиях прорастания. (таблица 4).

Таблица 4 - Схема лабораторного опыта по определению влияний комплексных стимулирующих средств на посевные качества семян

Фактор А (Сорт)	Фактор В (Обработка семян комплексным стимулирующим средством)	Фактор С (Условия прорастания)
Таймас	Контроль (без обработки)	Естественные
		Стресс
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75)	Естественные
		Стресс
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025)	Естественные
		Стресс
	Zn (0,75) + Mn - (0,75) + Cu (0,5) + Fe (0,75) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025) + C ₁₂ H ₁₀ O ₂ (0,025)	Естественные
		Стресс
Гранни	Контроль (без обработки)	Естественные
		Стресс
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75)	Естественные
		Стресс
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025)	Естественные
		Стресс
	Zn (0,75) + Mn - (0,75) + Cu (0,5) + Fe (0,75) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025) + C ₁₂ H ₁₀ O ₂ (0,025)	Естественные
		Стресс
Примечание: цинк (Zn); марганец (Mn); Медь (Cu), Железо (Fe); Кремний (Si); альгината натрия (C ₆ H ₇ O ₆ Na _n); 24-эпибрасинолид (C ₂₈ H ₄₈ O ₆); α-Нафталинуксусная кислота (C ₁₂ H ₁₀ O ₂).		

Опыт проведён в лаборатории семеноведения Казахского агротехнического исследовательского университета им. С.Сейфуллина. Варианты опыта были размещены в 4-х кратной повторности.

Семена сортов яровой мягкой пшеницы проращивали в естественных (контроль-дистиллированная вода) и в имитационных условиях засухи. Условия засухи созданы по методике Michel В.Е. и Kaufmann M.R. [142]. 10 %-ный раствор ПЭГ-6000 приготовлен в тёплой дистиллированной воде. Сначала 100 г ПЭГ-6000 растворили в 500 мл тёплой воды. После полного растворения объём раствора довели до 1000 мл.

Сосуды, предназначенные для проращивания семян в рулонах, предварительно обрабатывали горячей водой с добавлением 1%-ного раствора перманганата калия, после чего ополаскивали проточной водой.

Перед проращиванием семена обрабатывали предварительно приготовленным раствором согласно вариантам опыта в течение 6 часов и просушивали до стандартной влажности до 14%.

Полевой опыт 1. Разработка адаптивных приёмов повышения продуктивности и засухоустойчивости яровой мягкой пшеницы.

Трёхфакторный полевой опыт был заложен по общепринятой в агрономии методикой на площади 21,3 га (таблица 5).

Таблица 5 - Факторы исследования в условия полевого опыта

Фактор А (сорта пшеницы)	A ₀ – сорт Таймас; A ₁ - сорт Грании.
Фактор В (обработка комплексным средством)	В ₀ - контроль без обработки; В ₁ - обработка семян комплексным средством; В ₂ - обработка комплексным средством семян и посевов.
Фактор С (обработка почвы)	С ₀ - контроль без обработки; С ₁ - прикатывание почвы после посева; С ₂ - прикатывание почвы после посева+ боронование почвы в период кушения.

Варианты опыта размещались рендомизированным расщепленным способом с последовательным расположением повторности (рисунок 3). Посевная площадь делянки - 2304 м² (48м x 48м), учётная - 72 м² (8м x 9м). Повторность вариантов в полевых опытах трёхкратная.

Закладку полевых опытов проводили согласно методике Ещенко В.Е. и др. [143].

При проведении эксперимента использованы как общепринятые, так и современные методики научных исследований, в том числе:

1. Для молекулярно-генетического скрининга ДНК выделена из генотипов пшеницы, пророщенных в чашках Петри модифицированным методом СТАВ [144].

404										
48	48	48	48	4	16	48	48	48	48	
48	1 $A_0B_0C_0$	4 $A_0B_1C_0$	7 $A_0B_2C_0$			28 $A_1B_0C_0$	31 $A_1B_1C_0$	34 $A_1B_2C_0$		
48	2 $A_0B_0C_1$	5 $A_0B_1C_1$	8 $A_0B_2C_1$			29 $A_1B_0C_1$	32 $A_1B_1C_1$	35 $A_1B_2C_1$		1 пов
48	3 $A_0B_0C_2$	6 $A_0B_1C_2$	9 $A_0B_2C_2$			30 $A_1B_0C_2$	33 $A_1B_1C_2$	36 $A_1B_2C_2$		
24										
48	10 $A_0B_1C_0$	13 $A_0B_2C_0$	16 $A_0B_0C_0$			37 $A_1B_1C_0$	40 $A_1B_2C_0$	43 $A_1B_0C_0$		
48	11 $A_0B_1C_1$	14 $A_0B_2C_1$	17 $A_0B_0C_1$			38 $A_1B_1C_1$	41 $A_1B_2C_1$	44 $A_1B_0C_1$		2 пов
48	12 $A_0B_1C_2$	15 $A_0B_2C_2$	18 $A_0B_0C_2$			39 $A_1B_1C_2$	42 $A_1B_2C_2$	45 $A_1B_0C_2$		
24										
48	19 $A_0B_2C_0$	22 $A_0B_0C_0$	25 $A_0B_1C_0$			46 $A_1B_2C_0$	49 $A_1B_0C_0$	52 $A_1B_1C_0$		
48	20 $A_0B_2C_1$	23 $A_0B_0C_1$	26 $A_0B_1C_1$			47 $A_1B_2C_1$	50 $A_1B_0C_1$	53 $A_1B_1C_1$		3 пов
48	21 $A_0B_2C_2$	24 $A_0B_0C_2$	27 $A_0B_1C_2$			48 $A_1B_2C_2$	51 $A_1B_0C_2$	54 $A_1B_1C_2$		
48										

Рисунок 3. Схема размещения вариантов опыта

2. Генотипирование образцов пшеницы методом SNP - анализа (Single Nucleotide Polymorphism). Генотипирование образцов пшеницы осуществляли с использованием SNP-маркеров типа Amplifluor согласно методике ASQ (аллель-специфическая количественная ПЦР) [145], с применением праймерных систем, специфичных к целевым генам, ассоциированным с признаками засухоустойчивости. Амплификацию и детекцию флуоресцентного сигнала регистрировали в режиме количественной ПЦР (qPCR) [146].

Реакционная смесь для проведения ПЦР формировалась на основе Master Mix, включающего буфер для ПЦР, $MgCl_2$ в концентрации 2,5 мМ, дезоксинуклеозидтрифосфаты (dNTP) в концентрации 2 мМ, а также по 2,5

мкМ каждой флуоресцентно-меченой универсальной пробы. В состав смеси дополнительно вводили два прямых праймера (по 1,5 мкМ каждый) и общий обратный праймер в концентрации 7,8 мкМ. В качестве фермента использовали ДНК-полимеразу в количестве 0,5 ЕД на реакцию. Для нормализации флуоресцентного сигнала в реакционную смесь добавляли 3 мкл пассивного красителя ROX (Thermo Fisher Scientific, США).

Дизайн праймеров осуществляли с использованием современных биоинформатических инструментов, включая Primer-BLAST (NCBI), UGENE и программу OligoCalc (олигонуклеотидный калькулятор). На этапе проектирования учитывали параметры специфичности, температуры плавления, ПС-состава, а также возможность образования вторичных структур и димеров праймеров. Разработка праймерных систем проводилась на основе аннотированных однонуклеотидных полиморфизмов (SNP), ассоциированных с изучаемыми признаками. Полученные праймеры были дополнительно модифицированы в соответствии с требованиями технологии Amplifluor, включая введение универсальных хвостовых последовательностей, обеспечивающих возможность флуоресцентной детекции аллель-специфической амплификации.

Оптимизацию условий генотипирования проводили путём варьирования состава реакционной смеси и параметров температурного профиля амплификации. В ходе экспериментов установлено, что повышение концентрации $MgCl_2$ до 3,5 мМ обеспечивает оптимальные условия для аллель-специфической амплификации и способствует более чёткому разделению аллелей. Данная концентрация была использована при проведении последующих реакций. Амплификацию выполняли по модифицированному протоколу количественной ПЦР. Реакционный профиль включал начальную денатурацию при 95°C в течение 5 минут, далее 20 циклов, состоящих из следующих стадий: денатурация при 95°C в течение 10 секунд, отжиг при 52°C в течение 2 минут, денатурация при 94°C в течение 15 секунд и отжиг при 50°C в течение 2 минут. Завершающую стадию проводили при 62°C в течение 5 минут.

3. Гены, ассоциированные с засухоустойчивостью, и их использование в молекулярно-генетических исследованиях яровой мягкой пшеницы. В качестве генов-кандидатов для молекулярно-генетического анализа засухоустойчивости сортов яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) были отобраны гены, вовлечённые в регуляцию ответных реакций растений на абиотические стрессовые факторы.

Ген COMT-3Ba (caffeic acid 3-O-methyltransferase) ассоциирован с повышенным содержанием лигнина в условиях водного дефицита. Кодированный фермент участвует в процессах метилирования различных субстратов, а также в биосинтезе лигнина и мелатонина, что обуславливает его важную роль в формировании устойчивости растений к абиотическим стрессам [147].

Ген TaDr1 (Down-regulator) функционирует как репрессор транскрипции и участвует в регуляции экспрессии других генов. Он способен снизить синтез и активность белков, продукция которых становится избыточной или нежелательной в определённых физиологических условиях, тем самым обеспечивая адаптивную реакцию растений [149].

Гены семейства DREB (Dehydration-responsive element binding) регулируют экспрессию широкого спектра функциональных генов, связанных с ответом на засуху, засоление и низкие температуры. Благодаря участию в регуляции осмотического и температурного стресса данные гены рассматриваются как перспективные кандидаты для повышения засухоустойчивости пшеницы [150].

Ген TaLTP (Lipid transfer protein) кодирует низкомолекулярный белок-переносчик липидов, обеспечивающий транспорт липидных молекул между клеточными мембранами. Установлено его участие в формировании защитных реакций растений при воздействии абиотических стрессов [151].

Ген TaPARG (plant architecture-related gene) относится к семейству транскрипционных факторов AP2/EREBP и играет важную роль в регуляции признаков, связанных с архитектурой растений и формированием урожайности, особенно в условиях засухи [152,153].

Таким образом, перечисленные гены вовлечены в комплексные механизмы адаптации растений к абиотическим стрессам и оказывают сильное воздействие на формирование устойчивости к засухе яровой мягкой пшеницы. На основе аннотированных однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в указанных генах были разработаны молекулярные маркеры. Генотипирование проводили с использованием SNP-маркеров типа Amplifluor, принцип действия которых основан на аллель-специфической полимеразной цепной реакции.

4. Разработка дизайна праймеров проведен с использованием биоинформатических программ Primer Blast, Unipro UGENE и Oligocalc (олигокалькулятора). Генотипирование проводили на ПЦР амплификаторе QuantStudio 7 FlexReal-Time с использованием разработанных маркеров.

Формирование панели SNP Amplifluor-маркеров осуществляли для проведения комплексной молекулярно-генетической оценки засухоустойчивости генотипов мягкой пшеницы. Принцип действия SNP Amplifluor - маркеров основан на аллель-специфической полимеразной цепной реакции, обеспечивающей высокую точность дискриминации генетических вариантов, различающихся по одному нуклеотиду. Данный метод сочетает высокую чувствительность и специфичность, что делает его эффективным инструментом для выявления SNO-полиморфизмов.

Ключевую роль в реализации технологии играют аллель-специфичные праймеры и флуоресцентные зонды, комплементарные целевым SNP. В процессе амплификации происходит накопление флуоресцентного сигнала, что позволяет в реальном времени регистрировать наличие определённых

аллелей и проводить точную идентификацию генотипов исследуемых образцов.

Для генотипирования была сформирована панель маркеров, включающая гены TaDr1, DREB, TaLTP, TaPARG и COMT ранее охарактеризованные как функционально значимые в формировании адаптивных реакций растений на абиотические стрессы, включая водный дефицит. Использование данных генов позволило охватить ключевые механизмы засухоустойчивости, такие как регуляция экспрессии, метаболизм, фотосинтетическая активность и структурная устойчивость клеточных стенок.

Последовательности разработанных праймеров, используемых для SNP-генотипирования, представлены в таблице 6.

Сформированная панель SNP Amplifluor - маркеров и соответствующие праймерные системы обеспечивают высокоточное и воспроизводимое генотипирование, позволяющее эффективно оценивать генетический потенциал засухоустойчивости у сортов мягкой пшеницы.

Таблица 6 – Последовательность праймеров для генотипирования на засухоустойчивость

№	Название праймера	Последовательность олигонуклеотидов	ссылка
1	COMT3B_F1	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTGTGCTCGTGGAGTGCATCCTGCCT	[147]
2	COMT3B_F2	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTGTGCTCGTGGAGTGCATCCTGCCG	
3	COMT3B_R	CCTTAGGCGTCGCCTCCGGGTTC	
4	KATU-W62-SNP2-F5S	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTAGTGGTGTCTCCTTCTAATTT	[149]
5	KATU-W62-SNP2-F5D	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTAGTGGTGTCTCCTTCTAATTA	
6	KATU-W62-SNP2-R	TCATAGGGCGAGTGTGCATA	
7	KATU-X1-F1	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTTGTGATATGGATTGCCTTGATGAA	[150]
8	KATU-X1-F2	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTTGTGATATGGATTGCCTTGATGAC	
9	KATU-X1-R	GATGGTTTCAGCAACCGAATC	
10	TaLTPs-F1	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTGGAGAAAAGATAAGCAATCGCGGC	[151]
11	TaLTPs-F2	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTGGAGAAAAGATAAGCAATCGCGGC	
12	TaLTPs-R	GGTCCTAGATGCACTTACAGTTTGAC	
13	TaPARG-2A-F1	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTGTGACAAGATCATGGCCAGCAAC	[152]
14	TaPARG-2A-F2	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTGTGACAAGATCATGGCCAGCAAC	
15	TaPARG-2A-R	CTTGTTGCGCCTGGCGAGC	

Разработка праймерных систем проводилась на основе аннотированных SNP, локализованных в кодирующих и регуляторных участках генов. Для гена TaLTP праймеры были спроектированы с учётом SNP G/A, расположенного в промоторной области на позиции 207 п.н., что имеет потенциальное влияние на уровень экспрессии гена. На основе данного полиморфизма разработаны аллель-специфичные праймеры TaLTPs-F1, TaLTPs-F2 и общий обратный праймер TaLTPs-R.

Для гена TaPARG-2A праймерные пары создавались с учётом SNP C/T во втором экзоне, приводящего к аминокислотной замене (His/Tyr), что может влиять на функциональные свойства белка и адаптационные процессы растения.

Ген COMT, расположенный на хромосомах 3A, 3B и 3D, представлен аллельными вариантами TaCOMT-3Ba и TaCOMT-3Bb, различающимися SNP T/G и наличием вставки/делеции (InDel) длиной 222 п.н. в 3'-нетранслируемой области. Установлено, что аллель TaCOMT-3Ba ассоциирован с повышенным содержанием лигнина, что способствует укреплению клеточных стенок и повышению устойчивости растений к водному стрессу.

5. Отбор проб и определение силы роста. Отбор проб семян проведён по ГОСТу 12036-85 [154]. Определение силы роста согласно ГОСТу 12040-66 [155].

6. Метод определение всхожести. Определение всхожести проводили рулонным методом согласно международной требований «The Interstate Standard. 12038-84». [156].

Проращивания семян яровой пшеницы проведены при температуре 20oC (±2oC) в термостате ТС-200 (СПУ мод.1004). На 7 день определяли процент всхожих семян, длину, массу и площадь побегов, количество, длину, массу корешков и угол появления всходов.

Площадь проростков рассчитали с помощью портативного лазерного измерителя площади листьев CL-203 (США).

7. Индекс жизнеспособности проростков (SVI), соотношение корней и проростков определены по методике Hellal F.A. и др. [157].

$$SVI = ((\text{длина побега} + \text{длина корешка}) \times \text{всхожесть}) / 100 \quad (1);$$

8. Определение индекс всхожести. На основе количеств проросших семян и длины корней был рассчитан индекс всхожести (GI%) с использованием формулы Barbero et al. [158]:

$$GI\% = (Gs \times Ls) / (Gc \times lc) \times 100 \quad (2);$$

где;

Gs - количество проросших семян, обработанных комплексным стимулирующим средством;

Ls - длина корешка, обработанных комплексным стимулирующим средством;

Gc - количество проросших семян в контрольном варианте;

lc - длина корешка в контрольном варианте.

9. Фитотоксичность (Р.Р.) комплексного стимулирующего средства на всходы пшеницы был рассчитан по формуле Chou С.Н. и Lin Н.Н. [159].

$$PP = \frac{(\text{длина корешка в контроле} - \text{длина корешка в опыте} \times 100)}{\text{длина корешка в контроле}} \quad (3)$$

10. Фенологические наблюдения за развитием яровой мягкой пшеницы по основным фазам развития и полной спелости зерна, густота стояния растений и высоту растений по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур, 2002 г. [160]; Наблюдения за ростом и развитием растений проводили на учётных площадках.

11. Оценка сортов на устойчивость к абиотическим средам по формуле Р.А.Фишера и Р. Маурера [161]:

А. Индекс стрессоустойчивости;

$$STI = (Y_p * Y_s) / \bar{Y}_p^2 \quad (4)$$

Б. Толерантность;

$$TOL = Y_p - Y_s \quad (5)$$

В. Средняя геометрическая производительность

$$GMP = \sqrt{(Y_p * Y_s)} \quad (6)$$

Д. Показатель стабильности урожайности;

$$YSI = Y_s / Y_p \quad (7)$$

И. Индекс засухоустойчивости;

$$DI = Y_s \times (Y_s / Y_p) / \bar{Y}_s \quad (8)$$

К. Индекс абиотической толерантности;

$$ATI = [(Y_p - Y_s) / (\bar{Y}_p - \bar{Y}_s)] \times [\sqrt{Y_p * Y_s}] \quad (9)$$

М. Индекс восприимчивости к стрессу;

$$SSI = (1 - (Y_s / Y_p)) / STI \quad (10)$$

где,
 Y – урожайность сорта в условиях стресса;
 Y_p – урожайность сорта без стресса;
 X – средняя урожайность по всем сортам при стрессе;
 X_p – средняя урожайность по всем сортам без стресса.
 Засухоустойчивыми образцами являются сорта, индекс засухоустойчивости которых составляет $<0,9$.

12. Гидротермический коэффициент (ГТК) определяли по методике Г.Т. Селянинова [162]

$$ГТК = (\sum r \times 10) / \sum t \dots\dots\dots(11)$$

где, $\sum r$ – сумма осадков за вегетационный период;
 $\sum t$ – сумма температур за тот же период выше 10°C .

13. Определение площади листьев проводился портативным лазерным измерителем площади листьев Cl-203;

14. Индекс площади листьев (LAI) был рассчитан по формуле [163];

$$LAI = L / 10000 \dots\dots\dots(12)$$

где, L - листовая поверхность, тыс.м²/га;
 10000 - площадь 1 гектара, м².

15. Фотосинтетический потенциал посевов (ФП) рассчитан по формуле;

$$ФП = L \times T \dots\dots\dots(13)$$

где, ФП – фотосинтетический потенциал, тыс. м² сут./га
 L - листовая поверхность, тыс.м²/га;
 T – продолжительность периода работы листьев, сут.

16. Чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) рассчитан по формуле А.А. Ничипоровича [164];

$$ЧПФ = (B_2 - B_1) / (L_1 + L_2) / 2 \times T \dots\dots\dots(14)$$

где, ЧПФ - чистая продуктивность фотосинтеза, г/м².
 B_1 - масса урожая при предыдущем определении, г/м²;
 B_2 - масса урожая при последующем определении, г/м²;
 L_1, L_2 - площадь листьев в те же сроки, м²;
 T - продолжительность периода, сут.

17. Учёт урожая производился методом скашивания и обмолота учётной делянки и пересчётом урожайных данных на стандартную 14% влажность и 100% чистоту зерна по методике ГСИ [165].

18. Качества зерна яровой мягкой пшеницы определялось на ИК - анализаторе FT-NIR спектрометр NIRFlex N-500 (BUCHI, Швейцария) в лаборатории качества растениеводческой продукции ГОП «Растениеводства», в том числе, натура зерна, содержание протеина, клейковины, ИДК.

19. На основе эмперических и статических методов проводили калибровку и валидацию модели сортов яровой мягкой пшеницы на программе STICS -24. Оценка качества моделирования определены по основным показателям продуктивности.

20. Экономическая эффективность - рассчитывали согласно методическим рекомендациям по определению эффективности сельскохозяйственного производства и на основе производственных затрат по технологическим картам [166].

Для экономической оценки изучаемых приёмов проводили анализ материальных затрат, которые рассчитывали по технологическим картам на основе типовых норм выработки и расценок из расчёта на 100 га. Стоимость зерна определялась по установленной цене АО «НК «Продкорпорация» на урожай зерновых культур 2023-2025 г.г по программе форвардного закупа [167].

Сбор и учёт метеорологических показателей производился по метеостанции iMetos 3.3 (2021), а агрофизические показатели почвы по полевым датчикам в реальном режиме. Результаты эксперимента проанализированы с применением статистических методов, в том числе, дисперсионный анализ (ANOVA) и корреляционный анализ по методике Б.А.Доспехова [168].

2.5 Агротехника на опытных делянках

На опытном участке применялась агротехника возделывания яровой мягкой пшеницы общепринятая для Карагандинской области. Полевой опыт закладывали по паровому предшественнику (таблица 7).

Технология подготовки пара.

Химическая обработка пара проведена с целью уничтожения сорной растительности в стадии проростков. Гербицидная обработка проведена с глифосат содержащим гербицидом Смерч 540, В.Р (Действующие вещества – глифосат - 540 г/л. Норма расхода - 2,0 л/га) и Эстерон 600 (Действующие вещества - 2,4-Д кислота, сложный 2-этилгексил эфира 600 г/л, Норма расхода препарата - 0,4 л/га). Химическая обработка парового поля проводилась прицепным опрыскивателем «LEMKEN ALBATROS» с шириной захвата 25 м с рабочей жидкостью 200 л/га в стадии проростков сорняков.

Механическая обработка парового поля проведена в фазе отрастания многолетних сорняков и в фазе проростков однолетних сорняков.

Таблица 7 - Агротехника полевого опыта

№	Наименование работы (операции)	Агротехнические требования	Состав агрегата	
			Марка трактора, комбайна	Марка СХМ
Технология подготовки пара				
1	Химическая обработка	Баковая смесь гербицидами Смерч 540, В.Р. Норма расхода -2, л/га) + Эстерон. Норма расхода – 0,4л/га.	Трактор Беларусь 953	LEMKENAL BATROS
2	Культивация	Глубина обработки 8-10 см в фазе отрастание сорняков многолетних и в фазе проростков однолетних сорняков.	John Deere 9420R	John Deere 710
3	Глубокая плоскорезная обработка	Глубина обработки 23-25 см.	John Deere 9420R	КПП-7
4	Внесение удобрений	Аммофос (P ₂ O ₅ -46%, N-10%) -179 кг/га, на глубину 14-16 см	John Deere 9420R	Посевной комплекс John Deere 1830
5	Химическая обработка	Баковая смесь гербицидами Смерч 540, В.Р. Норма расхода -2,5 л/га) + Эстерон. Норма расхода -0,3 л/га.	Трактор Беларусь 953	LEMKENAL BATROS
Подготовка семян к посеву и посев				
6	Обработка семян	Комплексный стимулирующий препарат с нормой 0,2 л/т		ПС-10
7	Посев	Норма высева 3,0 млн. всхожих семян/га, глубина высева 5-7 см	Challenger 865	Сеялка VADERSTAD
Уход за посевами				
8	Прикатывание	Без огреха	Трактор Беларусь 953	ККЗ-12,4
9	Гербицидная обработка	Эффект, КЭ. с нормой расхода 0,8 л/га + Пегас 13,5%, КЭ. с нормой 0,45 л/га. Рабочая жидкость 150 л/га. 1	Трактор Беларусь 953	Титан
10	Листовая подкормка комплексным средством	Комплексный стимулирующий препарат с нормой 0,5 л/га с рабочей жидкостью 150 л/га.	Трактор Беларусь 953	Титан
11	Боронование	Борона-мотыга по направлению посева с глубиной обработки 3-4 см. В период кущения пшеницы	Трактор Беларусь 953	БМТ-6
12	Химическая обработка	В период колошение с нормой расхода Прозаро - 0,6 л/га + Конфидор Экстра с нормой - 50 г/га.	Трактор Беларусь 953	Титан
Уборка урожая				
13	Уборка урожая	Уборка сортов мягкой пшеницы. Потери не более 1-2%. Оборот барабана – 800 обр/мин.	John Deere s 760i	

Культивация проведена на глубину 8-10 см культиватором John Deere 710 с трактором John Deere 9420R. Вслед за глубокой обработкой произведено внесение удобрения с использованием посевного комплекса John Deere 1830 в агрегате с трактором John Deere 9420R. Удобрение Аммофос внесено с нормой 179 кг/га на глубину 18-20 см. В фазе отрастания многолетних сорняков и в фазе проростков однолетних сорняков произведена глубокая плоскорезная обработка на глубину 23-25 см, плоскорезом глубокорыхлителем КПП-7.

Вторая химическая обработка баковой смесью Смерч 540, В.Р (действующие вещества - глифосат, калиевая соль – 540 г/л., норма расхода - 2,5 л/га) + Эстерон (действующие вещества - 2,4-Д кислота в виде 2-этилгексил эфира 600 г/л., норма расхода препарата – 0,3 л/га) проведена после появления многолетних и однолетних сорняков. Химическая обработка пара проведена опрыскивателем «Lemken Albatros» при норме расхода рабочей жидкости 200 л/га.

Подготовка семян к посеву и посев. Подготовка семян к посеву включала их предварительное прогревание за месяц до посева, направленное на повышение посевных качеств. Обработка семян проведена согласно схеме полевого опыта по факторам В₁ и В₂ (таблица 5). Обработка семян пшеницы рекомендованным маточным раствором проводилась из расчёта 200 мл на 1 т. Интервал между предпосевной обработкой семян и высевом на поле не превышал 6-8 часов. Показатель кислотности рабочего раствора находился в пределах слабокислой или нейтральной pH - 6,5-7,0.

Посевные работы произведены в рекомендуемые сроки для данной зоны. Норма высева семян составила 3,0 млн. всхожих семян на гектар, глубина посева семян - 5-7 см. Посев яровой мягкой пшеницы произведён посевным комплексом VADERSTAD + трактор Challenger 865, обеспечивающим равномерное размещение семян и оптимальные условия для их прорастания.

Уход за посевом яровой мягкой пшеницы. В течение вегетации яровой мягкой пшеницы проводились прикатывание, боронование, гербицидная, фунгицидная обработка и листовая подкормка. Прикатывание, боронование и листовая подкормка проводились в соответствии со схемой полевого опыта по факторам В₂, С₁, С₂, тогда как гербицидная и фунгицидная обработка по всей площади опыта. После посева сортов мягкой пшеницы проведено прикатывание кольчато-зубчатым катком ККЗ-12,4. В период кущения яровой пшеницы проведена гербицидная обработка посевов против однолетних и многолетних двудольных сорняков баковой смесью Эффект, КЭ с нормой расхода 0,8 л/га и против однодольных злаковых - Пегас 13,5%, КЭ с нормой 0,45 л/га. Химическую обработку посевов проводили при температуре 15-16 градусов, скорость ветра 1-2 м/с в вечернее время опрыскивателем Титан с шириной захвата 25 м с рабочей жидкостью 100 л/га.

Через 3 дня после гербицидной обработки проведена листовая подкормка комплексным стимулирующим препаратом согласно схеме опыта с использованием опрыскивателя Титан при норме расхода рабочей жидкости 150 л/га. Боронование проведено бороной - мотыгой БМТ-6 по направлению посева на глубину 3-4 см согласно схеме опыта.

Химическая обработка посева проведена в период колошения пшеницы против ржавчины и септориоза листьев препаратом Прозаро (действующие вещества - 125 г/л протиоконазол и 125 г/л тебуконазола- 0,8 г/л., норма расхода препарата - 0,6 л/га) и против тли препаратом Конфидор Экстра (действующие вещества - имидаклоприд - 700 г/кг., норма расхода препарата – 50 г/га).

Уборка урожая зерна сортов яровой мягкой пшеницы проводилась комбайном John Deere s 760i при достижении полной спелости.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Молекулярно-генетический скрининг сортов яровой мягкой пшеницы на засухоустойчивость

Генотипирование по полиморфному признаку засухоустойчивости проводилось на 11 сортообразцах яровой мягкой пшеницы с привлечением образцов, носителей микромутаций и применением модифицированных Amplifluor SNP- маркеров, ассоциированных с целевыми генами *TaDrl*, *DREB*, *TaLTP*, *TaPARG* и *COMT*.

Молекулярный маркер *KATU-X1* был разработан на основе аннотированного однонуклеотидного полиморфизма (SNP), ранее идентифицированного китайскими исследователями у сорта яровой мягкой пшеницы Opata 85. Установлено, что целевой полиморфизм представлен заменой нуклеотида А на С в позиции 770 в геноме В, тогда как в геномах А и D данный SNP отсутствует. В качестве матрицы для разработки праймеров использовали последовательность гена *Dreb1* (*DQ195069*, *Triticum aestivum*, genome B), кодирующего dehydration-responsive element-binding protein, широко вовлечённый в регуляцию ответных реакций растений на засуху. Первоначальные праймерные системы были разработаны для аллель-специфической ПЦР (AS-PCR), что обеспечило основу для дальнейшей модификации под флуоресцентную детекцию [169, 170].

В рамках настоящего исследования, на основе опубликованных данных, были сконструированы SNP-праймеры, адаптированные под систему «Amplifluor-like».

Для проведения генотипирования с использованием геном-специфичных праймеров, направленных на геном В гена *Dreb1*, геномную ДНК выделяли из сорта Opata 85, являющегося носителем целевого полиморфизма. Данный образец использовали в качестве положительного контроля при амплификации по признаку засухоустойчивости.

На основе анализа последовательностей и локализации SNP был разработан дизайн маркера *KATU-X1*, включающий два аллель-специфичных прямых праймера (*KATU_X1-F1* и *KATU_X1-F2*), различающихся по одному нуклеотиду в 3'-концевой позиции, и общий обратный праймер (*KATU_X1-R*). Длина амплифицируемого фрагмента составила 82 п.н., что обеспечивает высокую эффективность и специфичность реакции (рисунок 4).

На основе аннотированных SNP-полиморфизмов и анализа нуклеотидных последовательностей, были разработаны праймерные системы и для остальных исследуемых генов. Дизайн праймеров осуществляли с учётом аллель-специфичности, локализации SNP в функционально значимых участках генома, а также требований технологии «Amplifluor-like», включая добавление универсальных хвостовых последовательностей для флуоресцентной детекции. Это обеспечило сопоставимую специфичность,

чувствительность и воспроизводимость генотипирования по всем вовлечённым в исследование маркерам.

AGAAAGGTCCTGGGAATATAACTGATCTTTGAGTTAACAGGTTCAACTTTGCTGGCTGTAATGTTAATGTGTCTCCAA	
GGATTGTTATGTCAGTCTTACAACCTTTTTTTTTTGTATCATACTATTTAGAATCTTGCTATTCACAGCCAGTTTGGC	
M = G / A	
AGAAAGGTCCTTGGGAATATAACTGATCTTTGAGTTAACAGGTTCAACTTTGCTGGCTGTAATGTTAATGTGTCTCCAA	
GATTGTTAGTTCA	GTCTTACAACCTTCTTTTTTGTATCATACTATTTAGAATCTTGCTATTCACAGCCAGTTTGGCTAC
AGAAAGGTCCTTGGGAATATAACTGTTCTTTGAGTTAACAGGTTCAACTTTGCTGGCTGTAATGTTAATGTGTCTCA	
GATTGTTATGTCA	GTCTTACAACCTTCTTTTTTGTATCATACTATTTAGAATCTTGCTATTCACAGCCAGTTTGGCAC
Proposed primers	
TaPPH -7A - FGTTGTAAGACTGACATAACAAT	C Tm = 55,35 C
TaPPH -7A - FGTTGTAAGACTGACATAACAAT	T Tm = 56,4 C
TaPPH -7A - RGCTGGCTGTAATGTTAATGTGT	C Tm = 54,64 C
PCR product size : 80 (bp)	
TaPPH -7A - FGAAGGTGACCAAGTTCATGCTGTTGTAAGACTGACATAACAAT	C
TaPPH -7A - FGAAGGTGCGAGTCAACGGATTGTGTAAGACATAACAACAAGAT	T
TaPPH -7A - RGCTGGCTGTAATGATAATGTGTCTC	

Рисунок 4 - Характеристика набора праймеров *TaPPH-7A-F1, F2, R*

Для применения в системе Amplifluor-like аллель-специфичные праймеры были дополнительно модифицированы путём включения универсальных хвостовых последовательностей, обеспечивающих связывание с флуоресцентными зондами. Это позволило реализовать принцип аллель-специфической детекции в режиме реального времени и повысить точность генотипирования (рисунок 5).

KATU_X1-F1:	G A A G G T G A C C A A G T T C A T G C T T G T G A T A T G G A T T G C C T T G A T G A A
KATU_X1-F2:	G A A G G T C G G A G T C A A C G G A T T G T G A T A A T G G A T T G C C T T G A T G A C
KATU_X1-R:	G A T G G T T T C A G C A A C C G A A T C

Рисунок 5- Структура разработанного *Amplifluor like SNP* маркера *KATU-X1*

Таким образом, разработанный SNP-маркер *KATU-X1* представляет собой эффективный инструмент для идентификации аллельных вариантов гена *Dreb1* в геноме В пшеницы и может быть использован при молекулярной оценке засухоустойчивости генотипов.

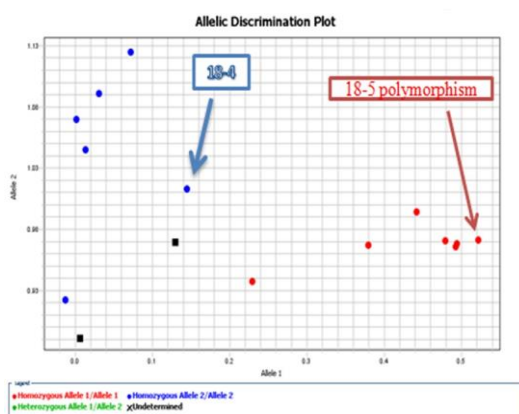
Генотипирование, проведённое с использованием разработанных маркеров на SNP в кодирующей области засухоустойчивости показал чёткое разделение образцов, что позволяет провести эффективный отбор сортов.

Уровень устойчивости к засухе пшеницы в разных периодах развития представляет собой сложные количественные признаки, формирование которых в значительной степени определяется генетическим потенциалом сорта [153]. Изучение генетической архитектуры признаков, связанных с засухоустойчивостью пшеницы, является приоритетным направлением при отборе перспективных генотипов. Известно, что такие гены, как *TaDr1*, *DREB*, *TaPARG* и *COMT* и ряд других, оказывают прямое влияние на

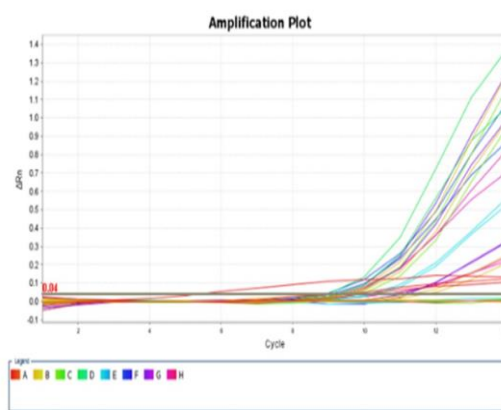
засухоустойчивость пшеницы. Аллельное разнообразие этих генов может обуславливать различия в уровне продуктивности между генотипами пшеницы [173].

Согласно данным Huang X. и соавторов [170], гены семейства *DREB* кодируют белки, связывающие элементы, чувствительные к дегидратации, и играют ключевую роль в формировании засухоустойчивости у пшеницы. Их активация в условиях водного дефицита приводит к индукции стресс-ассоциированных генов, задействованных в осмотической регуляции. Аллельное богатство генов *DREB* у засухоустойчивых генотипов предоставляет ценную информацию о генетическом разнообразии, влияющем на адаптивный потенциал растений. В связи с этим выявление и валидация новых праймеров для данных генов является важным этапом в отборе засухоустойчивых сортов пшеницы.

В результате проведённых исследований сорта яровой мягкой пшеницы отчётливо различались при использовании праймера *KATU-W62-SNP2*, разработанного ранее на ген *TaDr1* [149], и соответствовали одному из двух вариантов аллельного распределения: либо совпадая с генотипом 18-4 ('bb'), либо с высокоурожайным в условиях засухи генотипом 18-5 ('aa'), являющимся носителем благоприятного полиморфизма (рисунок 6).



А) 11 коллекционных образцов яровой мягкой пшеницы, *Triticum spelta* (18-4), [(*T. Aestivum* cv. Новосибирская 67/ *T. dicoccum*)] -(18-5)



Б) Амплификация при генотипировании

Примечание - Красным и синим цветом обозначены гомозиготные образцы 'aa' и 'bb'. Зелёным цветом указаны гетерозиготные растения 'ab'. Контроль – стерильная вода вместо ДНК, указан в виде чёрных квадратов.

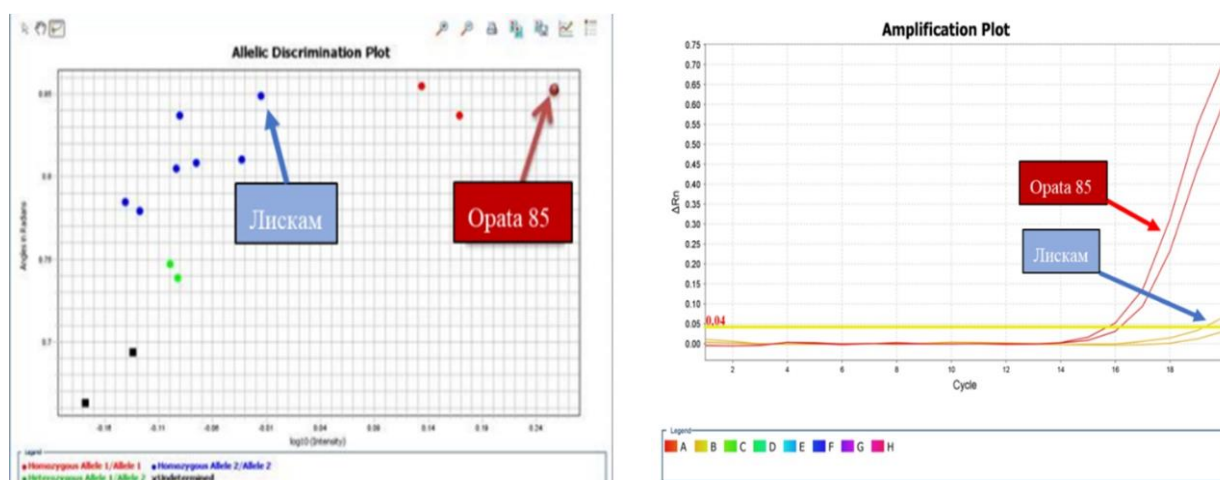
Рисунок 6 - Результаты генотипирования по праймеру *KATU W-62*

Образцы, разделившиеся по флюорофору FAM (аллель 1) и обозначенные красным цветом в обеих технических повторностях, были отобраны как наиболее перспективные генотипы по гену *TaDr1B*, кодирующему репрессор транскрипции. Среди 11 исследованных сортов к таким генотипам относились Ламис, Лискам, Акмола 2, Карабалыкская 90,

Фантазия, Асыл Сапа, а также носитель аллеля, ассоциированного с засухоустойчивостью, *T. dicoccum* (18-5).

Для гена *Dreb1* был разработан специфичный праймер KATU-X1. Образцы, разделившиеся по флюорофору FAM (аллель 1) и отмеченные красным цветом ('aa'), были выделены как генотипы, несущие однонуклеотидный полиморфизм по гену *Dreb1*, сцепленный с признаком засухоустойчивости пшеницы (рисунок 4). Из 11 анализируемых образцов были идентифицированы сорта, наряду с носителем благоприятного полиморфизма Opata 85, демонстрирующие гомозиготный положительный результат ('aa') по гену *Dreb1*: Таймас и Шортандинская 2014 (рисунок 7).

В то же время сорта Гранни и Целина 50 по данному гену были определены как гетерозиготы, либо представляли собой смесь генотипов ('ab').



А) Сорта яровой мягкой пшеницы, Opata 85- носитель полиморфизма

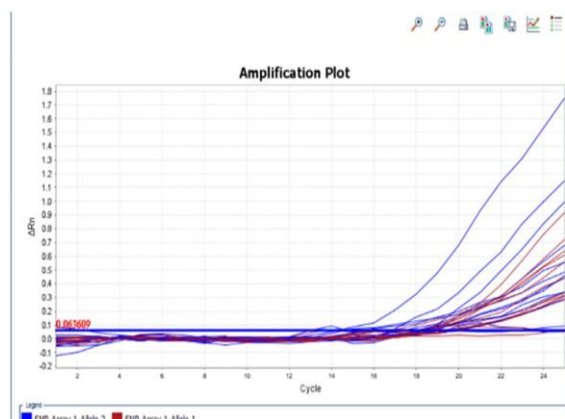
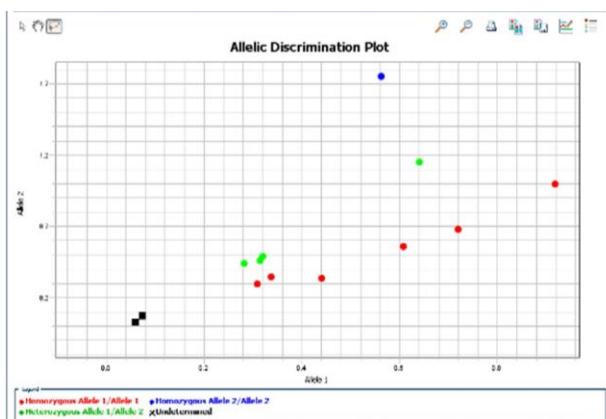
Б) Амплификация при генотипировании

Примечание - Красным и синим цветом обозначены гомозиготные образцы 'aa' и 'bb'. Зелёным цветом указаны гетерозиготные растения 'ab'. Контроль – стерильная вода вместо ДНК, указан в виде чёрных квадратов.

Рисунок 7 - Результаты генотипирования по праймеру KATU-X1

Генотипирование 11 сортов яровой мягкой пшеницы по гену *TaLTP*, кодирующему белок-переносчик липидов, участвующий в реакции растения на абиотический стресс, включающий засуху, показало мономорфность, что свидетельствует об отсутствии полиморфизма среди исследуемых образцов.

Анализ по гену *TaPARG-2A*, связанному с архитектурой растений и экспрессирующемуся при дефиците влаги у генотипов с меньшей продуктивной кустистостью, но более продуктивным колосом, продемонстрировал положительный результат. В ходе генотипирования по данному гену была выявлена однонуклеотидная замена С/Т во втором экзоне (Аллель 2-'bb'), приводящая к аминокислотной замене His/Tyr, и выделился один сорт отечественной селекции - Таймас (рисунок 8).



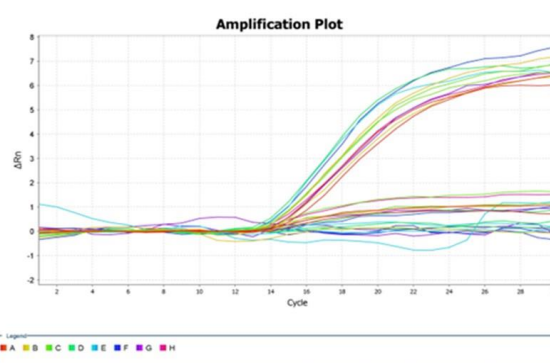
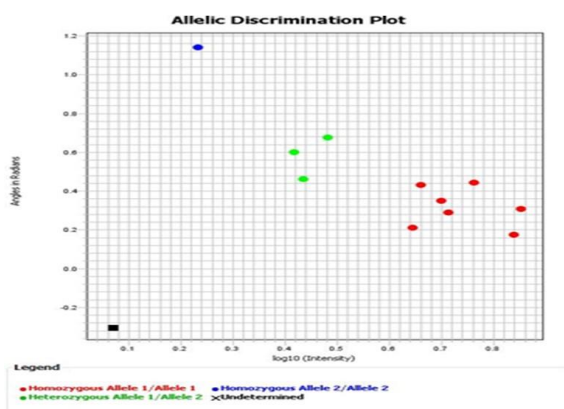
А) Сорты яровой мягкой пшеницы

Б) Амплификация при генотипировании

Примечание - Красным и синим цветом обозначены гомозиготные образцы 'aa' и 'bb'. Зелёным цветом указаны гетерозиготные растения 'ab'. Контроль – стерильная вода вместо ДНК, указан в виде чёрных квадратов.

Рисунок 8 - Результаты генотипирования по праймеру на ген *TaPARG-2A*

Генотипирование по гену *COMT3B*, участвующему в синтезе лигнина и связанному с устойчивостью растений к водному стрессу, выявило чёткую дифференциацию образцов по аллелям 'bb' («G» - неустойчивый генотип) и 'aa' («T» - более устойчивый генотип). Образцы, разделившиеся по флюорофору FAM (аллель 1) и обозначенные красным цветом ('aa'), были отобраны как носители благоприятного полиморфизма, ассоциированного с засухоустойчивостью (рисунок 9). К данной группе отнесены сорта Ламис, Лискам, Гранни, Акмола 2, Карабалыкская 90, Фантазия и Шортандинская 2014.



А) Сорты яровой мягкой пшеницы

Б) Амплификация при генотипировании

Примечание - Красным и синим цветом обозначены гомозиготные образцы 'aa' и 'bb'. Зелёным цветом указаны гетерозиготные растения 'ab'. Контроль – стерильная вода вместо ДНК, указан в виде чёрных квадратов.

Рисунок 9 - Результаты генотипирования по праймеру на ген *COMT3B*

Молекулярно-генетический скрининг с использованием Amplifluor SNP-маркеров, направленных на гены *Dr1*, *Drebl*, *TaLTP*, *TaPARG* и *COMT3B*,

ассоциированные с устойчивостью пшеницы к засухе, позволил выделить наиболее перспективные сорта (таблица 8).

Наиболее благоприятная комбинация аллельного состава включает: по гену *TaDr1B* (репрессор транскрипции) - гомозиготные аллели '*aa*', разделение по флюорофору FAM, отмеченные красным цветом; по генам *TaPARG-2A* (транскрипционный фактор) гомозиготные аллели '*bb*', визуализируемые синим цветом (флюорофор VIC); по гену *Dreb1* (транскрипционный фактор) и гену *COMT3B* (3-О-метилтрансфераза кофейной кислоты) - аллели '*aa*', отображаемые флюорофором FAM красного цвета.

Наиболее удачное сочетание указанных аллелей выявлено в сортах Ликамеро (Франция), Ламис, Карабалыкская 90, Фантазия (Карабалыкская СХОС), Акмола 2, Шортандинская 2014 и Таймас (НПЦ ЗХ им. А. И. Бараева). Сорта Гранни (Австрия) и Асыл Сапа (НПЦ ЗХ им. А. И. Бараева) продемонстрировали положительный результат по одному из целевых генов.

Таблица 8 - Результаты генотипирования сортов яровой мягкой пшеницы разработанными SNP маркерами ($n=2$ для каждого генотипа)

Сорт	Генотипирование сортов яровой мягкой пшеницы разработанными SNP маркерами				
	TaDr1B KATU W-62	TaLTP	TaDREB1 KATU -X1	TaPARG-2A	COMT3B
Ламис	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>
Ликамеро	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>
Гранни	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>aa</i>
Акмола 2	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>
Карабалыкская 90	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>
Асыл Сапа	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>
Фантазия	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>
Шортандинская 2014	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>
Айна	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>
Таймас	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>aa</i>	<i>bb</i>	<i>aa</i>
Целина 50	<i>bb</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>

Исследуемые сорта отечественной селекции Таймас (НПЦ ЗХ им. А. И. Бараева) и зарубежной селекции Гранни (Австрия) особо отметились признаками устойчивости к засухе.

Применение исключительно высокоустойчивых не обеспечивает полного решения проблемы засухи. По данным ряда исследователей [171,172, 173], повышение эффективности достигается при комплексном подходе, включающем использование современных агротехнологических приёмов в сочетании с обоснованным подбором сортов, что рассматривается как стратегически значимый фактор снижения негативного воздействия засушливых условий.

3.2 Влияние комплексных стимулирующих средств на засухоустойчивость яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) на ранних стадиях развития

3.2.1 Влияние комплексных стимулирующих средств на морфологические параметры всходов семян яровой мягкой пшеницы

В период прорастания покоящееся семя, начиная с момента поглощения влаги, переходит к формированию сложного автотрофного организма. На этой стадии происходят многочисленные физические, морфологические и биохимические изменения, завершающиеся образованием проростка. Различные стрессовые факторы, возникающие в период прорастания, определяют перспективы дальнейших этапов роста и развития будущего растения. Одним из наиболее значимых абиотических стрессов является дефицит влаги. При недостатке воды снижается доступность необходимых для растения питательных веществ, прежде всего макроэлементов, что в сочетании с другими неблагоприятными факторами представляет серьёзную угрозу для производства зерна в засушливых регионах мира.

Стресс от засухи отрицательно влияет на морфологические, физиологические, биохимические и молекулярные характеристики растений пшеницы на всех этапах онтогенеза - от прорастания до созревания, что в конечном итоге приводит к снижению продуктивности урожая [60, 174].

Уровень всхожести исследуемых семян сортов яровой мягкой пшеницы зависел от сортовых особенностей, концентрации применяемых комплексных препаратов и условий прорастания. В настоящем исследовании установлено, что под воздействием засухи не прорастает до 30 % посеянных семян. Дефицит влаги, наряду со снижением всхожести, ограничивает оптимальное развитие побега. В условиях засухи масса побега уменьшается до 52,5 %, длина побега - на 31,2 %, а площадь листовой поверхности - на 23,57 %. Выявлено также негативное воздействие засухи на формирование корневой системы: количество корешков снижалось в среднем на 0,33 шт., их длина - на 3,33 см, а масса - на 58,3 %.

Одним из наиболее эффективных методов снижения негативного влияния засухи является предпосевная обработка семян микроэлементами и стимуляторами роста [118, 124]. При недостатке влаги в период появления всходов существенно уменьшаются основные показатели развития проростков (длина, масса и площадь побегов; количество, длина и масса корней). Результаты лабораторных опытов свидетельствуют о том, что предпосевная обработка семян яровой мягкой пшеницы комплексным стимулирующим средством значительно улучшает ростовые параметры проростков и корешков.

Условия проращивания, применение микроэлементных препаратов и сортовые особенности по-разному влияют на рост и развитие проростков

яровой мягкой пшеницы. Комплексный препарат, содержащий микроэлементы, полисахарид и фитогормон, способствовал увеличению длины побега в условиях засухи: в среднем на 4,27 см у сорта Гранни и на 7,81 см у сорта Таймас (рисунок 10).

Увеличение длины, массы и площади проростка наблюдалось во всех вариантах опыта; наилучшие результаты получены при применении комбинации «Микроэлементы + альгинат натрия + 24-эпибрассинолид». Положительное влияние различных средств на параметры проростка отмечено у обоих сортов, при этом сорт Таймас характеризовался более выраженной реакцией на обработку по сравнению с сортом Гранни.

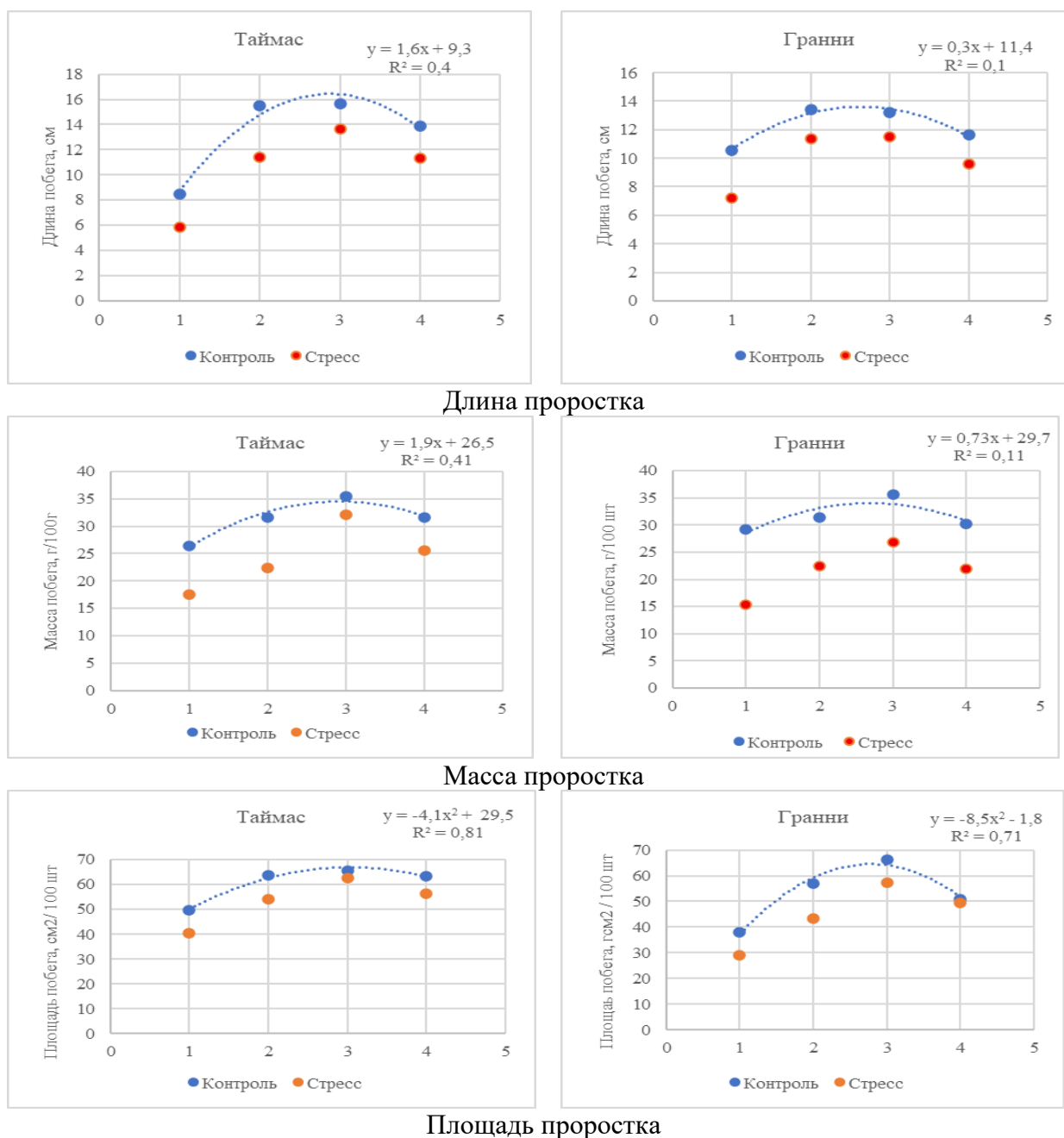


Рисунок 10 - Влияние различных средств на параметры побега

В зависимости от условий прорастания и состава применяемых препаратов корневая система проростков демонстрировала различную степень развития. Наиболее значительное увеличение длины зародышевых корешков (на 3,56-5,44 см по сравнению с контролем) отмечено в имитационных условиях засухи при обработке семян комплексными средствами.

В естественных условиях при применении комплекса, включающего микроэлементы, полисахарид и стимулятор роста, масса корешков достигала 24,3 г/100 шт. у сорта Гранни и 25,97 г/100 шт. у сорта Таймас. Добавление α-нафтилуксусной кислоты к указанному комплексу не приводило к дальнейшему увеличению корневых параметров (рисунок 11).

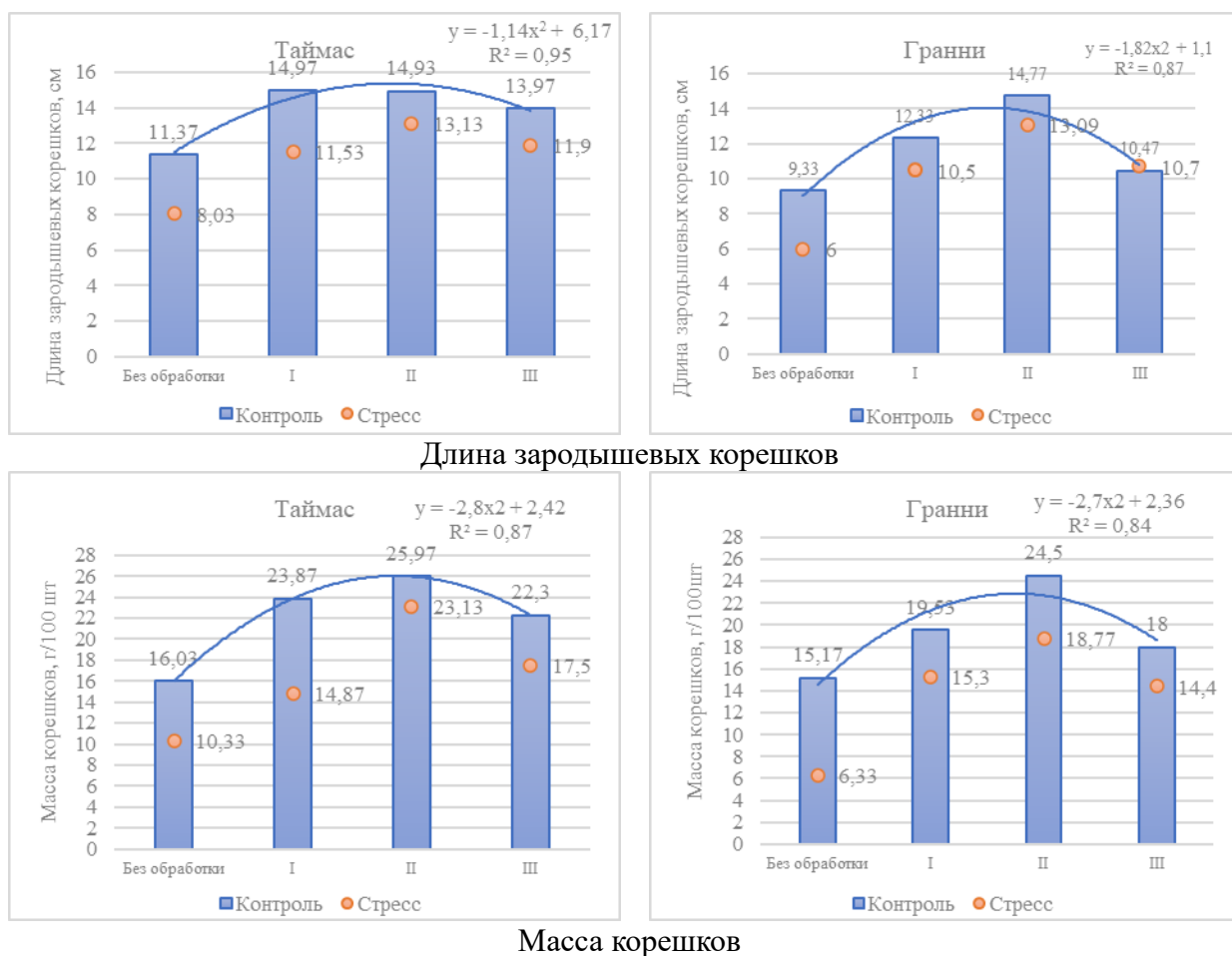


Рисунок 11- Влияние различных средств на основных параметрах корешка

Существенная разница по параметрам корня при обработке семян различными средствами между сортами Гранни и Таймас не наблюдалась.

3.2.2 Влияние комплексных стимулирующих средств на всхожесть семян яровой мягкой пшеницы

Применение микроэлементов (Si, Zn, Fe, Mn) повышает содержание антиоксидантов (аскорбат, восстановленный глутатион, общий фенол и общий флавоноид), количество пигментов фотосинтеза и активных веществ, поглощающих кислород, снижает перекисное окисление липидов, играет решающую роль в окислительно-восстановительных системах клеток и различных ферментов, участвует в детоксикации супероксидных радикалов, увеличивает чистую скорость фотосинтеза, повышает содержание ауксина (IAA) и фруктозы, оказывает благотворное влияние на рост и развитие растений, особенно в условиях абиотического стресса [175].

Полисахарид альгинат натрия представляет собой линейный полисахарид в клеточной стенке бурых морских водорослей, который состоит из β -D-гиалуроновой кислоты (G) и α -L-маннуроновой кислоты (M). Препарат увеличивает количество фотосинтетических пигментов, содержание углеводов, азота и белка, антиоксидантных ферментов и тем самым способствует росту и развитию растений, стимулирует синтез осмопротекторов и активность антиоксидантных ферментов, что прямо или косвенно способствует росту растений пшеницы [176].

Обработка семян 24-эпибрассинолидом активизирует функционирование фотосинтетического аппарата, стабилизирует процессы детоксикации активных форм кислорода, участвует в биосинтезе лигнина и оказывает выраженное антистрессовое действие в условиях дефицита влаги, выступая сигнальным соединением в ряде физиологических процессов [11, 125].

Благодаря оптимальному сочетанию компонентов, комплексное средство, применяемое для предпосевной обработки семян с целью повышения засухоустойчивости яровой мягкой пшеницы, усиливает антиоксидантную активность ферментов, снижает интенсивность окислительного стресса, улучшает посевные качества семян и стимулирует рост и развитие растений. В совокупности эти факторы обеспечивают повышение всхожести и развитие корневой системы.

Результаты лабораторных исследований показали, что обработка семян комплексом микроэлементов, альгината натрия и 24-эпибрассинолида способствует существенному ускорению роста проростков. В естественных условиях при использовании данного комплекса всхожесть семян достигала 98,34 % у сорта Гранни и 95,7 % у сорта Таймас. Применение комплексных средств повышало всхожесть семян сорта Гранни на 22,7 %, сорта Таймас - на 21,46 %. В условиях искусственной засухи всхожесть обработанных семян увеличивалась с некондиционного уровня (71,67-71,77 %) до показателей, соответствующих 2 классу кондиции (93,23-94,36 %).

Использование оптимальной дозы комплексных средств способствовало более интенсивному развитию корневой массы по сравнению с надземной частью проростков (таблица 9).

Таблица 9 - Влияние комплексных стимулирующих средств на уровень всхожести

Сорт (А)	Обработка семян комплексным стимулирующим средством (В)	Условия прорастания (С)	Всхожесть, %	Соотношение корней и побегов (RSR)	Угол появления корешков, °	Индекс всхожести, (GI)
Гранни	Без обработки	Контроль	93,33	0,52	26	100
		Стресс	71,67	0,41	9	49,68
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75)	Контроль	97,27	0,63	9,97	137,56
		Стресс	82,23	0,68	7,23	98,84
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025)	Контроль	98,34	0,69	30,83	166,3
		Стресс	94,36	0,7	26,37	141,52
	Zn (0,75) + Mn - (0,75) + Cu (0,5) + Fe (0,75) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025) + C ₁₂ H ₁₀ O ₂ (0,025)	Контроль	90,1	0,59	28,93	113,04
		Стресс	82,86	0,66	23,43	101,56
В среднем по сорту Гранни			88,77	0,61	20,22	113,56
Таймас	Без обработки	Контроль	93,4	0,61	23,47	121,74
		Стресс	71,77	0,6	10,1	66,1
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75)	Контроль	94,43	0,75	16,6	131,86
		Стресс	90,07	0,67	14,03	118,88
	Zn (0,5) + Mn - (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025)	Контроль	95,7	0,73	25,63	138,71
		Стресс	93,23	0,72	22,63	140,25
	Zn (0,75) + Mn - (0,75) + Cu (0,5) + Fe (0,75) + Si (0,75) + C ₆ H ₇ O ₆ Na _n (0,5) + C ₂₈ H ₄₈ O ₆ (0,0025) + C ₁₂ H ₁₀ O ₂ (0,025)	Контроль	93,87	0,71	21,74	130,13
		Стресс	91,51	0,68	16,9	134,74
В среднем по сорту Таймас			90,50	0,68	18,89	130,93
Дисперсия, S ²			68,46	0,17	56,84	11,01
Коэффициент вариации, V%			9,24	14,55	38,63	27,40
Ошибка средней арифметической, S _x			0,57	0,01	0,58	0,74

При этом отношение массы корней к массе побегов (RSR) достигало максимальных значений (0,70-0,77 ед.) независимо от сортовых особенностей. В условиях засухи данный показатель снижался до 0,08-0,12 ед. по сравнению с естественными условиями проращивания.

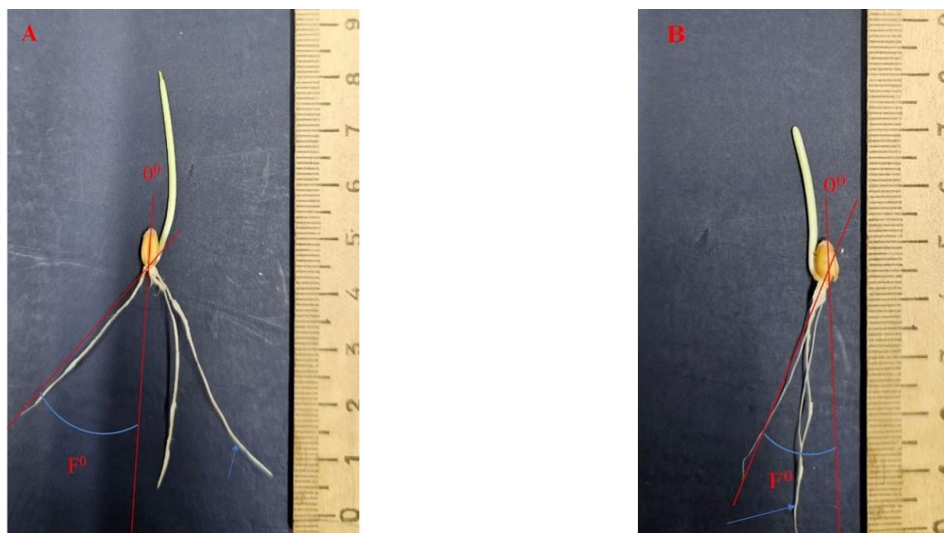
Обработка семян различными средствами усиливала синтез ауксинов, что обеспечивало активный рост зародышевых корешков. Под воздействием комплексных препаратов RSR в естественных условиях увеличивался на 17,3-33,1 %, а в условиях засухи - на 21,11-42,73 %. Эффективность микроэлементов в формировании корневой системы проростков в условиях имитации засухи возрастала и составляла 46,94-69,7 %, по сравнению с естественными условиями. Быстрое развитие корневой системы проростков, обеспечиваемое предпосевной обработкой семян оптимальной концентрацией комплексных средств, способствует более плавному и стабильному переходу растений к автотрофному питанию.

В ходе наших экспериментов установлено (Lutschak P. et al), что в условиях засухи у проростков пшеницы усиливаются проявления гидротропизма [177]. При выраженном гидротропном ответе зародышевые корешки преимущественно росли в узко направленном вертикальном направлении, ориентируясь в сторону глубинных слоёв почвы. В условиях оптимальной обеспеченности влагой рост корней происходил в более широком диапазоне направлений - под углом 20-30° от вертикали (рисунок 12).

Помимо основных параметров всхожести зафиксировано также снижение угла отклонения первичных корешков, который в стрессовых условиях засухи уменьшался до 15,97°. Это указывает на усиление направленного роста корневой системы в сторону источника влаги как адаптивного механизма выживания в условиях водного дефицита. Угол появления корешков в зависимости от условий проращивания наглядно представлен на рисунке 13.

При использовании оптимальных концентраций микроэлементов угол отклонения зародышевых корешков снижался до минимальных значений (2,17-2,70°) по сравнению с естественными условиями проращивания семян. Это свидетельствует об усилении направленного роста корней и повышении чувствительности проростков к градиенту влажности.

Применение оптимальной концентрации комплексных средств оказало существенное влияние на основные параметры всхожести семян пшеницы и привело к увеличению индекса всхожести. Максимальный положительный эффект данного показателя был отмечен в имитационных условиях засухи (140,25–141,52 %) при использовании комплекса, содержащего микроэлементы, полисахарид и эпибрасинолид.



Примечание; А – естественные условия; В – имитационные условия засухи

Рисунок 12 - Угол появления корешков (RGA) в зависимости от условий проращивания

Добавление α -нафтилуксусной кислоты к указанному комплексу вызвало ингибирующий эффект, что привело к снижению индекса жизнеспособности проростков (SVI) с 25,06 % до 12,16 %. Это указывает на то что, любое химическое средство имеет отрицательный эффект для роста и развития семян и растений (Рисунок 13).

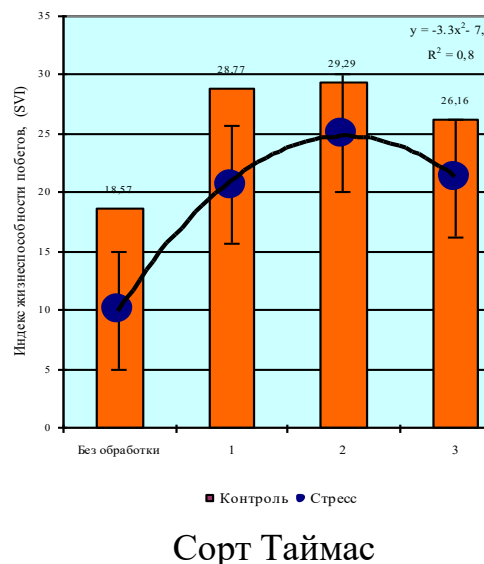
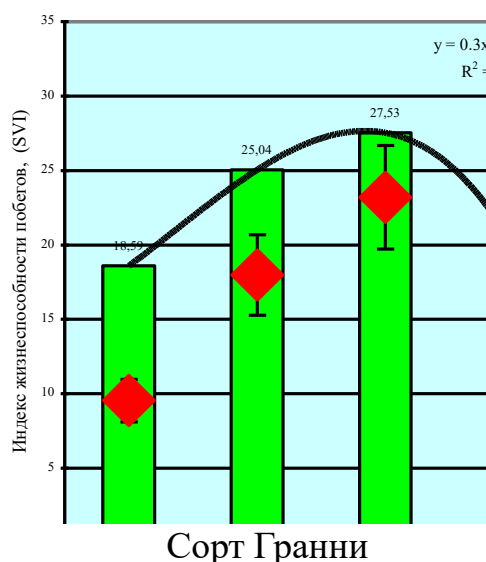


Рисунок 13. Индекс жизнеспособности побегов (SVI) сорта яровой мягкой пшеницы в зависимости от применения комплекса стимулирующих средств в разных условиях проращивания, %

С учётом показателей всхожести, длины побега и корешка установлено, что применение стимуляторов роста положительно влияло на индекс

жизнеспособности проростков (SVI) преимущественно при низких концентрациях. При повышенных концентрациях препаратов индекс жизнеспособности существенно снижался и достигал 8,2-9,51 %, что указывает на дозозависимый ингибирующий эффект.

В условиях дефицита влаги в период появления всходов применение стимулирующих средств обеспечивало наиболее высокие значения индекса всхожести и SVI, что свидетельствует о повышении устойчивости проростков к засушливому стрессу. В естественных условиях проращивания индекс жизнеспособности проростков был выше, по сравнению с имитационными условиями засухи, что закономерно отражает влияние вододефицита на физиологическую активность растений.

Сортовые различия также проявились в реакции на обработку: проростки сорта Таймас характеризовались более высокой жизнеспособностью, чем проростки сорта Гранни, при применении оптимальных концентраций комплексных средств (цинк - 0,5%, марганец - 0,5%, медь - 0,25%, железо - 0,5% и кремний - 0,75%), полисахарид (альгинат натрия - 0,5%) и фитогормон 24-эпибрассинолид - 0,0025%). Это указывает на потенциально более выраженную адаптивную способность сорта Таймас к стрессовым условиям при использовании предпосевных обработок.

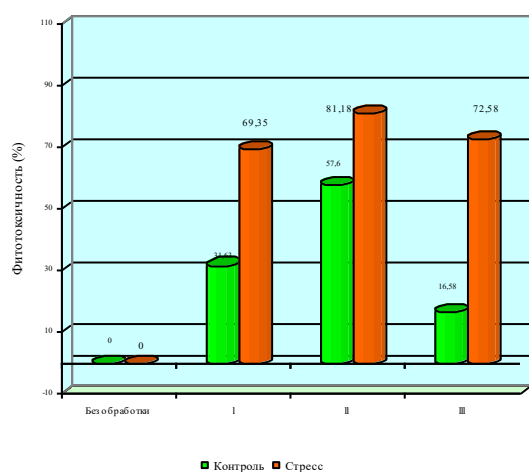
3.2.3 Фитотоксичный эффект стимулирующих средств на всхожесть семян пшеницы

Использование химических веществ для предпосевной обработки семян может приводить к образованию свободных радикалов, развитию окислительного стресса и ингибированию ферментативной активности [178]. Эти процессы сопровождаются проявлением фитотоксичности, что отражается в отрицательных значениях индекса фитотоксичности (от -6,17 до -8,9 %) и снижении ключевых параметров всхожести - индекса всхожести (GI), индекса жизнеспособности проростков (SVI) и соотношения массы корней к массе побегов (RSR). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при использовании различных стимулирующих средств во всех изученных условиях проращивания и при различных концентрациях проявляются признаки токсического действия (рисунок 14).

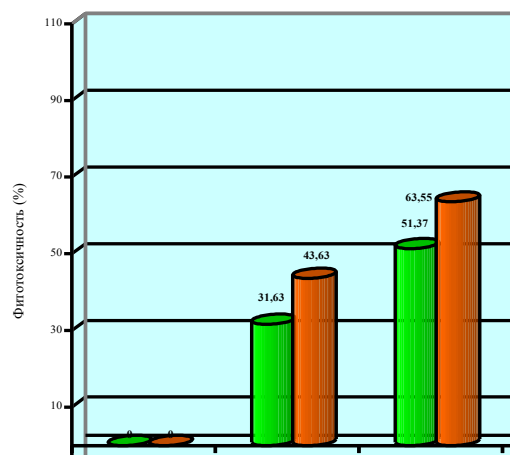
Применение в качестве прайминга любых отдельных химических веществ вызывало ингибирующий эффект, выраженный в уменьшении массы корешков до 6,1 г/100 шт., что подтверждает риск негативного влияния превышения концентраций на ранних этапах роста растений.

Высокий индекс фитотоксичности был зафиксирован при применении комплексного средства, включающего микроэлементы, полисахарид и фитогормон. Это указывает на синергетический эффект компонентов комплекса, обеспечивающий снижение токсического воздействия и повышение устойчивости проростков. В противоположность этому, максимальные концентрации отдельных микроэлементов вызывали

отрицательные значения индекса фитотоксичности, демонстрируя концентрационно-зависимую фитотоксичность и подтверждая необходимость строгого соблюдения оптимальных доз.



Сорт Гранни



Сорт Таймас

Рисунок 14 – Фитотоксичный эффект комплекса стимулирующих средств на всхожесть семян пшеницы в разных условиях проращивания

В условиях имитационной засухи применение микроэлементов обеспечивало высокий стимулирующий эффект (в среднем 16,75 %), тогда как в естественных условиях проращивания значение индекса было выше и составляло в среднем 38,88 %. Это свидетельствует о том, что в условиях водного дефицита растения сильнее реагируют на химическую нагрузку, что снижает антистрессовый эффект обработок комплексным стимулирующим средством.

Отмечены также сортовые особенности реакции на обработку: семена сорта Гранни демонстрировали более высокий стимулирующий эффект (в среднем 31,8 %) по сравнению с сортом Таймас (23,82 %). Данные различия связаны с генетически детерминированными механизмами устойчивости к окислительному стрессу растений, особенностями антиоксидантной системы и вариативностью поглощения и перераспределения микроэлементов в пределах сортов.

Результаты исследования подтверждают, что эффективность предпосевных обработок существенно зависит от концентрации используемых веществ, состава стимуляторов и сортовых особенностей. При оптимальном подборе компонентов комплексные средства демонстрируют выраженный стимулирующий эффект, тогда как превышение дозы отдельных микроэлементов может приводить к фитотоксичности, которая снижает параметры всхожести в ранней стадии онтогенеза.

3.2.4 Корреляционные взаимосвязи и факторная обусловленность яровой мягкой пшеницы на ранних стадиях развития при дефиците влаги

Растения в ответ на абиотические стрессовые воздействия активируют широкий спектр защитных механизмов, включая усиление синтеза стресс-индуцированных белков, повышение активности антиоксидантных ферментов и накопление осмолитов. Эти механизмы играют ключевую роль в регулировании процессов прорастания семян и раннего онтогенеза растений. Реальную всхожесть семян оценивают по совокупности параметров, характеризующих качество и энергию прорастания [79, 81].

Уровень всхожести семян определён как их внутренними свойствами, так и внешними условиями проращивания, которые становятся одним из основных факторов изменчивости характеристик прорастания [179]. В проведённом исследовании установлена тесная взаимосвязь между процентом всхожести и условиями прорастания семян: в имитационных условиях засухи различия по сравнению с естественными условиями были наиболее выраженными (рисунок 15).

		ВС	ДП	МП	ПП	КЗК	ДЗК	МК	УПК	ИЖП	СКП	ИВ	
ВС	Имитационная условия засухи	1,00	0,4	0,54	0,35	0,37	0,41	0,39	-0,24	0,58	0,16	0,54	Естественная условия прорастания
ДП		0,85	1,00	0,69	0,73	0,45	0,45	0,84	0,24	0,91	0,73	0,7	
МП		0,84	0,83	1,00	0,67	0,4	0,66	0,82	0,2	0,77	0,42	0,68	
ПП		0,92	0,79	0,89	1,00	0,71	0,9	0,89	0,03	0,86	0,83	0,86	
КЗК		0,67	0,59	0,7	0,69	1,00	0,69	0,64	0,02	0,62	0,67	0,71	
ДЗК		0,92	0,83	0,9	0,94	0,78	1,00	0,84	-0,05	0,9	0,77	0,96	
МК		0,87	0,84	0,96	0,93	0,78	0,93	1,00	0,07	0,9	0,86	0,83	
УПК		0,69	0,49	0,66	0,73	0,55	0,7	0,66	1,00	-0,19	-0,09	-0,08	
ИЖП		0,96	0,94	0,91	0,93	0,71	0,96	0,93	0,66	1,00	0,77	0,91	
СКП		0,74	0,66	0,66	0,81	0,61	0,86	0,84	0,51	0,75	1,00	0,72	
ИВ	0,96	0,86	0,91	0,95	0,71	0,93	0,93	0,72	0,98	0,77	1,00		
Примечание: ВС- всхожесть; ДП – длина побега; МП-площадь побега; КЗК - количество зародышевых корешков; ДЗК - длина зародышевых корешков; МК – масса корешков; УПК – угол появления корешков; ИЖП – индекс жизнеспособности побега; СКП - соотношение корней и побегов; ИВ - индекс всхожести; Ф – фито токсичность.													
r >0,01...0,29 – слабая положительная корреляция; r >0,3...0,69 – умеренная положительная корреляция; r >0,7...1,0 – сильная положительная корреляция; r >0,01...-0,29 – слабая отрицательная корреляция; r >-0,3...-0,69 – умеренная отрицательная корреляция; r <-0,7...-1,0 – сильная отрицательная корреляция.													

Рисунок 15. Корреляционная матрица показателей всхожести

Полученные данные показали, что независимо от условий проращивания, всхожесть семян пшеницы значительно коррелировала с массой корешков, индексом жизнеспособности побегов (SVI), соотношением массы корней к массе побегов (RSR) и индексом всхожести (GI). В естественных условиях прорастания между индексом всхожести и длиной зародышевых корешков выявлена сильная положительная корреляция ($r =$

0,96). Аналогично высокая корреляция наблюдалась между SVI и длиной, а также массой зародышевых корешков ($r = 0,90$).

При естественных условиях проращивания сильная взаимосвязь ($r = 0,7-1,0$) была выявлена между массой корней и побегов, длиной корешков и другими параметрами прорастания. Между углом появления корешков и основными показателями всхожести наблюдались слабые корреляции.

В условиях недостатка влаги степень корреляции между признаками прорастания значительно возрастала: из 55 проанализированных связей сильная или умеренная корреляция была зафиксирована в 42 случаях. Это указывает на усиление координированных механизмов регуляции прорастания при засушливом стрессе.

В условиях дефицита влаги отмечена сильная положительная корреляция между всхожестью семян и индексами жизнеспособности и всхожести ($r = 0,96$). Существенно усиливалась и взаимосвязь между углом появления корешков и другими параметрами всхожести: в имитационных условиях засухи связь достигала значений $r = 0,49-0,73$, тогда как в естественных условиях она была слабой.

Результаты дисперсионного анализа показали, что факторы «сорт», «условия проращивания» и «предпосевная обработка» оказывают существенное влияние на всхожесть семян мягкой пшеницы (таблица 10).

Таблица 10 - Результаты дисперсионного анализа

Дисперсия	F_{ϕ}	F_{05}	t_{05}	HCP_{05}	Доля влияния эффектов, %
Общая			2,13	3,86	100
Фактор А (Сорт)	9,37	4,08	12,71	1,28	5,07
Фактор В (Обработка средством)	39,67	2,64	2,78	2,52	8,71
Фактор С (Условия прорастания)	85,14	4,08	12,73	1,30	10,11
Взаимодействия АВ	7,23	2,64	2,78	1,78	16,76
Взаимодействия АС	8,83	4,08	12,71	1,51	19,58
Взаимодействия ВС	44,45	2,64	2,78	1,78	14,24
Взаимодействия АВС	143,41	2,64	2,78	1,54	25,53
Обобщённая ошибка для всего опыта - 1,28; Относительная ошибка - 1,43; Точность опыта - 98,57.					

Влияние факторов А (9,37), В (39,67), С (85,14), а также их взаимодействий - АВ (7,23), АС (8,83), ВС (44,45) и АВС (143,41) - было статистически достоверным при всех уровнях доверительной вероятности, поскольку полученные значения критерия Фишера были выше теоретических. Эксперименты, проведённые в 2023–2025 гг., характеризовались низкой ошибкой опыта ($Sx = 1,43$ %) и высокой точностью ($T = 98,57$ %).

Засуха оказывает резкое негативное влияние на всхожесть семян, определяя перспективы последующего роста и развития растений. Согласно нашим данным, уровень всхожести в первую очередь, без учёта взаимодействий факторов, зависит от условий прорастания (10,11 %). Однако правильный подбор сорта и комплексного состава препарата позволил существенно улучшить параметры прорастания. Совокупное влияние этих факторов составило 25,53 %.

Прайминг таким комплексом улучшал длину и массу побегов и корешков, повышал всхожесть, индекс всхожести (GI) и показатель RSR, что обеспечивало дружное появление всходов, усиленный рост и более высокую жизнеспособность растений по сравнению с необработанными семенами. При этом применение отдельных химических элементов приводило к снижению параметров всхожести и вызывало отрицательные значения фитотоксичности. Использование комплексных стимулирующих средств в оптимальных концентрациях позволяло минимизировать токсическое воздействие и обеспечивало выраженный стимулирующий эффект.

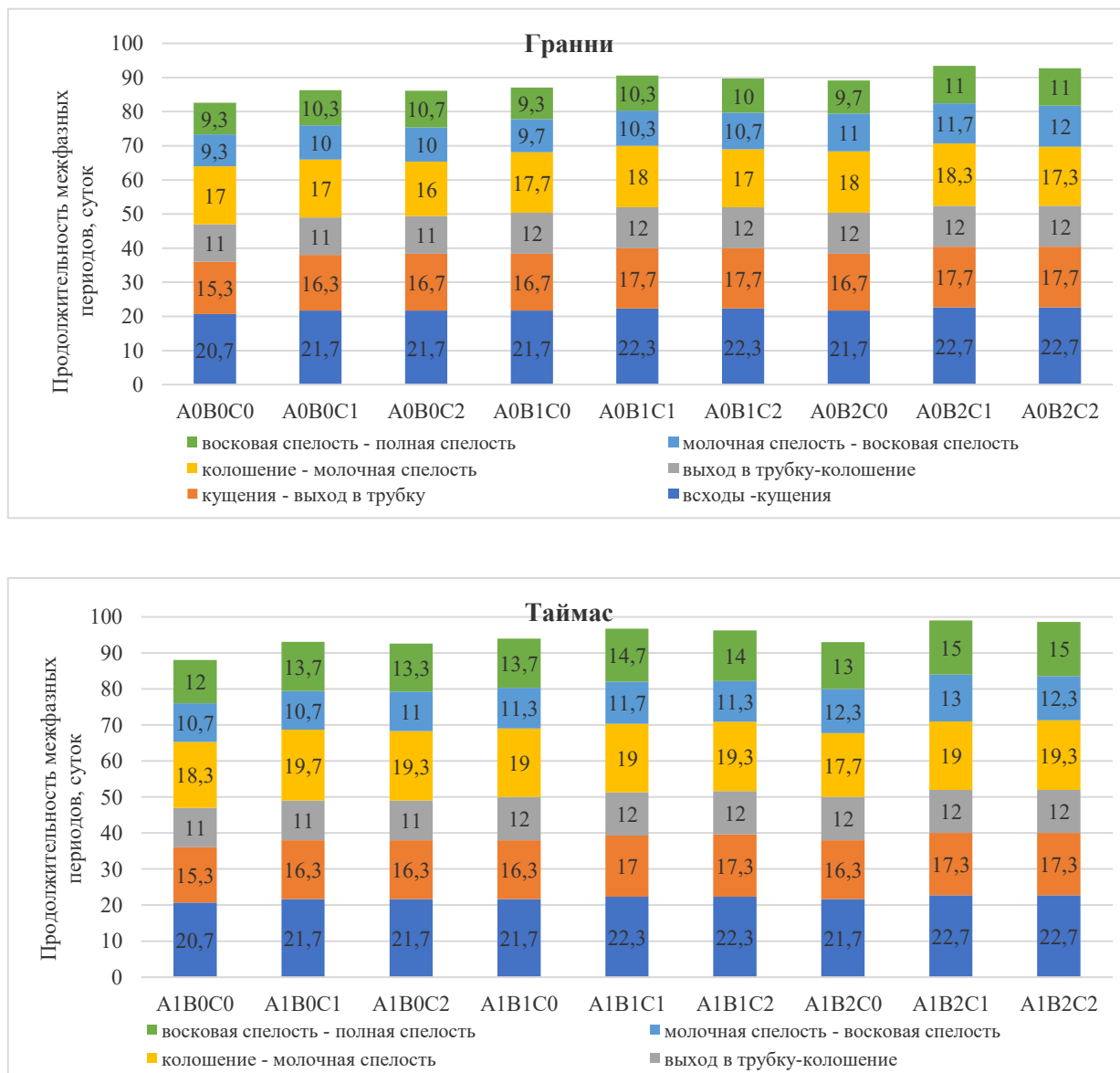
3.3 Влияние агротехнических мероприятий на формирование продуктивности сортов яровой мягкой пшеницы в засушливых условиях Центрального Казахстана

3.3.1 Влияние агротехнических мероприятий на продолжительность вегетационного периода сортов яровой мягкой пшеницы

Применение различных агротехнологических мероприятий оказывает существенное влияние на прохождение отдельных стадий онтогенеза яровой мягкой пшеницы - от прорастания семян до наступления полной спелости. Степень чувствительности растений к технологическим операциям существенно варьирует в зависимости от этапа развития. Если начальные фазы способны переносить умеренный дефицит влаги, то фазы генеративного развития характеризуются значительно более высокой реактивностью к изменениям условий среды и агротехнического фона.

В условиях сухостепной зоны Карагандинской области сроки прохождения фенологических фаз яровой мягкой пшеницы в течение 2023-2025 гг. подвергались заметным колебаниям, обусловленным различиями в погодных условиях, в особенности сортов и применяемых агротехнических приёмов. Посев осуществлялся в оптимальные сроки при прогревании посевного слоя почвы (0-6 см) до +8...+10 °С: в 2023 г. - 8 мая, в 2024 г. - 3 мая, в 2025 г. - 12 мая. Во все годы исследований обеспеченность почвы влагой в слое заделки семян была достаточной, что способствовало получению дружных всходов на 11-12-е сутки (рисунок 16). Обработка семян комплексным стимулирующим средством сократила период появления всходов в среднем на 0,3-0,4 суток.

В межфазный период от появления всходов до начала кущения наблюдалась значительная разнородность, связанная как с сортовыми особенностями, так и с влиянием элементов технологий возделывания.



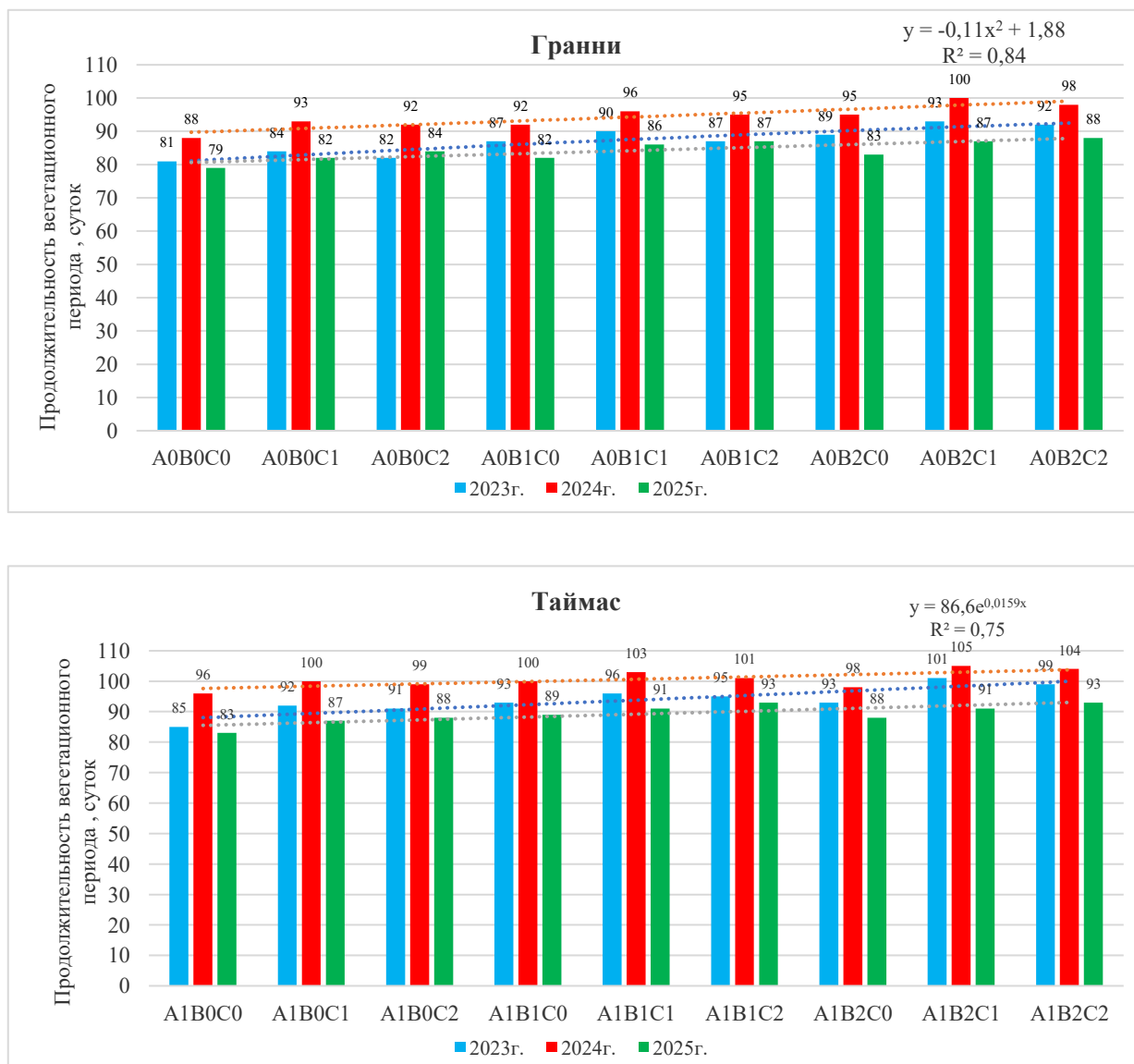
Примечание; А₀ - сорт Гранни, А₁ - сорт Таймас; В₀ - контроль без обработки комплексным средством, В₁ - обработка семян комплексным средством, В₂ - обработка комплексным средством семян и посевов; С₀ - контроль без обработки почвы; С₁ - прикатывание почвы после посева; С₂ - прикатывание почвы после посева+ боронование почвы в период кущения.

Рисунок 16 - Продолжительность межфазных периодов пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, суток, среднее 2023-2025 гг.

Продолжительность данной фазы составила в среднем 21,3 суток. У сорта Гранни длительность периода «кущение - выход в трубку» достигала 15-16 суток, тогда как у сорта Таймас этот показатель был меньше в среднем на 0,44 суток.

В свою очередь, межфазный период «колошение - молочная спелость» у сорта Таймас проходил на один день быстрее, чем у сорта Гранни. Применение комплексных средств способствовало удлинению межфазных периодов в среднем на 1 сутки. Аналогичные тенденции были выявлены в периодах «молочная - восковая спелость» и «восковая - полная спелость».

Наибольшая общая продолжительность вегетационного периода была зафиксирована в 2024 году и составила в среднем 97,5 суток (рисунок 17).



Примечание; А₀ - сорт Гранни, А₁ - сорт Таймас; В₀ - контроль без обработки комплексным средством, В₁ - обработка семян комплексным средством, В₂ - обработка комплексным средством семян и посевов; С₀ - контроль без обработки почвы; С₁ - прикатывание почвы после посева; С₂ - прикатывание почвы после посева+ боронование почвы в период кушения.

Рисунок 17 - Продолжительность вегетационных периодов сортов пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, суток, среднее 2023-2025 гг.

Это связано с тем, что умеренный температурный режим и обильные осадки в виде дождя в период спелости зерна яровой мягкой пшеницы способствовали растяжению фаз развития растений. В 2023 и 2025 годах вегетационный период был короче - в среднем 90,5 и 86,7 дней соответственно. В среднем за три года исследования продолжительность вегетационного периода составила по сорту Гранни 88,6 суток, а по сорту Таймас - 94,6 календарных дней.

Анализ данных по вариантам опыта показывает, что у обоих сортов применение комплексных средств для обработки семян и посевов увеличивало длительность вегетационного периода на 2-3 суток по сравнению с контролем. Предпосевная обработка комплексным препаратом, содержащим микроэлементы, полисахариды и фитогормон, увеличивала продолжительность вегетации до 87,0-90,7 суток, особенно в сочетании с прикатыванием (до 90,7 суток). Данный эффект отражает пролонгацию процессов формирования урожая под действием биостимулирующих компонентов препарата.

Прикатывание посевов после посева также вносило вклад в удлинение онтогенеза. Прикатывание после посева увеличивало вегетационный период на 3,6-5 суток, а боронование в фазу кущения - на 3,9-5,3 суток. В частности, прикатывание способствовало удлинению фаз «кущение - выход в трубку» и «молочная - восковая спелость», что связано с улучшением контакта семян с почвой, повышением влагоёмкости верхнего слоя и более равномерным развитием вегетативной массы.

При сочетании всех исследуемых агротехнологических приёмов (вариант В₂С₂) вегетационный период удлинялся наиболее существенно - на 10,6–11 суток. Максимальные значения продолжительности вегетационного периода отмечены у сорта Гранни - до 100 суток, и у сорта Таймас - до 104 суток. В этом варианте наблюдалось значительное удлинение периодов наливания и созревания зерна (до 11-11,7 суток), что свидетельствует о более интенсивном метаболизме и активной ассимиляции пластических веществ в поздний период вегетации.

Таким образом, результаты трёхлетних исследований показали, что применение комплекса агротехнических мероприятий (обработка семян и посевов комплексным стимулирующим средством, прикатывание и боронование) существенно увеличивает продолжительность межфазных периодов и суммарный вегетационный период у всех изучаемых сортов. Наиболее продолжительный вегетационный период был отмечен в варианте, предусматривающем сочетание предпосевной обработки семян комплексным средством, прикатывания посевов, листовой подкормки и боронования в фазу кущения. Указанный комплекс мероприятий обладает выраженным стимулирующим действием на ростовые и генеративные процессы, что определяет его значимость при разработке ресурсосберегающих и высокоэффективных технологий возделывания яровой мягкой пшеницы.

3.3.2 Густота стояния растений сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от агротехнических мероприятий

Густота стояния растений является одним из ключевых показателей агрофитоценоза, определяющих состояние его компонентов, уровень их конкурентных взаимоотношений и служащих косвенной характеристикой продуктивности посевов. Одним из важнейших факторов формирования урожайности мягкой пшеницы выступает оптимальная густота стояния растений при их равномерном размещении на площади питания. Такое размещение обеспечивает наиболее рациональное использование почвенной влаги, элементов минерального питания и солнечной радиации. Установлено, что между обеспеченностью почвы влагой, густотой стояния растений и уровнем урожайности пшеницы существует прямая зависимость, что подтверждает необходимость научно обоснованного регулирования данного агротехнического приёма [1180,181].

Результаты полевых исследований показали, что на полевую всхожесть, густоту стояния, сохранность и адаптивность растений яровой мягкой пшеницы оказывают существенное воздействие сортовые особенности, предпосевная обработка семян и посевов комплексными стимулирующими средствами, а также способы поверхностной обработки почвы после посева.

Семена сорта Таймас, высеянные с нормой 320 шт./м², в 2023 году обеспечили формирование 270-277 всходов на 1 м²; в 2024 году данный показатель составил 265-283 шт./м², а в 2025 году 229-237 шт./м² (приложения 4, 5). По результатам экспериментов установлено, что наибольшее количество всходов мягкой пшеницы в среднем за три года отмечено у сорта Таймас - 262,2 шт./м², тогда как наименьшее у сорта Гранни, в среднем 241,1 шт./м².

В зависимости от условий года исследований, густота стояния растений яровой мягкой пшеницы перед уборкой существенно различалась в зависимости от применяемых агротехнологических мероприятий. Исследования показали, что сортовые особенности, использование комплексных средств для обработки семян и посевов, а также поверхностная обработка почвы оказывает значительное влияние на количество растений перед уборкой. В 2023 году количество растений перед уборкой по сорту Таймас составил в среднем 212-241 шт/м², 2024 году – 168-201 шт/м² и в 2025 году – 190-211 шт/м². Для сорта Гранни по количеству растений перед уборкой 2023 год также был оптимальным.

Независимо от генотипа растений при одинаковой норме высева и различия погодных условий в годы исследований, полевая всхожесть яровой мягкой пшеницы в 2023 году составила 87,4 %, в 2024 году - 83,0 %, в 2025 году - 67,5 % (таблица 11). Снижение полевой всхожести семян в 2025 году тесно связано с использованием низких посевных качеств семян. Это связано с тем, что обильные осадки (88,0 мм) и пониженная температура воздуха (9,74 °С) в предуборочный период 2024 года негативно повлияли на

формирование качества семенного материала. Необходимо отметить, что только применение комплексных средств для обработки семян яровой мягкой пшеницы способствует повышению полевой всхожести от 1,8 до 3,7%.

Проведение прикатывания почвы после посева, по сравнению с контрольным вариантом опыта, способствовал повышению всхожести на 1,6-2,3% независимо от сортовых особенностей.

Таблица 11 - Полевая всхожесть и сохранность растений сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от разных агротехнических мероприятий

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	Полевая всхожесть, %			Сохранность, %		
			2023 год	2024 год	2025 год	2023 год	2024 год	2025 год
А ₀	В ₀	С ₀	84,4	82,8	71,49	78,5	64,4	83,07
		С ₁	86,4	86,3	72,21	81,5	60,9	86,14
		С ₂	86,7	85,7	72,24	84,5	68,7	89,44
	В ₁	С ₀	84,6	86,5	72,22	80,9	69,4	86,28
		С ₁	86,3	88,5	73,21	82,9	67,6	87,69
		С ₂	86,5	87,8	73,99	85,2	70,8	88,43
	В ₂	С ₀	84,9	86,4	72,14	82,4	63,6	87,44
		С ₁	86,4	87,1	73,48	85,3	71,6	88,56
		С ₂	86,4	88,5	74,16	87,4	70,9	90,77
А ₁	В ₀	С ₀	86,3	74,4	57,92	80,8	73,1	86,53
		С ₁	88,0	78,1	60,91	83,5	72,6	89,09
		С ₂	90,1	79,1	60,86	85,5	76,7	89,53
	В ₁	С ₀	86,7	78,4	62,49	82,7	76,1	90,9
		С ₁	88,7	82,4	63,76	85,3	78,5	91,02
		С ₂	91,9	82,9	63,79	86,1	77,4	90,8
	В ₂	С ₀	87,2	78,9	62,64	84,5	73,2	91,32
		С ₁	89,6	80	63,38	86,5	74,1	92,23
		С ₂	92,4	80,4	64,97	87,8	77,4	93,48
Дисперсия, S ²			0,53	1,82	3,17	0,62	2,55	0,66
Коэффициент вариации, V %			0,83	1,63	2,63	0,94	2,23	0,91
Относительная ошибка выборочной средней, S _x %			1,01	4,38	7,47	3,27	6,27	3,00

Климатическая устойчивость растений определяется сохранностью и адаптивностью растений к окружающей среде. В течение вегетационного периода яровых сортов мягкой пшеницы плотность посадки снижается, что вызвано гибелью растений вследствие внутривидовой конкуренции за свет, влагу и питательные вещества, а также периодической атмосферной и почвенной засухой в зоне нестабильного увлажнения, когда культуры страдают от недостатка влаги в почве.

Снижение количества растений яровой мягкой пшеницы в течение вегетации наблюдалось во всех вариантах опыта. В том числе в 2023 году по сорту Таймас уменьшение количества растений составил в среднем 46,1 шт./м², по сорту Гранни – 54,4; в 2024 году соответственно 89 - 61,3 шт./м² и в 2025 году – 87,5-90,5 шт./м². Уменьшение количества растений в период вегетации существенно отличалось между сравниваемыми технологиями.

У исследуемых вариантов опыта сохранность растений сортов яровой мягкой пшеницы в условиях ТОО «Найдоровское» варьировала в пределах от 60,9 до 93,48%. При этом наилучшим показателем сохранности растений отмечен вариант: обработка семян и посева с комплексным стимулирующим средством в сочетании с прикатыванием почвы после посева и боронованием в период кушение яровой мягкой пшеницы.

Результаты полевого эксперимента показали, что применение предпосевной обработки семенного материала комплексным стимулирующим средством способствовал улучшению адаптивной способности растений сортов пшеницы в течение вегетации (рисунок 18).

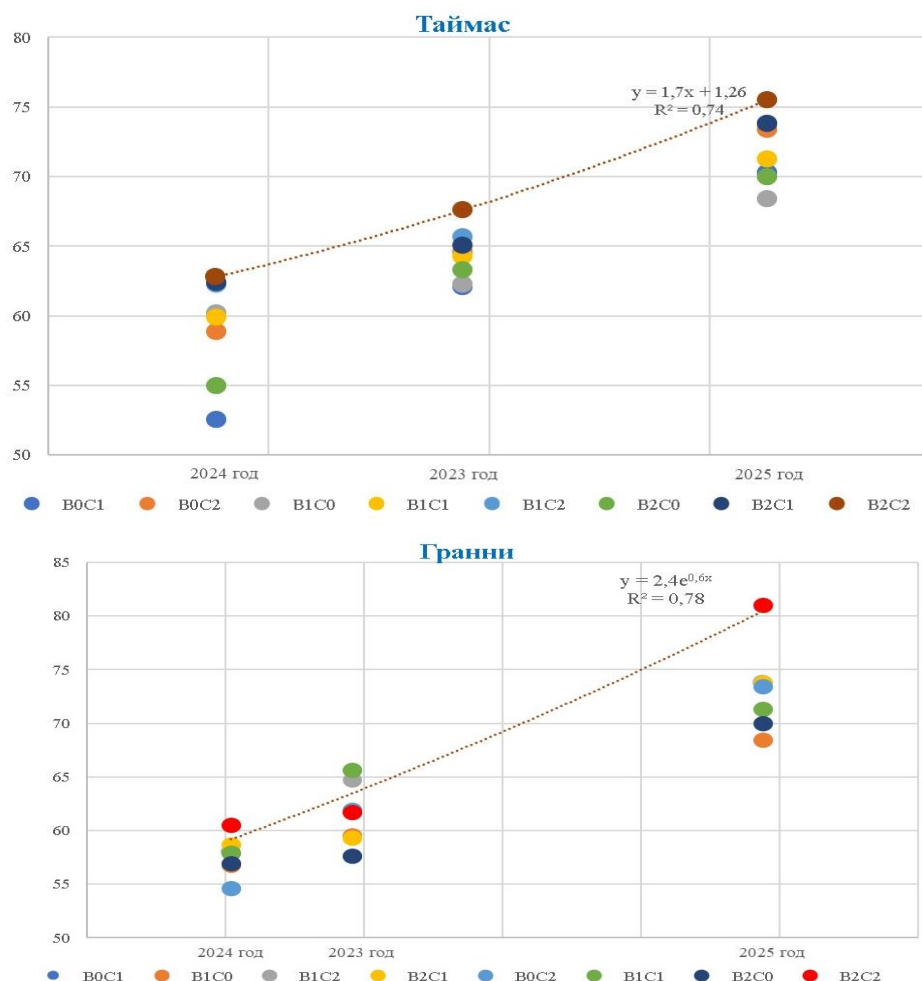


Рисунок 18. Адаптивность растений сортов пшеницы в зависимости от различных агротехнологических мероприятий, в среднем за 2023-2025гг.

Вариация адаптивности сорта Гранни было несколько больше, чем у сорта Таймас. Это означает, что сорт Гранни очень чувствителен к изменению климата во внешней среде. По адаптивности среди вариантов выделились вариант В₂С₂, по сравнению с контрольным вариантом: адаптивная способность растений оказалась выше на 8,82 % у сорта Таймас и у сорта Гранни - на 9,66 %.

Обработка статистических данных за три года полевых исследований свидетельствует о том, что количество растений перед уборкой тесно зависит от сохранности и адаптивности растений. В исследованиях корреляционная матрица показывает, что климатическая устойчивость растений яровой мягкой пшеницы связана с полевой всхожестью, имеется сильная положительная корреляционная зависимость ($r=0,84-0,97$), особенно по сорту Гранни.

	Количество растений перед уборкой	Количество посеянных семян	Густота стояния растений по всходам	Полевая всхожесть, %	Сохранность, %	Адаптивность, %
Количество растений перед уборкой	1,00	-0,27	0,14	0,14	0,75	0,92
Количество посеянных семян	-0,27	1,00	0,02	-0,03	-0,07	-0,07
Густота стояния растений по всходам	0,84	-0,03	1,00	0,97	-0,55	0,14
Полевая всхожесть, %	0,84	0,03	0,98	1,00	-0,55	0,14
Сохранность, %	0,72	-0,15	-0,36	0,73	1,00	0,91
Адаптивность, %	0,87	-0,11	0,84	0,84	0,94	1,00
	- сорт Таймас					
	- сорт Гранни					

Рисунок 19. Корреляционная матрица показателей густоты стояния растений

Количество посеянных семян характеризовалось слабым и отрицательным уровнем корреляционных связей ($r=0,989$) с густотой стояния растений. В годы исследований самая большая густота стояния растений и лучшая их сохранность и адаптивность во всех вариантах опыта наблюдались в 2024 году, когда в течение вегетации яровой мягкой пшеницы выпадали более равномерные осадки (230 мм) со средней температурой 16,0⁰С.

3.3.3 Биометрические параметры посевов сорта яровой мягкой пшеницы в зависимости от изучаемых агроприёмов

Существенная роль в формировании урожайности растений принадлежит фотосинтезу. Фотосинтетический процесс протекает в основном в зелёных пигментах, поэтому его интенсивность зависит в большей степени от объёма площади листьев и продолжительности её функционирования за вегетационный период.

Формирование листовой поверхности растений в значительной степени обусловлено световым режимом, уровнем влагообеспеченности, минеральным питанием и применяемыми технологиями возделывания [182,183]. Результаты проведённых исследований свидетельствуют о том, что площадь ассимиляционной поверхности варьировала в зависимости от погодных условий вегетационного периода, биологических особенностей сортов и применяемых агротехнических приёмов (приложение 6).

Увеличение площади поверхности листьев растений яровой пшеницы в исследуемый период продолжалось до фазы колошения. Максимальный объём площади листовой поверхности в этот период у сорта Таймас достигал до 29,44 тыс. м²/га, у сорта Гранни до 23,47 тыс. м²/га. Индекс листовой поверхности в этот период достигал до 2,74 м²/м² в варианте с предпосевной обработкой семян комплексным средством, прикатыванием посевов, листовой подкормкой и боронованием (рисунок 20). Необходимо отметить, что сорт Таймас оказался более облиственным по сравнению с сортом Гранни.

Сравнительный анализ прироста листового аппарата у растений яровой пшеницы по годам показал, что максимальных значений он достиг в 2024 году. В 2023 году площадь листьев у сорта Таймас сформировалась меньше на 3,87 тыс.м²/га, у сорта Гранни - 1,6 тыс.м²/га по сравнению с 2024 годом. В 2025 году площадь листьев у сорта Таймас была меньше на 1,51тыс.м²/га, а у сорта Гранни на 0,65 тыс.м²/га по сравнению 20204 годом.

Увеличение индекса листовой поверхности было зафиксировано при применении всех изучаемых агроприёмов, в том числе только за счёт обработки семян комплексным средством - 0,27-0,46 м²/м², проведения прикатывания почвы после посева - 0,16-0,38 м²/м², боронования в период кушения -0,14-0,33 м²/м².

Проведённые наблюдения за ростом и развитием сортов яровой мягкой пшеницы в период вегетации позволили установить, что во все годы исследований динамика накопления сухого вещества до фазы выхода растений в трубку, независимо от сортовых особенностей и изучаемых агроприёмов, протекает сравнительно слабо. Интенсивное увеличение сухого вещества наблюдалось с начала выхода в трубку (в среднем – 183,54 г/м²) и продолжалось до начала цветения (в среднем - 513,19г/м²), потом темпы нарастания сухой надземной биомассы пшеницы замедляются.

Максимальная величина сухой биомассы отмечалась у сорта Таймас (678,02 г/м²) и у сорта Гранни (445,11 г/м²) при варианте опыта с предпосевной обработкой семян комплексным средством, прикатыванием посевов и листовой подкормкой комплексным средством. Проведение дополнительного агротехнического приёма не способствовало увеличению сухой массы яровой мягкой пшеницы.



Рисунок 20. Индекс листовой поверхности сортов яровой мягкой пшеницы

Формирование объёма листовой поверхности, а также длительность её функционирования в процессе фотосинтеза оказали значительное воздействие на величину фотосинтетического потенциала (ФП) в разных исследуемых вариантах полевого опыта. По результатам полевых опытов ФП посевов пшеницы колебался по годам и зависел от сортовых особенностей, от применяемых агротехнических мероприятий, в том числе от обработки семян и посевов комплексным стимулирующим средством, от прикатывания и боронования в период кущения мягкой пшеницы (таблица 12).

Таблица 12 - Фотосинтетический потенциал посевов пшеницы в зависимости от изучаемых агроприемов

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	Фотосинтетический потенциал посевов за вегетацию, тыс. м² сут./га											
			кущение			выход в трубку			колошение			молочная спелость		
			2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
А₀	В₀	С₀	245,4	300,26	342,81	734,72	816,58	847,8	1184,11	1246,59	1387,52	768,23	706,65	979,66
		С₁	253,1	294,53	325,09	747,96	838,92	889,8	1213,44	1280,7	1456,32	862,26	729,25	1075,73
		С₂	247,96	308,45	313,6	739,16	864,64	884,6	1189,65	1319,95	1447,89	929,93	761,46	1119,95
	В₁	С₀	251,35	335,44	342,54	744,92	907,58	847,24	1198,45	1385,51	1386,67	890,86	791,87	999,53
		С₁	258,37	313,71	297,34	756,96	948,42	863,96	1229,65	1447,86	1413,92	952,32	904,3	1094,35
		С₂	259,12	303,61	280,82	758,24	967,66	880,88	1267,2	1477,23	1441,6	993,42	948,54	1143,71
	В₂	С₀	248,83	323,36	337,97	740,72	942,7	895,64	1193,92	1439,12	1465,87	892,81	901,49	1098,9
		С₁	262,69	309,33	279,16	764,44	985,69	901,28	1253,23	1504,76	1474,99	928,06	964,57	1146,35
		С₂	258,86	304,61	268,03	757,84	1057,84	889,92	1315,63	1614,9	1456,43	979,26	1016,87	1147,81
	Среднее		253,96	310,37	309,71	749,44	925,56	877,90	1227,25	1412,96	1436,80	910,79	858,33	1089,55
А₁	В₀	С₀	224,65	263,04	288,86	644,56	665,06	640,28	936,48	1041,59	1059,89	815,17	760,12	845,02
		С₁	234,06	255,27	253,12	660,6	677,66	654,76	969,97	1061,31	1084	853,09	897,86	855,95
		С₂	241,92	251,58	260,26	674,2	727,4	674,76	1014,08	1139,22	1116,85	858,29	971	899,8
	В₁	С₀	238,42	298,8	291,74	668,24	690,07	608,12	990,72	1080,75	1006,67	815,82	737,75	907,72
		С₁	242,11	312,82	316,38	674,56	696,38	650,8	1042,24	1090,65	1077,33	817,27	773,2	956,27
		С₂	256,99	272,85	277,4	700,08	744,65	680,4	1124,75	1166,24	1126,4	851,5	896,7	979,66
	В₂	С₀	248,1	282,34	284,04	684,8	707,71	615,52	1039,15	1108,39	1018,83	826,08	785,32	828,3
		С₁	253,21	306,8	314,65	693,52	766,31	687,2	1133,6	1200,16	1137,6	881,76	839,12	891,88
		С₂	255,08	234,94	261,85	696,72	799,21	743	1197,17	1251,69	1229,81	996,23	897,07	937,13
	Среднее		243,84	275,38	283,14	677,48	719,38	661,65	1049,80	1126,67	1095,26	857,25	754,24	900,19
Коэффициент вариации, V %			1,3	0,9	1,0	0,6	1,5	1,5	1,0	1,4	1,4	0,8	1,2	1,1
Средняя арифметическая ошибка, S _x			0,7	0,6	0,7	0,9	2,9	2,7	2,7	4,1	4,3	1,6	2,4	2,6
Относительная ошибка, S _x %			3,0	2,2	2,3	1,3	3,5	3,5	2,3	3,2	3,4	1,8	2,9	2,7

Как видно из таблицы 11, максимальная величина фотосинтетического потенциала наблюдалась в период колошения во всех годах исследований. Величина фотосинтетического потенциала менялась как по фазам развития растений, так и по агротехническим мероприятиям, проводимым в период вегетации яровой мягкой пшеницы (рисунок 21).

С увеличением ассимиляционной поверхности листьев и продолжительности фаз развития растений сортов яровой пшеницы возрастал и фотосинтетический потенциал в исследуемых вариантах опыта.

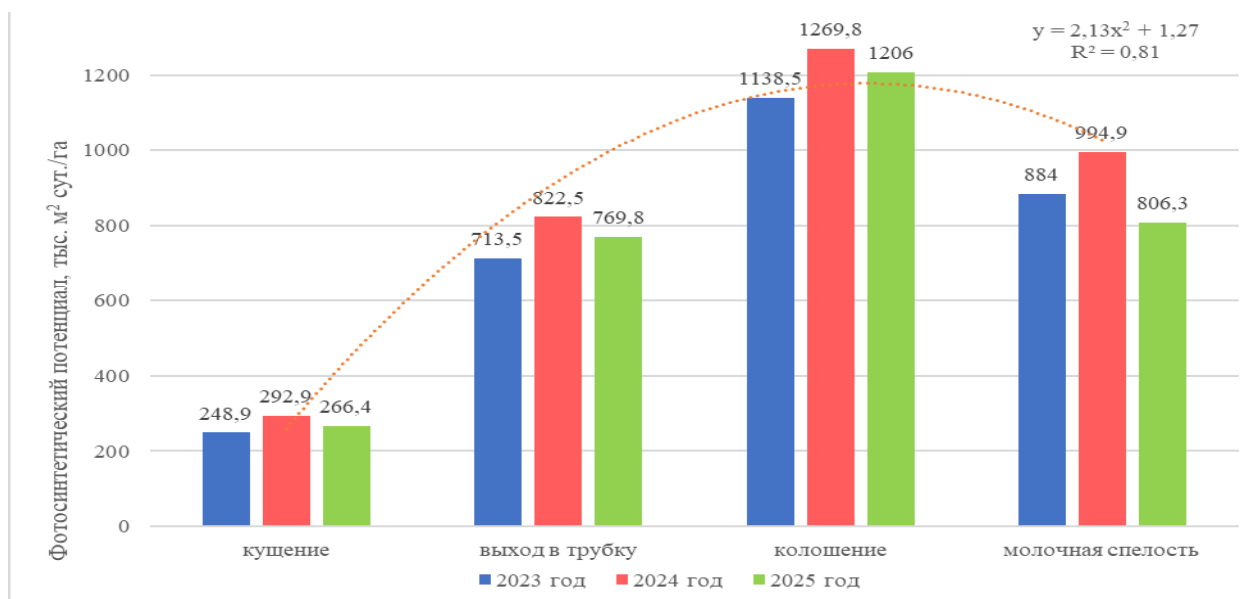


Рисунок 21. Динамика фотосинтетического потенциала посевов яровой мягкой пшеницы

Наивысшая величина фотосинтетического потенциала посевов яровой пшеницы зафиксирована в 2024 году в комбинации вариантов $A_0B_2C_2$ (1614,9 тыс. м² сут./га) и $A_1B_2C_2$ (1251,69 тыс. м² сут./га). Большое влияние на фотосинтетический потенциал растений сортов яровой мягкой пшеницы оказали обработка комплексным средством семян и посевов и погодные условия. Ошибка среднего арифметического значения фотосинтетического потенциала, в зависимости от фазы развития и года проведения опыта, составила в пределах 0,6-4,3 ед., а коэффициент вариации - 0,6-1,5%.

Учитывая данные трёхлетних полевых экспериментов, можно прийти к выводу: значения величины фотосинтетического потенциала растений сортов яровой мягкой пшеницы тесно связаны с особенностями генотипа, обработкой комплексным стимулирующим средством и поверхностными обработками почвы.

Средние показатели чистой продуктивности фотосинтеза посевов яровой пшеницы за 3 года полевых исследований характеризовались сравнительно невысокими значениями (таблица 13).

Таблица 13 - Чистая продуктивность фотосинтеза яровой пшеницы в зависимости от изучаемых агроприемов

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	Чистая продуктивность фотосинтеза, г/м ² в сутки											
			кущение			выход в трубку			колошение			молочная спелость		
			2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
А ₀	В ₀	С ₀	1,52	2,18	1,81	1,84	2,95	2,12	1,49	3,26	2,03	2,7	2,63	2,44
		С ₁	1,52	2,15	1,78	1,83	3,11	2,16	1,57	3,43	2,06	2,7	2,77	2,17
		С ₂	1,76	2,3	1,87	1,96	3,54	2,28	1,78	3,9	2,18	2,67	2,82	2,04
	В ₁	С ₀	1,65	2,41	1,87	1,9	3,52	2,33	1,69	3,88	2,23	2,57	2,89	2,25
		С ₁	1,42	2,13	1,92	1,77	3,01	2,22	1,5	3,32	2,12	2,31	2,33	2,11
		С ₂	1,58	2,44	1,99	1,86	3,52	2,26	1,68	3,88	2,16	2,49	2,6	1,97
	В ₂	С ₀	1,65	2,18	1,84	1,91	3,2	2,38	1,72	3,53	2,27	2,57	2,29	2,09
		С ₁	1,41	2,29	1,93	1,77	3,3	2,14	1,51	3,64	2,04	2,55	2,47	2,02
		С ₂	1,74	2,13	1,96	1,95	2,82	2,21	1,84	3,11	2,11	2,91	2,17	1,98
	Среднее		1,58	2,25	1,89	1,87	3,22	2,23	1,64	3,55	2,13	2,61	2,55	2,12
А ₁	В ₀	С ₀	1,81	1,98	2,07	2,19	2,9	2,79	1,9	3,12	2,63	2,39	1,98	2,22
		С ₁	1,79	1,9	2,1	2,16	2,86	2,55	1,93	3,07	2,41	2,66	1,97	2,24
		С ₂	1,76	1,84	1,91	2,13	2,61	2,38	1,94	2,8	2,25	2,87	1,85	2,13
	В ₁	С ₀	1,73	1,78	1,95	2,12	2,94	2,75	1,81	3,16	2,6	2,63	1,95	2,09
		С ₁	1,75	1,72	1,79	2,13	3,2	2,84	1,91	3,43	2,69	2,69	1,9	2,04
		С ₂	1,69	1,8	1,78	2,08	2,84	2,46	1,86	3,05	2,32	2,9	1,87	1,92
	В ₂	С ₀	1,69	1,61	1,72	2,09	2,49	2,49	1,82	2,67	2,35	2,75	1,61	2,16
		С ₁	1,7	1,76	1,68	2,09	2,79	2,56	1,81	3,0	2,42	2,67	2,08	2,17
		С ₂	1,73	1,88	1,73	2,1	2,32	2,21	1,85	2,49	2,09	2,83	1,73	2,12
	Среднее		1,74	1,81	1,86	2,12	2,77	2,56	1,87	2,98	2,42	2,71	1,88	2,12
Коэффициент вариации, V %			7,34	12,38	6,28	7,13	11,53	9,47	8,61	12,46	9,06	6,18	17,95	5,80
Средняя арифметическая ошибка, S _x			0,03	0,06	0,03	0,03	0,08	0,05	0,04	0,10	0,05	0,04	0,09	0,03
Относительная ошибка, S _x %			1,73	2,92	1,48	1,68	2,72	2,23	2,03	2,94	2,14	1,46	4,23	1,37

Максимальное значение величины чистой продуктивности фотосинтеза посевов яровой пшеницы (по сорту Таймас - 3,11-3,88 г/м² в сутки, по сорту Гранни - 2,49- 3,43 г/м² в сутки) было зафиксировано в фазу колошение. По нашему мнению, это связано с тем, что в данную фазу развития растения яровой пшеницы отличаются относительно высокой площадью листовой поверхности и объёмной биомассой.

Наибольшее значение чистой продуктивности фотосинтеза зафиксировано по сорту Таймас в 2024 году в комбинации варианта А0В0С2 (3,9 г/м²) и по сорту Гранни в комбинации варианта А₁В₁С₁ (3,43 г/м²).

Более высокими значениями чистой продуктивности фотосинтеза в период колошение яровой мягкой пшеницы характеризовался сорт Таймас (3,55 г/м² в сутки), по сравнению с сортом Гранни (2,98 г/м² в сутки).

Минимальные значения показателей продуктивности функционирования листового аппарата растений сортов яровой пшеницы во всех изучаемых вариантах опыта были зафиксированы в 2023 году. Показатели относительной ошибки выборочной средней ($S_x=1,37-4,23\%$) свидетельствуют о высокой достоверности полученных данных и указывают на то, что уровень чистой продуктивности фотосинтеза в значительной степени зависел от прохождения фаз развития растений, климатических особенностей года исследований и от изучаемых агроприемов.

3.3.4 Влияние агротехнических мероприятий на урожайность сортов яровой мягкой пшеницы

Основным интегральным показателем эффективности применяемых агротехнических приёмов выступает урожайность сельскохозяйственной культуры. Её уровень определяется не только биологическими особенностями сорта, но и совокупностью факторов среды произрастания. Урожайность не является абсолютной и стабильной характеристикой генотипа; она отражает результат взаимодействия наследственно обусловленных свойств растений с конкретными почвенно-климатическими и агротехнологическими условиями. Иными словами, величина урожая представляет собой фенотипическое проявление генетического потенциала сорта в определённых условиях внешней среды. Поэтому формирование продуктивности растений необходимо рассматривать одновременно с теми факторами, от которых зависит величина урожая зерна [184, 185].

На продуктивность сортов яровой мягкой пшеницы огромное влияние оказывали не только сортовая особенность, но и сложившиеся погодные условия, обработка комплексным средством семян и посевов и поверхностная обработка почвы после посева (таблица 14).

Урожайность яровой пшеницы по годам исследований варьировалась от 16,8 до 40,04 ц/га. Наиболее высокий урожай зерна яровой мягкой пшеницы

получен в 2024 году. Вследствие сильной засухи во время вегетации пшеницы низкая урожайность сформировалась в 2023 году (таблица 14).

Результаты наших полевых исследований подтверждают необходимость выбора сорта для возделывания его в конкретных почвенно-климатических условиях по засухоустойчивости. За годы исследований средняя урожайность сорта Таймас составил - 30,02 ц/га, а по сорту Гранни - 27,14 ц/га.

Таблица 14 - Урожайность сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от применяемых агротехнических мероприятий

Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	Фактическая урожайность, ц/га				
		2023 г.	2024 г.	2025 г.	средняя за 2023-2025 гг.	отклонение, ±
по сорту Таймас						
В ₀	С ₀	16,8	34,62	28,63	26,68	-
	С ₁	19,21	35,71	31,66	28,86	+2,18
	С ₂	21,57	36,23	32,53	30,11	+3,43
В ₁	С ₀	18,36	36,43	29,36	28,05	+1,37
	С ₁	21,77	37,87	31,81	30,48	+3,80
	С ₂	23,87	38,14	32,31	31,44	+4,76
В ₂	С ₀	19,11	37,02	31,87	29,33	+2,65
	С ₁	24,38	38,92	33,42	32,24	+5,56
	С ₂	25,34	40,04	33,71	33,03	+6,35
Средняя		21,16	37,22	31,7		
по сорту Гранни						
В ₀	С ₀	18,56	25,91	25,77	23,41	-
	С ₁	22,13	27,86	26,01	25,33	+1,92
	С ₂	25,07	30,01	27,08	27,39	+3,97
В ₁	С ₀	21,11	29,44	27,15	25,90	+2,49
	С ₁	22,92	32,02	28,01	27,65	+4,24
	С ₂	23,37	34,14	29,22	28,91	+5,50
В ₂	С ₀	22,07	30,25	27,46	26,59	+3,18
	С ₁	24,41	33,27	28,73	28,80	+5,39
	С ₂	25,18	36,01	29,65	30,28	+6,87
Средняя		22,76	31,0	27,68		
НСР ₀₅ - общая		0,29	1,42	0,78		

В зависимости от применяемых агротехнических мероприятий прибавка урожая наблюдалась во всех вариантах опыта от 1,37 до 6,87 ц/га. Независимо от сортовых особенностей наибольший уровень урожайности яровой мягкой пшеницы получен в вариантах В₂С₂.

Урожайность зерна пшеницы представляет собой интегральный количественный показатель, формирование которого обусловлено совокупным воздействием ряда взаимосвязанных структурных элементов. На различных уровнях организации растения её величина определяется морфологическими параметрами, регулирующими продукционный процесс и

степень реализации генетически обусловленного потенциала культуры в конкретных условиях возделывания. Все элементы структуры урожая сортов яровой мягкой пшеницы находились в зависимости, как от сортовых особенностей, так и от обработки комплексным стимулирующим средством и поверхностной обработки посева.

К числу ключевых элементов структуры урожая яровой пшеницы относится густота продуктивного стеблестоя, которая рассматривается как один из определяющих факторов формирования потенциальной урожайности культуры. В среднем за 3 года к уборке пшеницы на 1 м² сохранилось от 171 до 260 продуктивных стеблей (таблица 15).

Наивысшим коэффициентом продуктивной кустистостью отличался 2024 год, в котором создавались оптимальные условия для роста и развития. Коэффициент продуктивной кустистости находился в пределах - 2,1-2,7 единиц. Наименее продуктивные колосья пшеницы на всех вариантах были сформированы в 2023 году. По появлению продуктивных стеблей ярко проявилось влияние комплексных средств.

Все элементы структуры главного колоса, такие как: количество колосков и зёрен, вес зерна, а также продуктивность одного растения в целом имели более высокие показатели на варианте, где проведена комплексная обработка семян и посевов комплексным стимулирующим средством в сочетании с проведением прикатывания и боронования посевов пшеницы.

По результатам полевых экспериментов, проведённых в 2023-2025 гг. в условиях ТОО «Найдоровское», нами было установлено, что значение озернённости колоса варьировалось в пределах 20,1-39,9 зёрен. В 2023 году число зёрен в колосе составило в среднем от 29,4 до 33,6 шт., в 2024 - от 20,1 до 26,8 шт., а в 2025 - от 28,8 до 39,9 зёрен.

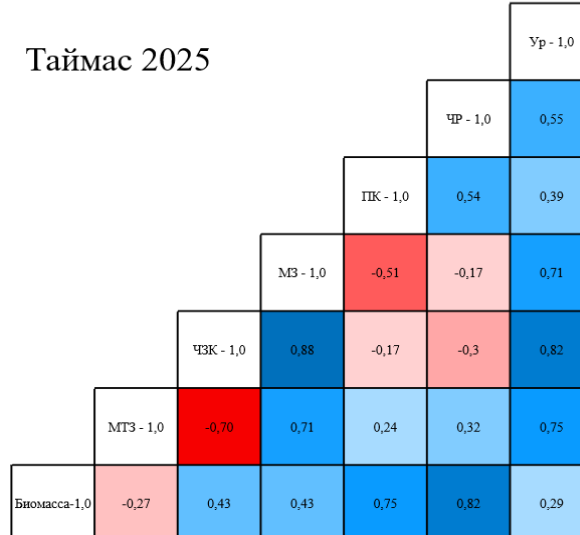
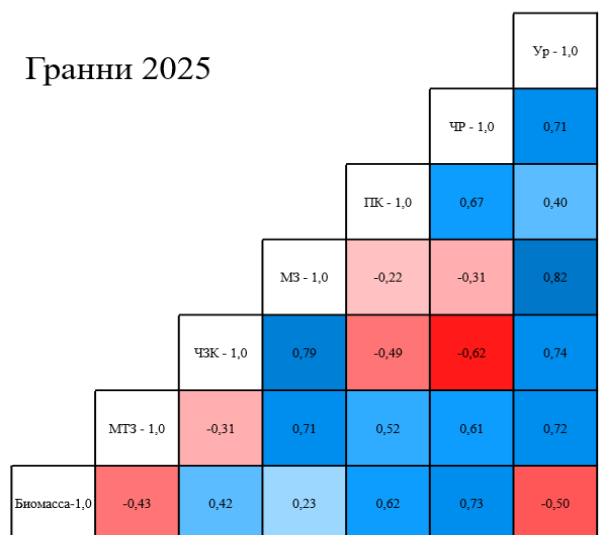
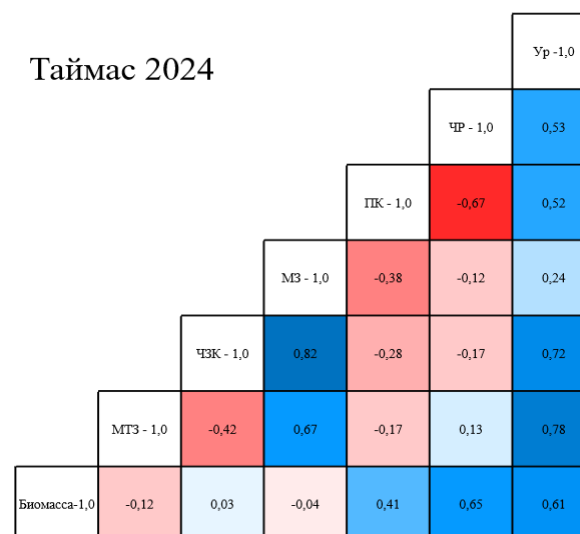
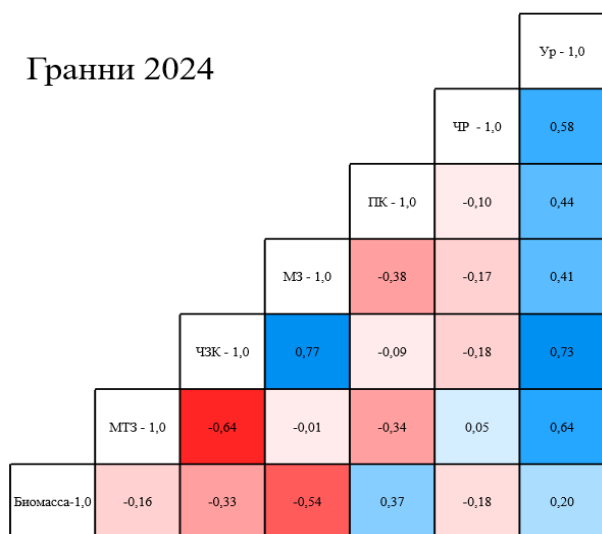
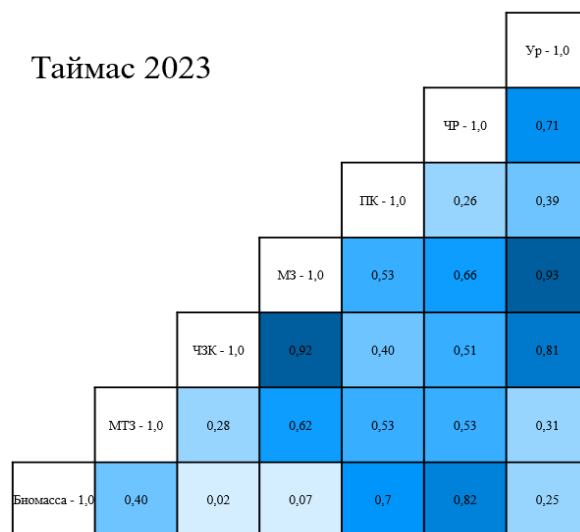
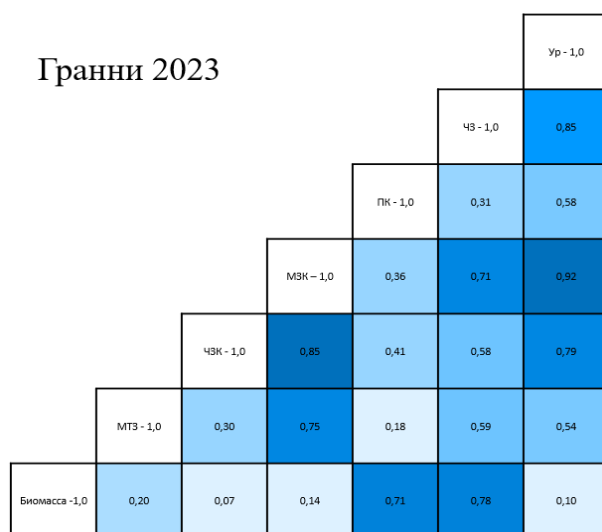
Одним из ключевых показателей продуктивности колоса яровой мягкой пшеницы является масса 1000 зёрен, характеризующая степень выполненности и налива зерна. По результатам трёхлетних полевых исследований, средние значения данного показателя варьировали в пределах 29,4 - 36,6 г, в зависимости от вариантов полевого эксперимента. Установлено, что величина массы 1000 зёрен определяется генотипическими особенностями сорта, условиями возделывания и применяемыми элементами агротехнологии, а также характером их взаимодействия. Более выполненные зёрна формировались (по сорту Таймас- 36,6 г., по сорту Гранни - 33,6г) в варианте, где проведена обработка семян и посевов комплексным средством и поверхностная обработка посева пшеницы.

Усреднённые данные за все годы полевых исследований показывают, что величина массы зерна с одного колоса составляла 0,67-0,97 г. В 2023 и 2024 году этот показатель составил 0,67-0,95 и 0,56- 0,92 г соответственно.

В зависимости от сортовых особенностей яровой мягкой пшеницы и от применяемых агротехнических мероприятий компоненты урожайности демонстрировали различную степень взаимосвязи (рисунок 22).

Таблица 15 – Структурные показатели биологической урожайности сортов яровой мягкой пшеницы за 2023-2025 годы в зависимости от применяемых агротехнических мероприятий

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	Число растений, шт			Продуктивная кустистость			Масса 1000 зерен, шт			Число зёрен в колосе, шт		
			2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
А ₀	В ₀	С ₀	212,0	174,7	190,2	1,2	2,2	1,5	32,2	32,1	30,7	21,7	23,3	33,4
		С ₁	225,0	183,7	198,7	1,3	2,2	1,6	33,2	32,3	31,1	22,0	22,6	32,1
		С ₂	235,0	198,2	206,8	1,3	2,1	1,6	33,6	32,5	31,9	22,3	23,6	31,6
	В ₁	С ₀	219,0	190,3	199,3	1,2	2,3	1,6	32,8	33,6	31,4	22,2	20,1	31,3
		С ₁	228,0	209,9	205,8	1,3	2,1	1,7	33,6	31,9	32,0	23,1	24,5	29,9
		С ₂	236,0	206,9	210,2	1,3	2,2	1,7	34,1	31,5	32,6	23,8	23,4	29,3
	В ₂	С ₀	224,0	184,2	202,7	1,3	2,3	1,7	33,2	32,0	31,7	22,2	24,1	32,3
		С ₁	236,0	189,9	208,2	1,3	2,4	1,8	33,8	30,4	31,1	23,8	26,8	31,5
		С ₂	242,0	197,4	216,2	1,3	2,4	1,8	34,8	33,6	32,6	24,9	24,2	28,8
А ₁	В ₀	С ₀	222,4	170,7	160,8	1,3	2,6	1,3	29,4	34,7	31,6	24,3	24,8	39,9
		С ₁	234,3	171,1	174,3	1,3	2,7	1,4	30,1	36,4	32,7	26,1	22,8	39,0
		С ₂	246,8	187,6	174,6	1,3	2,3	1,4	31,2	35,1	33,5	26,7	26,1	39,5
	В ₁	С ₀	229,0	189,3	181,7	1,3	2,4	1,4	30,4	36,1	33,2	25,1	24,2	35,6
		С ₁	242,1	190,7	185,2	1,3	2,3	1,5	31,3	35,4	34,0	26,3	26,4	34,3
		С ₂	253,7	199,6	185,6	1,3	2,3	1,5	32,1	36,6	34,5	27,6	25,0	34,8
	В ₂	С ₀	236,0	178,7	182,2	1,3	2,7	1,4	31,2	35,2	33,2	25,4	23,4	37,3
		С ₁	247,9	201,8	187,8	1,3	2,3	1,5	31,9	35,7	34,6	26,9	25,2	36,6
		С ₂	260,1	203,1	193,7	1,4	2,4	1,5	32,6	36,6	35,3	27,7	24,7	36,7
Дисперсия, S ₂			15,52	13,97	21,77	0,01	0,01	0,02	0,22	0,40	0,18	0,41	0,24	1,24
Козффициент вариации, V %			1,68	1,96	2,42	1,02	2,37	2,99	1,46	1,87	1,30	2,61	2,04	3,26
Средняя арифметическая ошибка, S _x			9,28	0,04	0,06	0,00	0,10	0,05	0,71	0,05	0,03	0,05	0,05	0,11
Относительная ошибка, S _x %			3,52	1,97	3,00	1,24	4,31	2,95	2,2	13,60	8,9	10,5	14,8	3,17



Примечание : отрицательная - $r > 0$; слабая - $r < 0,3$; средняя - $r = 0,3-0,7$; сильная - $r > 0,7$.
 Число растений перед уборкой - ЧР; Продуктивная кустистость - ПК; Масса 1000 зёрен - МТЗ; Масса зерна колоса - МЗ; Число зёрен в колосе - ЧЗК; Урожайность - Ур.

Рисунок 22. Корреляционная связь между урожайностью и элементами структуры урожая пшеницы в условиях ТОО «Найдоровское» (2023-2025 гг.)

Были зафиксированы сильные положительные и значимые корреляции между урожайностью зерна и массой зёрен с 1 колоса ($r = 0,93$, $p < 0,001$) мягкой пшеницы, в то время как сильные отрицательные и значимые корреляции были зафиксированы между количеством зёрен в колосе и массой 1000 зёрен ($r = -0,7$, $p < 0,001$).

Результаты анализа коэффициентов линейной корреляции свидетельствуют о том, что в засушливые годы возделывания в формировании урожайности яровой мягкой пшеницы участвуют все основные структурные элементы урожая, между которыми установлены тесные взаимосвязи. Так, в 2023 году отрицательные корреляционные связи у обоих сортов не были зафиксированы, что указывает на преимущественно согласованный характер их влияния на формирование урожайности.

Между оцениваемыми признаками наблюдались переменные взаимосвязи. Наибольшая переменность отмечена в характере связей показателя количества растений перед уборкой с рядом структурных элементов урожая яровой мягкой пшеницы. Умеренно сильные и положительные корреляции были зафиксированы между урожайностью зерна пшеницы с количеством зёрен в колосе ($r = 0,72-0,92$, $p < 0,001$), массой зерна с колоса ($r = 0,71-0,93$, $p < 0,001$).

Результаты дисперсионного анализа трёхфакторного полевого опыта свидетельствуют о статистически достоверном влиянии изучаемых факторов – сорта (А), обработки семян и посевов комплексным препаратом (В), а также приёмов поверхностной обработки почвы (С) на формирование урожайности зерна во все годы проведения эксперимента (таблица 16).

Таблица 16 -Результаты дисперсионного анализа трехфакторного опыта

Дисперсия	F ₀₅	F _ф			НСР ₀₅			Доля вклада факторов и взаимодействия факторов, %		
		2023г.	2024г.	2025г.	2023г.	2024г.	2025г.	2023г.	2024г.	2025г.
Общая					0,76	1,03	1,32	100	100	100
Повторений								5,6	4,2	4,4
Фактор А	4,08	46,9	92,6	6,7	2,07	2,12	2,6	29,5	11,3	7,6
Фактор В	2,64	27,9	13,1	31,9	2,24	1,83	2,08	19,7	24,4	23,9
Фактор С	4,08	63,6	8,6	32,1	0,4	1,4	0,36	11,8	11,5	18,2
Взаимодействия АВ	2,64	0,14	0,9	2,4	1,6	2,7	1,60	7,1	11,1	12,6
Взаимодействия АС	4,08	1,12	0,1	1,6	0,3	1,3	0,31	4,8	13,2	10,7
Взаимодействия ВС	2,64	0,21	0,1	0,1	1,3	2,2	1,31	5,3	7,1	6,2
Взаимодействия АВС	2,64	0,24	0,1	0,7	1,1	1,9	1,13	16,2	17,2	16,4
Обобщённая ошибка для всего опыта (S _х)					1,7	3,7	2,1			
Точность опыта (Т), %					97,8	95,3	96,9			

В 2023 году установлено, что влияние факторов А ($F_{ф} - 46,9 > F_{т} - 4,08$), В ($F_{ф} - 27,9 > F_{т} - 2,64$) и С ($F_{ф} - 63,6 > F_{т} = 4,08$) является статистически

достоверным на всех рассматриваемых уровнях доверительной вероятности, поскольку фактические значения критерия Фишера превышают соответствующие теоретические (критические) значения.

В то же время влияние взаимодействий факторов АВ, ВС, АС и АВС статистически значимым не выявлено, так как фактические значения критерия Фишера оказались ниже критических.

Аналогичная закономерность установлена в 2024 и 2025 годах: влияние факторов А, В и С оставалось статистически достоверным на всех уровнях доверительной вероятности, тогда как взаимодействия факторов не достигали уровня статистической значимости.

Дисперсионный анализ экспериментальных данных показал, что вклад сорта в формирование урожайности зерна яровой мягкой пшеницы варьировал от 7,6 до 29,5 % в зависимости от условий выращивания.

Для яровой мягкой пшеницы первая главная компонента, характеризующаяся собственным значением 13,1-31,9 и долей вклада 19,7-24,4% отличалась в варианте с обработкой семян и посев комплексным стимулирующим препаратом, содержащим микроэлементы и регуляторы роста растений. Вторая главная компонента, имеющая собственное значение 8,6-63,6 и долю вклада 11,5-18,2 %, в основном определялась при варианте опыта с проведением поверхностной обработки почвы после посева. Вклад повторностей в общую вариацию показателей был несущественным.

Обобщённая ошибка опыта в годы проведения полевых экспериментов составила 1,7-3,7. Относительно низкий уровень экспериментальной ошибки ($S_x = 2,2-4,7$ %) за весь период исследований подтверждает высокую точность полевых испытаний ($T = 95,3-97,8$ %), проведённых в условиях каштановых почв ТОО «Найдоровское».

3.4 Влияние агротехнических мероприятий на качество урожая сортов яровой мягкой пшеницы

Качество зерна представляет собой совокупность биологических, физико-химических, технологических и потребительских свойств и характеристик, определяющих его пригодность к использованию по целевому назначению, прежде всего в продовольственных целях [186].

Статистический анализ выбранных параметров качества зерна выявил значительные различия, обусловленные годом, сортом яровой мягкой пшеницы, обработкой комплексным средством семян и посевами, проведением прикатывания и боронования посевов пшеницы и взаимодействием указанных факторов (таблицы 17).

Климатические факторы, в том числе погодные условия за годы проведения исследования, оказали значительное статистически доказанное влияние на качество зерна.

Таблица 17 - Параметры качества зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от сортов, обработки комплексным средством, обработка почвы и года эксперимента.

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	Натура, г/л			Клейковина, %			Массовая доля белка, % на сухое вещество			Число падения, сек.		
			2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
А ₀	В ₀	С ₀	735	733	742	26,14	23,7	24,65	12,51	11,76	12,21	167	167	178
		С ₁	741	742	735	25,73	24,35	24,05	12,67	12,04	12,13	176	164	173
		С ₂	746	744	741	26,51	24,71	25,74	14,2	12,32	12,74	175	168	174
	В ₁	С ₀	742	751	744	26,1	25,2	24,66	12,6	12,53	12,44	163	161	165
		С ₁	745	754	748	25,61	26,3	26,34	13,74	12,75	13,75	167	182	172
		С ₂	761	746	755	27,34	25,8	27,7	14,2	13,33	14,42	168	166	174
	В ₂	С ₀	746	736	751	26,24	25,47	26,8	13,57	12,68	14,33	171	171	166
		С ₁	765	755	755	27,84	26,7	27,2	14,32	12,62	14,31	182	174	178
		С ₂	758	748	757	28,74	26,2	27,4	15,67	13,51	14,62	237	178	190
А ₁	В ₀	С ₀	742	734	738	25,71	23,61	23,24	12,56	11,86	12,75	167	165	162
		С ₁	736	736	746	25,11	23,51	24,7	12,62	11,74	12,31	171	167	176
		С ₂	743	736	736	25,31	25,71	25,67	13,14	12,76	12,67	167	171	172
	В ₁	С ₀	741	741	735	25,24	23,71	24,53	12,57	12,4	12,42	165	167	168
		С ₁	746	734	738	25,12	25,31	26,71	13,84	12,64	13,24	172	162	176
		С ₂	755	744	754	27,14	26,1	27,3	14,27	13,71	14,16	168	172	182
	В ₂	С ₀	743	735	746	25,87	24,51	26,42	13,64	12,33	13,55	171	164	176
		С ₁	758	751	757	27,45	26,7	27,33	14,6	13,62	14,34	201	162	171
		С ₂	762	745	768	29,54	26,54	27,84	14,88	13,85	15,3	241	176	187
Дисперсия, S ₂			4,57	2,83	4,23	0,16	0,13	0,2	0,1	0,04	0,1	5,43	3,47	5,13
Коэффициент вариации, V%			0,4	0,31	0,4	1,5	1,4	1,7	2,2	1,7	2,4	1,3	1,1	1,3
Средняя арифметическая ошибка, S _x			2,3	1,46	3,4	0,9	0,8	1,1	0,7	0,5	0,7	3,5	2,2	2,7
Относительная ошибка, S _x %			0,1	0,7	0,9	3,4	3,3	4,1	5,1	3,3	5,5	3,1	2,6	3,1

Анализ данных по оценке качества зерна сортов яровой мягкой пшеницы позволяет в целом заключить, что по содержанию белка в зерне, по содержанию клейковины, по числу падения зерна, по натурной массе самыми высокими и наиболее благоприятными по погодным условиям вегетации были 2023 и 2025 годы. Обильные осадки (88,0 мм) и продолжительная низкая температура (9,74⁰С в первой декаде сентября) 2024 года в период наступления спелости зерна яровой пшеницы оказали неблагоприятное влияние на формирование его качественных показателей, что обусловило снижение качества зерна. Высокая влажность 2024 года приводила к повышению урожайности зерна с низким качеством зерна, в то же время в более сухие 2023 и 2025 годы - урожайность снижается за счёт улучшения качества зерна (рисунок 23).

Внутрисортные колебания качества зерна были незначительными, в том числе по содержанию клейковины и белка, по количеству число падения. Качество зерна сорта Таймас превышало только по показателю натуры зерна (в среднем 2,81 г/л), по сравнению с сортом Гранни.

Содержание клейковины в исследованном зерне яровой мягкой пшеницы существенно зависело от применяемых агротехнических мероприятий. Обработка семян и посевов комплексным препаратом в сочетании с поверхностной обработкой приводила к более высокому содержанию протеина в зерне пшеницы сорта Таймас - 14,62-15,67 %, у сорта Гранни - 14,88-15,3%.

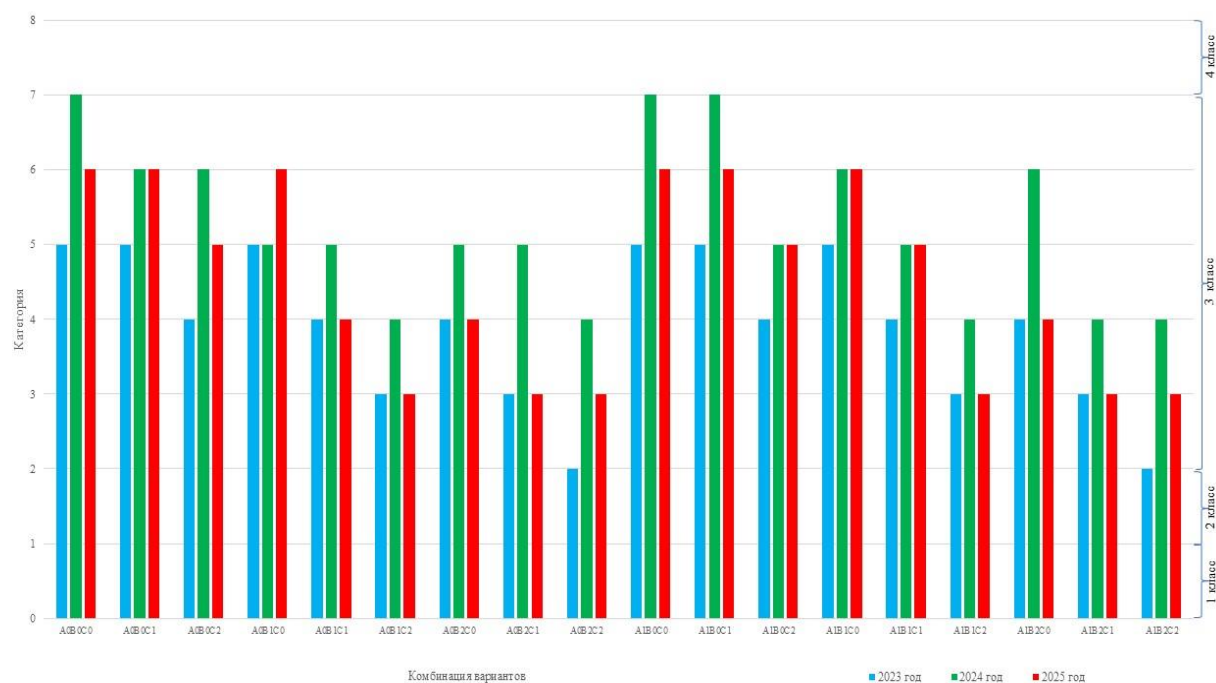


Рисунок 23. Классность зерна яровой мягкой пшеницы, за 2023-2025 годы

Питательная ценность зерна связана с содержанием белка, накопление которого зависит от температуры окружающей среды. Содержание белка, особенно глютена, является важным аспектом питательной ценности глютеносодержащих злаков и определяет хлебопекарные качества муки, получаемой при её помоле. В изучаемой выборке среднее содержание белка составило в среднем 13,25% при разбросе от 11,76 до 15,3%.

Среднее значение натуры зерна составило 746 г/л при размахе значения от 733 г/л до 768 г/л. Достоверное влияние на натуру зерна наблюдалось при варианте обработки семян и посевов комплексным препаратом с сочетанием поверхностной обработкой почвы у обоих сортов. Превышение натуры зерна в указанном варианте составило в среднем 18-20 г/л.

Для определения влияния агротехнических факторов на анализируемые параметры качества зерна был проведён корреляционный анализ между этими переменными (таблица 18).

Результаты корреляционных анализов показали, что сорт яровой мягкой пшеницы оказывал ($p < 0,01$) значительное влияние на натуру ($r = 0,35$) и число падения зерна ($r = 0,64$), слабое влияние на содержание клейковины ($r = 0,14$) и белка ($r = 0,28$).

Таблица 18. Коэффициенты корреляции между агротехническими факторами и качественными параметрами зерна яровой мягкой пшеницы.

Изучаемые агроприемы	Качественные показатели зерна			
	Натура	Клейковина	Белок	Число падения
Сорта	0,35	0,14	0,28	0,64
Обработка семян и посевов комплексным стимулирующим средством	0,57	0,71	0,77	0,73
Поверхностная обработка почвы	0,11	0,41	-0,21	0,25
Примечание : *отрицательная - $r > 0$; **слабая - $r < 0,3$; ***средняя - $r = 0,3-0,7$; ****сильная - $r > 0,7$.				

Поверхностная обработка почвы посевов пшеницы характеризовалась слабым влиянием на натуру ($r = 0,11$) и на число падения зерна ($r = 0,25$), отрицательное влияние на содержание белка ($r = -0,21$).

Обработка семян и посевов с комплексным средством оказало более ощутимое влияние ($p < 0,01$) на качество зерна пшеницы. Более сильная корреляция ($r = 0,71...0,777$) была получена между обработкой семян и посевов комплексным средством с содержанием белка ($r = 0,77$), клейковины ($r = 0,71$), число падения зерна ($r = 0,73$).

Для получения качественного зерна необходимо использовать агрономические методы, в том числе главным является обработка семян и посевов комплексным средством.

3.5 Моделирование засухоустойчивого и высокопродуктивного сорта яровой мягкой пшеницы для условий Центрального Казахстана

Моделирование сельскохозяйственных культур обеспечивает эффективный подход к оценке влияния изучаемых факторов, поскольку они взаимодействуют с абиотическими условиями, а также агротехнологическими приёмами возделывания. Такой подход моделирования способен содействовать в определении вероятных концепций, которые могли бы увеличить эффективность использования биологического потенциала растений.

Для точного моделирования с применением модели сельскохозяйственных культур требуется множество входных данных, в том числе погодно-климатические параметры, биометрические данные растений, урожайные данные. Математическая модель урожая культур при возделывании в разных почвенно-климатических условиях даёт слабо достоверные данные [187, 188]. Это объясняется абсентизмом пространственной и временной информации в вегетационном периоде растений.

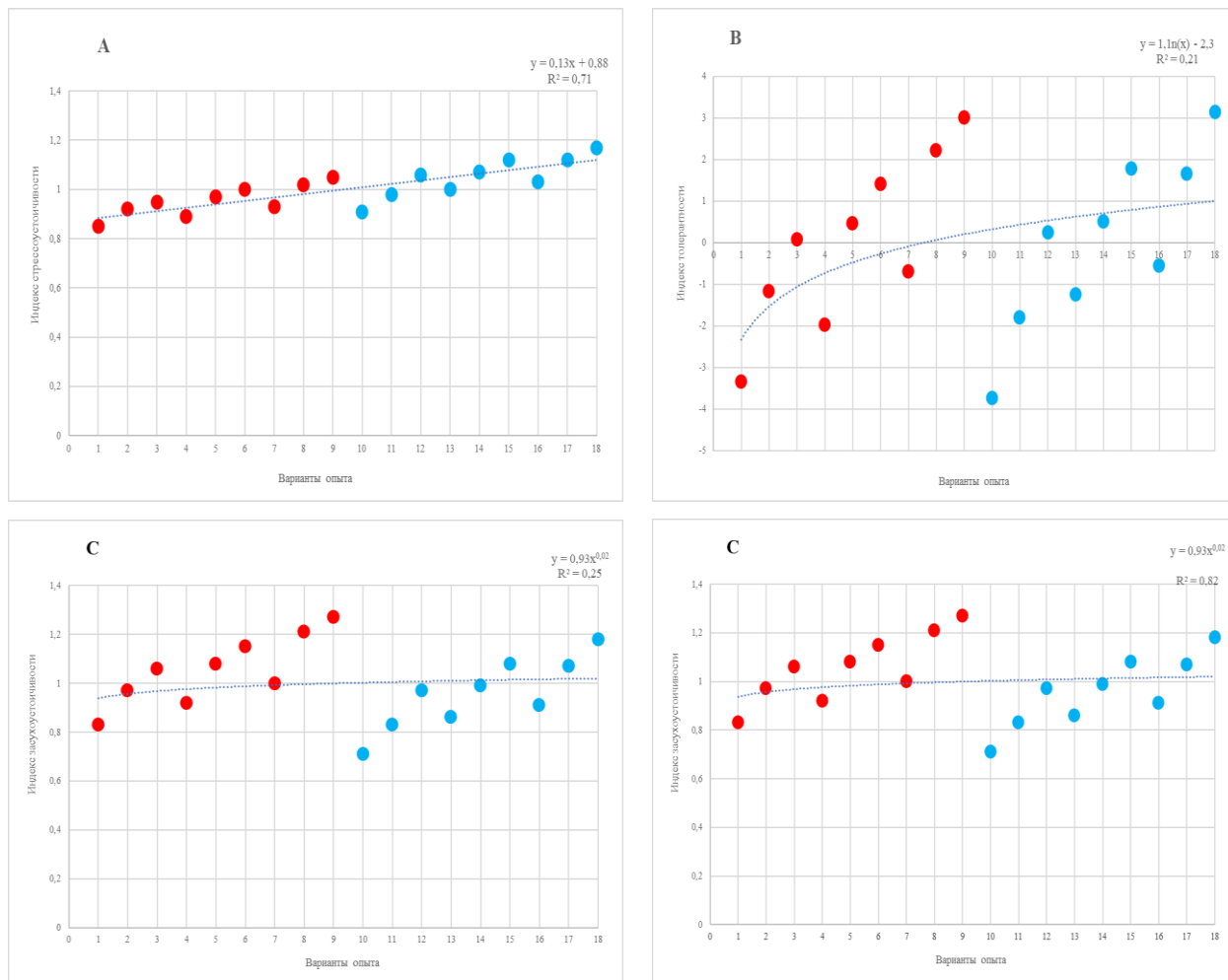
Значимость эффектов изучаемых вариантов полевого опыта оценивалась с помощью F-теста, а различие между средними значениями было аппроксимировано путём использования наименьшей разницы значимости на уровне вероятности 5%. Для калибровки модели были выбраны основные экспериментальные данные по двум сортам яровой мягкой пшеницы (сорта Таймас и Гранни) с учётом обработки комплексными средствами для семян и посевов, а также поверхностная обработка почвы после посева культур.

Представленные модели откалиброваны по индексу стрессоустойчивости (*STI*), по индексу толерантности (*ATI*), по индексу засухоустойчивости (*DI*), по индексу восприимчивости (*SSI*) (рисунок 24).

По результатам откалибровки лабораторных и полевых экспериментов выделились от 6 до 9 моделей яровой мягкой пшеницы по разным показателям.

Значения индекса стрессоустойчивости и засухоустойчивости различаются в зависимости от вариантов опыта, что приводит к устойчивости к стрессу и засухе среди ограничений. Индекс стрессоустойчивости (*STI*) имеет значительные изменения в зависимости от комбинаций полевого эксперимента. Наибольшие значения индекса стрессоустойчивости и засухоустойчивости у обеих сортов наблюдаются в вариантах В₂С₂. Данные о высокой стрессоустойчивости (Таймас - 1,03; Гранни - 1,91) свидетельствуют о том, что только комплекс проведения агротехнических мероприятий способствует высокой устойчивости к климатическим факторам. Результаты статистических обработок показывают, что обработка комплексными средствами семян и посевов, а также поверхностная обработка почвы после посева дают высокую возможность сохранения продуктивности в условиях

стресса. Коэффициент вариации индекса стрессоустойчивости (2,73%) и засухоустойчивости (4,65%) указывает на относительно стабильные различия между вариантами по данным показателям.



(А - по индексу стрессоустойчивости, В – по индексу толерантности, С по индексу засухоустойчивости, D – по индексу восприимчивости)

Рисунок 24 - Калибровка модели устойчивости сортов яровой пшеницы с параметрами математической статистики

Количественные показатели средней арифметической ошибки (Sx - 0,27-0,47) и относительная ошибка выборочной средней ($Sx\%$ - 2,73-4,65%), подтверждают достоверность полученных данных.

Результаты показывают низкую разницу в индексе толерантности (TOL) и восприимчивости к стрессу (SSI) в зависимости от вариантов опыта, с коэффициентом вариации 3,71%. Наибольшие значения индекса толерантности наблюдаются у вариантов В₂С₂ (3,014-3,17) по обоим сортам.

Наибольшие изменения наблюдаются в индексе восприимчивости к стрессу (SSI), что подтверждается высоким коэффициентом вариации (47,57%). Ошибки средней арифметической и относительные ошибки

индекса восприимчивости к стрессу показывают адекватность данных для дальнейшего анализа.

Полученные коэффициенты детерминации свидетельствуют о различной объясняющей способности использованных индексов при оценке адаптивных свойств генотипов.

Наибольшее значение R^2 установлено по индексу засухоустойчивости ($R^2 = 0,82$) и стрессоустойчивости ($R^2 = 0,71$), что указывает на высокую степень согласованности данных показателей с вариабельностью изучаемого признака. По индексу толерантности, засухоустойчивости и восприимчивости к стрессу получено низкое значение коэффициента детерминации (R^2 - 0,21-0,25-0,25), что свидетельствует о слабой связи с результативным признаком и ограниченной объясняющей способностью. Таким образом, сравнительный анализ коэффициентов детерминации позволяет заключить, что индекс стрессоустойчивости обладает наибольшей прогностической значимостью среди исследованных критериев.

Совокупность статистических параметров позволяет заключить, что индекс стабильности урожайности сортов яровой мягкой пшеницы характеризуется низкой вариабельностью (2,76%) и высокой точностью оценки (S_x - 2,76%), что повышает достоверность выводов о стабильности исследуемых генотипов в условиях полевого эксперимента (таблица 19).

Индекс стабильности урожайности пшеницы доказывает, что сорт Таймас является наилучшей моделью по константности, чем сорт Гранни.

Значения индекса абиотической толерантности (АТІ) варьировали в широких пределах от -40,48 до 100,34, что свидетельствует о выраженной дифференциации комбинаций опыта по уровню адаптивной реакции сортов яровой мягкой пшеницы на стрессовые факторы среды. По толерантности урожая сортов яровой мягкой пшеницы отличились 7 моделей, в том числе, по сорту Таймас - 3 и по сорту Гранни - 4.

Наиболее высокие положительные значения АТІ отмечены у сорта Таймас ($A_0B_2C_1$ - 100,34; $A_1B_1C_0$ - 77,41), что указывает на его повышенную устойчивость к абиотическому стрессу. В то же время отрицательные значения индекса также наблюдались у сорта Таймас, особенно в вариантах $A_0B_0C_2$ (-40,48), что характеризует пониженную толерантность и высокую чувствительность растений к неблагоприятным условиям среды. Высокая амплитуда колебаний индекса абиотической толерантности свидетельствует о выраженной чувствительности сорта к изменению абиотических условий среды. Статистическая оценка индекса абиотической толерантности показывает высокую стабильность и достоверность в условиях проведённого эксперимента.

Результаты проведённых моделирований, полученные данные по сортам Таймас и Гранни, возделываемых в условиях Центрального Казахстана, показывают высокую зависимость урожайности с окружающей средой и генотипом.

Таблица 19 - Адаптационные показатели сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от агротехнических мероприятий, в среднем за 2023-2025 гг.

Комбинация опыта	Прогнозируемая урожайность, GMP	Индекс стабильности урожайности, YSI	Индекс абиотической толерантности, ATI	Стрессо-устойчивость, SI
A ₀ B ₀ C ₀	27,62	0,93	-17,43	-2,34
A ₀ B ₀ C ₁	28,72	1,01	-27,18	-0,17
A ₀ B ₀ C ₂	29,34	1,05	-40,48	1,08
A ₀ B ₁ C ₀	28,32	0,98	13,65	-0,98
A ₀ B ₁ C ₁	29,52	1,07	50,7	1,46
A ₀ B ₁ C ₂	29,98	1,1	77,41	2,41
A ₀ B ₂ C ₀	28,96	1,03	-4,63	0,31
A ₀ B ₂ C ₁	30,36	1,13	100,34	3,43
A ₀ B ₂ C ₂	30,73	1,16	-23,5	1,81
A ₁ B ₀ C ₀	25,87	0,82	20,9	-2,73
A ₁ B ₀ C ₁	26,91	0,89	39,05	-0,81
A ₁ B ₀ C ₂	27,98	0,96	30,26	1,25
A ₁ B ₁ C ₀	27,21	0,91	66	1,24
A ₁ B ₁ C ₁	28,11	0,97	23,72	0,13
A ₁ B ₁ C ₂	28,75	1,01	-8,49	0,41
A ₁ B ₂ C ₀	27,57	0,93	49,59	0,45
A ₁ B ₂ C ₁	28,69	1,01	55,71	0,38
A ₁ B ₂ C ₂	29,42	1,06	15,12	0,35
Дисперсия, S ²	0,16	0,07	0,41	0,23
Коэффициент вариации, V %	1,39	2,76	4,02	1,13
Средняя арифметическая ошибка, Sx	3,96	0,28	6,40	4,81
Относительная ошибка выборочной средней, Sx%	13,88	2,76	2,40	0,11

Смоделированная урожайность сортов яровой мягкой пшеницы показала хорошее соответствие с фактическими значениями во многих вариантах опыта (рисунок 25).

В условиях каштановых почв ТОО «Найдоровское» в годы проведения исследований, при значениях гидротермического коэффициента 0,86-1,2 ед., потенциальная урожайность яровой мягкой пшеницы сорта Таймас была смоделирована в диапазоне 22,02-29,86 ц/га.

Установлена тесная линейная корреляционная связь между смоделированными и фактическими показателями урожайности зерна ($R^2 = 0,956$) яровой мягкой пшеницы, что подтверждает высокую степень согласованности модели с экспериментальными данными по засухоустойчивости во всех комбинациях обработки семян и посевов

комплексным стимулирующим препаратом при поверхностной обработке почвы. Результаты линейного моделирования урожайности яровой мягкой пшеницы свидетельствуют об эффективности и высокой прогностической способности разработанной модели.

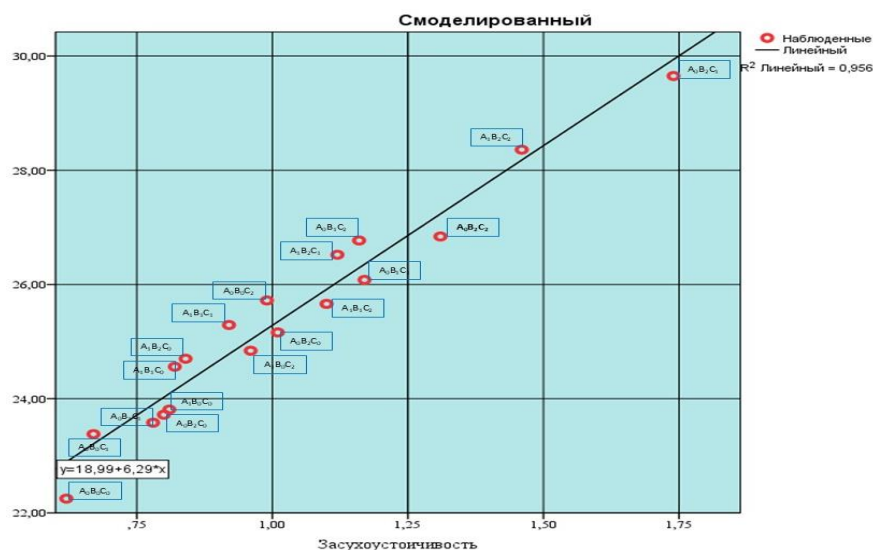


Рисунок 25 - Результаты линейных моделирований урожая яровой мягкой пшеницы

Статистическая обработка полученных данных показала, что методика расчёта молекулярно-генетических показателей и параметров засухоустойчивости на ранних этапах онтогенеза и в течение вегетационного периода является адекватной, поскольку обеспечивает высокую точность моделирования (A_m - 95,71%) засухоустойчивости сортов яровой мягкой пшеницы в исследуемых регионах.

Результаты моделирования продемонстрировали, что сорт Таймас, используемый в качестве эталонной модели (рисунок 26), характеризуется высоким уровнем достоверности прогноза (R_x - 0,91) и более точно воспроизводит параметры устойчивости к засухе по сравнению с сортом Гранни.

Анализ математической модели показал, что оптимальными параметрами формирования засухоустойчивых сортов являются наличие положительных гомозиготных генотипов 'bb'; предпосевная обработка семян комплексными стимулирующими средствами, содержащими Zn (0,5) + Mn (0,5) + Cu (0,25) + Fe (0,5) + Si (0,75) + $C_6H_7O_6Na$ (0,5) + $C_{28}H_{48}O_6$ (0,0025); проведение листовой подкормки в фазу кущения; прикатывание почвы после посева и боронование в период кущения яровой мягкой пшеницы.

Модель, предусматривающая использование семян сорта Таймас, обработанных комплексным средством, внесение листовой подкормки по посевам, а также проведение прикатывания после посева и боронования в период кущения, продемонстрировала высокую сезонную реакцию (R_x - 0,87-0,93) и обеспечила формирование высокой урожайности.

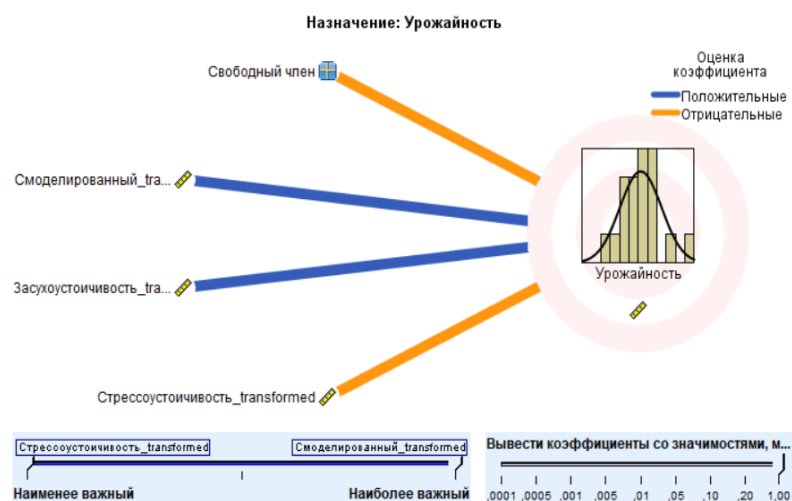


Рисунок 26 - Оценка модели яровой мягкой пшеницы по урожайности, засухоустойчивости и стрессоустойчивости

У сорта Гранни значения коэффициента сезонной реакции были ниже ($R_x - 0,57-0,72$), при этом фактически наблюдаемые показатели уступали смоделированным (рисунок 27).

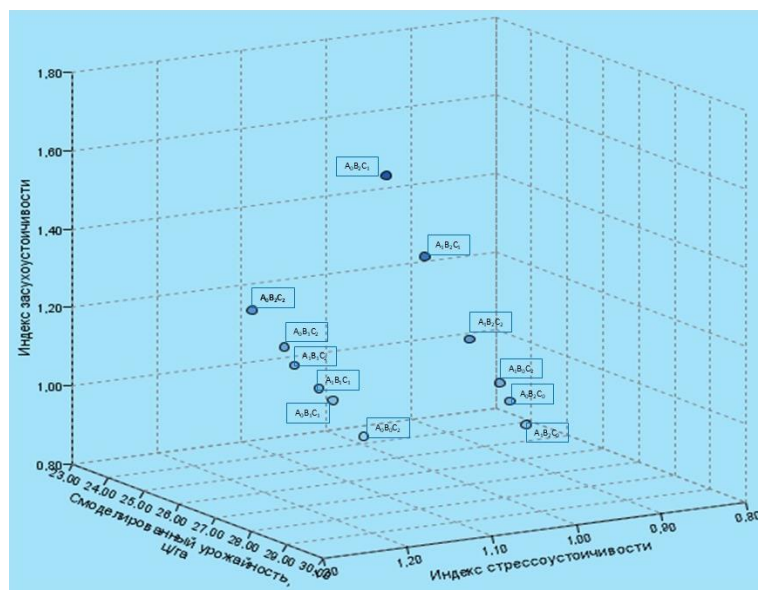


Рисунок 27 – Валидность модели сортов яровой мягкой пшеницы

Комплекс агротехнологических мероприятий, направленных на повышение урожайности и засухоустойчивости растений, включающий предпосевную обработку семян комплексными препаратами, проведение листовой подкормки микроудобрениями, прикатывание почвы после посева и боронование в фазу кущения, способствует более полной реализации биологического потенциала растений и повышению их адаптивных возможностей в условиях стрессовых факторов среды.

3.6 Экономическая эффективность возделывания сортов яровой мягкой пшеницы при применении различных вариантов опыта

Эффективность производства зерна зависит от различий в технологических мероприятиях возделывания и их эффективности производственного процесса. Одним из условий применимости отдельных агроприемов и целесообразности их внедрения в сельскохозяйственное производство является их экономическая эффективность [189].

Внедрение новых агротехнических мероприятий при возделывании сортов яровой мягкой пшеницы сопряжено с материальными, финансовыми и трудовыми затратами, вложение которых выгодно тогда, когда доход от дополнительно полученной продукции превышает расходы, связанные с внедрением. Агрономическая и экономическая эффективность не всегда совпадают [190].

Первостепенным фактором повышения эффективности производства зерна пшеницы является не столько показатели урожайности, сколько высокоокупаемые инвестиции в расчёте на один гектар посевной площади. Каждая единица производственных затрат оказывает существенное влияние на достигнутый уровень эффективности производства. Значимость научных исследований возрастает в условиях обеспечения высокой экономической эффективности зернового производства. Рентабельность производства зерна определяется уровнем урожайности и качеством получаемой продукции, производительностью труда, а также объёмом материальных, финансовых и иных затрат, связанных с производственным процессом. Поэтому для расчёта экономической эффективности за основу была взята технологическая карта возделывания яровой мягкой пшеницы в условиях ТОО «Найдоровское».

В технологической карте возделывания яровой мягкой пшеницы были рассчитаны складывающиеся при возделывании яровой мягкой пшеницы по разным агротехнологиям производственные затраты. При расчёте производственных затрат включены все необходимые показатели, в том числе заработная плата с начислениями, расходы на электроэнергию, на автотранспорт, на текущий ремонт, на ГСМ, на семена, на удобрения, на средства защиты растений, на стимуляторы роста растений, на арендную плату, на земельный налог, на мелкий инвентарь, амортизационные расходы, общехозяйственные и общепроизводственные затраты и прочие прямые затраты (рисунок 28).

Расчёт технологических карт по вариантам применяемых агротехнологий возделывания яровой мягкой пшеницы показал, что производственные затраты варьировали от 14296,22 до 16262,37 тыс. тенге /га.

Анализ структуры производственных затрат при возделывании яровой мягкой пшеницы показал, что при применении различных вариантов технологий наибольший удельный вес затрат приходится на минеральные

удобрения (19,12%), на ГСМ (18,9%) и на приобретение семенных материалов (16,84%). Основная часть затрат вышеуказанных показателей составляет - 54,86%. Затраты на зарплату с начислениями в зависимости от вариантов агротехнологий находились на уровне 6,95-8,23 %.

На долю приобретения запасных частей и текущий ремонт приходилось 9,01 %. Затраты на средства защиты растений - в среднем 7,7%.

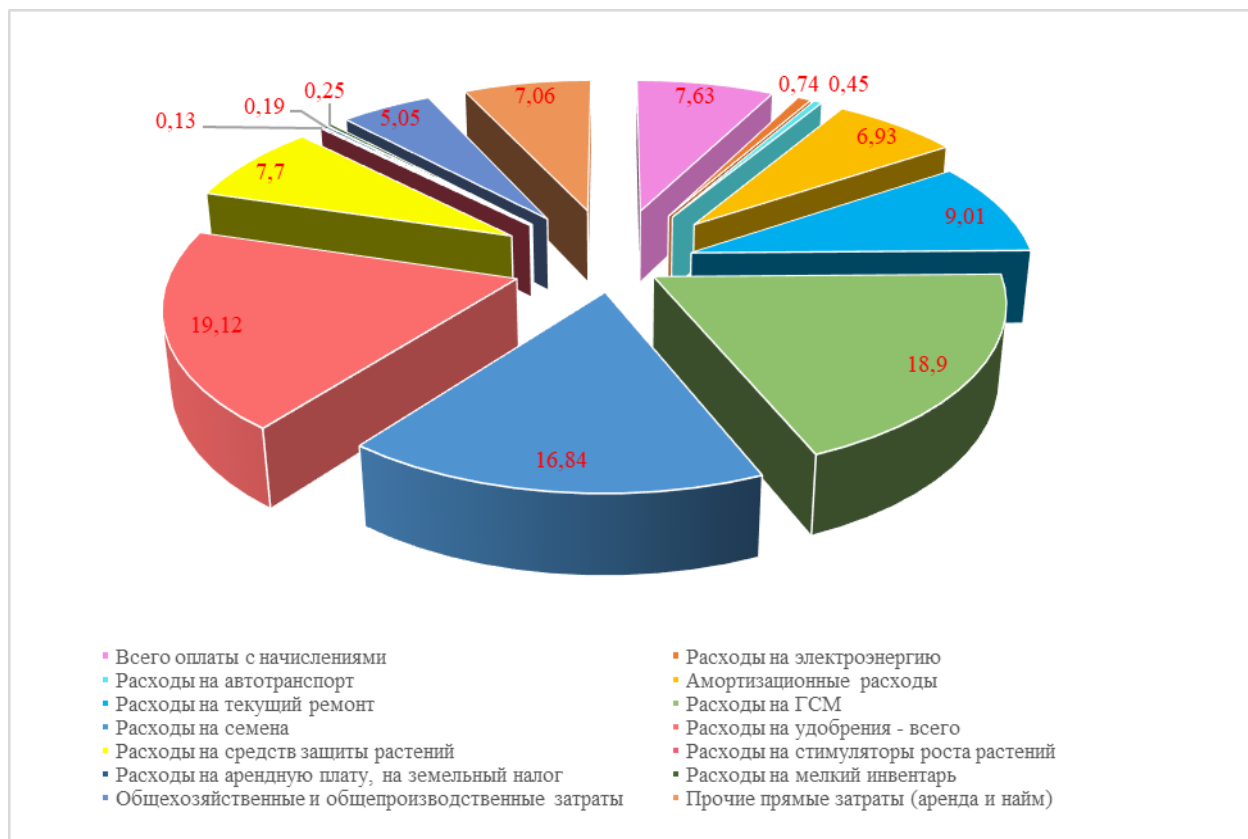


Рисунок 28 - Структура производственных затрат (%) при возделывании яровой мягкой пшеницы, в среднем за 2023-2025 г.г.

Доля отдельных статей производственных затрат, таких как электроэнергия (0,74 %), автотранспорт (0,45 %), стимуляторы роста растений (0,13 %), земельный налог (0,19 %) и мелкий инвентарь (0,25 %), в структуре общих расходов была незначительной и по каждому из указанных показателей не превышала 1 %. Это свидетельствует о сравнительно низком удельном весе данных затрат в общей структуре производственных издержек при возделывании культуры.

В течение всего периода проведения исследований во всех вариантах опыта наблюдалась устойчивая тенденция к увеличению производственных расходов (рисунок 29). Вероятно, данная динамика обусловлена ростом цен на материально-технические ресурсы, используемые в сельскохозяйственном производстве, а также изменением условий хозяйствования. Вместе с тем увеличение затрат могло быть связано с применением дополнительных

агротехнических приёмов и средств, направленных на повышение продуктивности посевов и эффективности технологии возделывания культуры.

Анализ затрат труда по вариантам опыта показал определённые различия между изучаемыми сортами яровой мягкой пшеницы и применяемыми агротехнологическими приёмами. Полученные данные свидетельствуют о закономерном изменении показателя в зависимости от факторов опыта. У сорта Таймас затраты труда варьировали от 15,35 до 19,06 тыс. чел.-дней. Минимальное значение отмечено в варианте В₀С₀ (15,35 тыс. чел.-дней), тогда как максимальные затраты наблюдались в варианте В₂С₂ (19,06 тыс. чел.-дней). В целом прослеживается тенденция увеличения трудовых затрат по мере усиления технологических приёмов в опыте. Аппроксимация экспериментальных данных полиномиальной моделью характеризуется достаточно высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,79$), что указывает на удовлетворительную объясняющую способность модели и подтверждает наличие устойчивой зависимости изменения трудовых затрат от исследуемых факторов.

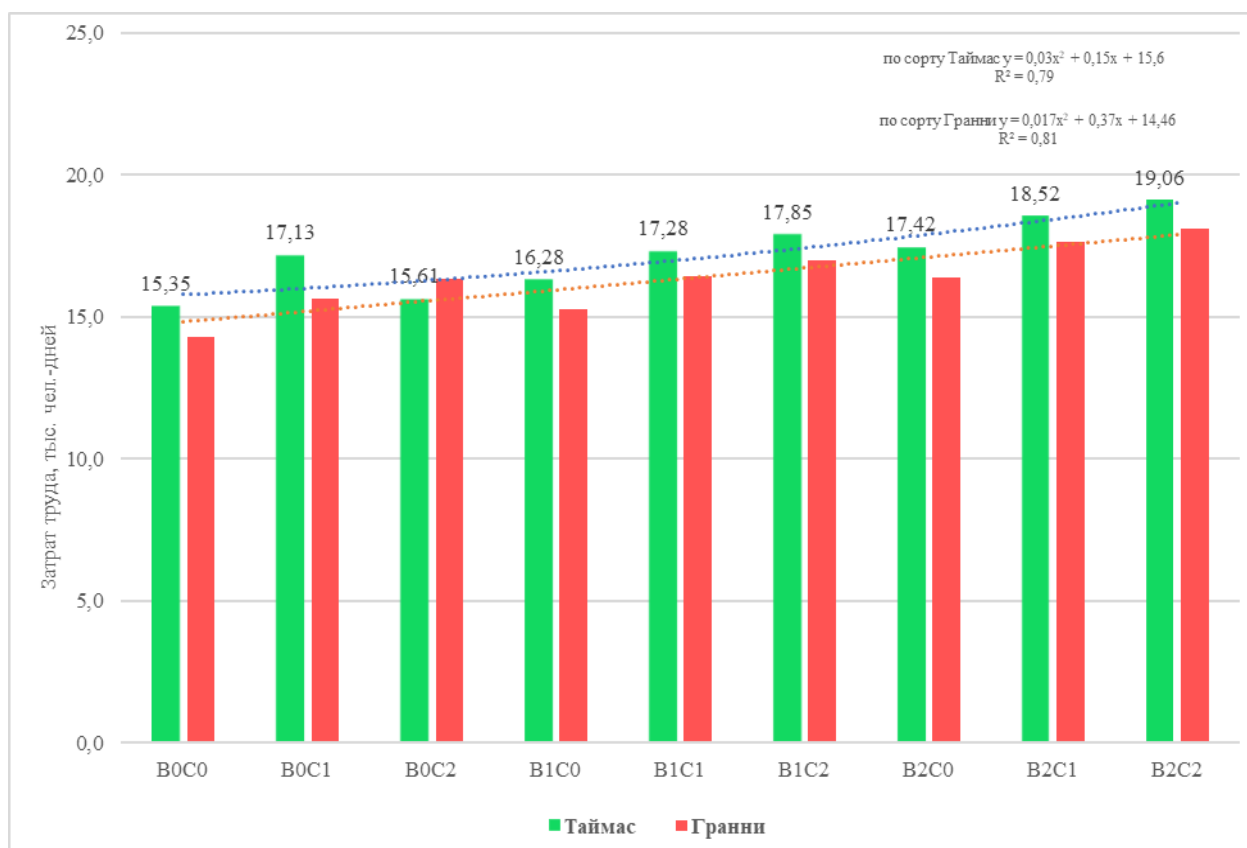


Рисунок 29 - Затраты труда (тыс. чел.-дней) в зависимости от агротехнических приёмов возделывания сортов яровой мягкой пшеницы, среднем за 2023-2025г.г.

Аналогичная закономерность установлена и для сорта Гранни. В данном случае затраты труда изменялись в пределах от 14,31 до 18,11 тыс. чел.-дней. Наименьшее значение показателя также отмечено в контрольном варианте В₀С₀ (14,31 тыс. чел.-дней), тогда как наибольшее — в варианте В₂С₂ (18,11 тыс. чел.-дней). По мере перехода от базовых к более интенсивным вариантам технологии наблюдается постепенное увеличение трудовых затрат. Полиномиальная зависимость, описывающая изменение показателя, характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,81$, что свидетельствует о высокой степени согласованности модели с экспериментальными данными.

Наряду с увеличением расходов увеличиваются и затраты труда на 1 га. Сравнительный анализ показывает, что в большинстве вариантов опыта затраты труда по сорту Таймас несколько выше, чем у сорта Гранни. Это может быть обусловлено биологическими особенностями сортов, а также различиями в реакции растений на используемые агротехнические приёмы. В целом результаты исследования подтверждают, что усиление элементов технологии возделывания сопровождается увеличением трудовых затрат, однако при этом создаются предпосылки для повышения эффективности производства и продуктивности посевов.

Показатель экономической эффективности характеризует изменения себестоимости зерна яровой мягкой пшеницы и других экономических показателей в зависимости от фактора проведённых вариантов опыта. Экономическая эффективность производства зерна яровой пшеницы определяется сопоставлением затрат на производство продукции и стоимостью полученного урожая.

Экономические показатели изучаемых вариантов полевого эксперимента изменялись в зависимости от применяемых элементов технологии возделывания сортов яровой мягкой пшеницы (таблицы 20, 21).

Цена реализации 1 т зерна яровой пшеницы по установленной цене АО «НК «Продкорпорация» на момент определения экономической эффективности составила от 92,0 тыс. до 106,0 тыс. тенге (приложение Д). Партии зерна, полученные из разных вариантов опыта, относились ко 2 и 3 классу с разными категориями.

В зависимости от урожайности и реализационной цены зерна стоимость валовой продукции яровой мягкой пшеницы сорта Таймас варьировал от 24803,2 до 35234,4 тыс. тг. с 100 га. Для проведения прикатывания после посева потребовалось дополнительно 2346,18-2493,2 тыс. тенге за весь объём по сравнению с контрольным вариантом опыта, а для проведения боронования в период кущения пшеницы - 2102,27-2232,1 тыс. тенге.

Партия зерна, полученная с варианта опыта обработанными семенами комплексным стимулирующим средством, реализована дороже на 2543,6 - 2770,3 тыс.тенге по сравнению с контрольным вариантом, а при обработке семян и посевов комплексным стимулирующим средством - 4407,8- 4830,6 тыс. тенге.

Таблица 20. Экономическая эффективность возделывания яровой мягкой пшеницы сорта Таймас в зависимости от обработки комплексным стимулирующим средством и от обработки почвы, среднее за 2023-2025гг.

№	Статья / показатель	Варианты опыта								
		A ₀ B ₀ C ₀	A ₀ B ₀ C ₁	A ₀ B ₀ C ₂	A ₀ B ₁ C ₀	A ₀ B ₁ C ₁	A ₀ B ₁ C ₂	A ₀ B ₂ C ₀	A ₀ B ₂ C ₁	A ₀ B ₂ C ₂
1	Урожайность зерна, ц/га	26,68	28,86	30,11	28,05	30,48	31,44	29,33	32,24	33,03
2	Цена реализации 1 т зерна, тыс. тенге	92,0	92,66	95,5	93,66	97,16	104,0	97,16	102,33	106,0
3	Стоимость валовой продукции, тыс. тг.	24 803,2	27 149,38	29 251,65	27 573,5	30 401,36	33 269,6	29 633,8	33 390,28	35 234,4
4	Всего прямых затрат, тыс. тенге.	14676,92	15211,02	15870,26	14864,76	15228,11	16041,87	15395,38	15781,62	16645,37
5	Условно чистый доход, тыс. тенге.	10 126,28	11 938,36	13 381,39	12 708,74	15 173,25	17 227,73	14 238,42	17 608,66	18 589,03
6	Затраты на 1 га, тыс. тенге.	146,77	152,11	158,70	148,65	152,28	160,42	153,95	157,82	166,45
7	Производственная себестоимость 1 тонны основной продукции, тыс. тенге	54,44	51,91	51,81	50,49	48,67	50,15	50,48	48,37	50,08
8	Рентабельность производства, %	69,0	78,5	84,3	85,5	99,6	107,4	92,5	111,6	111,6

Таблица 21. Экономическая эффективность возделывания яровой мягкой пшеницы сорта Гранни в зависимости от обработки комплексным средством и от обработки почвы, среднее за 2023-2025гг.

№	Статья/показатель	Варианты опыта								
		A ₁ B ₀ C ₀	A ₁ B ₀ C ₁	A ₁ B ₀ C ₂	A ₁ B ₁ C ₀	A ₁ B ₁ C ₁	A ₁ B ₁ C ₂	A ₁ B ₂ C ₀	A ₁ B ₂ C ₁	A ₁ B ₂ C ₂
1	Урожайность зерна, ц/га	23,41	25,33	27,39	25,9	27,65	28,91	26,59	28,8	30,28
2	Цена реализации 1 т зерна, тыс. тенге	92,0	92,0	96,5	92,66	96,5	104,0	96,16	104,0	106,0
3	Стоимость валовой продукции, тыс. тг.	22622,8	25116,0	27348,1	25166,4	28 409,6	31283,2	27030,6	31886,4	32 976,6
4	Всего прямых затрат, тыс. тенге.	14296,22	14779,2	15435,11	14482,14	14865,53	15533,46	15012,13	15411,38	16186,05
5	Условно чистый доход, тыс. тенге.	8 326,58	10 336,8	11 912,9	10 684,32	13 544,07	15 749,74	12 018,45	16 475,02	16 790,5
6	Затраты на 1 га, тыс. тенге.	142,96	147,79	154,35	144,82	148,66	155,33	150,12	154,11	161,86
7	Производственная себестоимость 1 тонны основной продукции, тыс. тенге.	58,14	54,14	54,46	53,32	50,49	51,64	53,40	50,27	52,03
8	Рентабельность производства, %	58,2	70,0	77,2	73,8	91,1	101,4	80,1	106,9	103,7

Самый высокий чистый доход с 1 гектара получен при варианте (по сорту Таймас 18589,03 тыс. тенге; по сорту Грани – 16186,05 тыс. тенге) обработка комплексным стимулирующим средством семян и посевов (B_2) с сочетанием прикатывание почвы после посева и боронование почвы в период кущения (C_2).

Остальные варианты по данному показателю в значительной степени уступали максимальному использованию комплекса агротехнических мероприятий. Их чистый доход с 1 гектара площади составил в пределах 8326,58 – 17608,66 тыс. тенге.

Самая низкая себестоимость 1 тонны зерна (48,37 тыс. тенге) получена в варианте с обработкой семян и посевов (B_2C_2) яровой мягкой пшеницы сорта Таймас разработанным комплексным стимулирующим средством и с двухкратными поверхностными обработками почв (прикатывание почвы после посева + боронование почвы в период кущения). При таком варианте опыта себестоимость зерна сорта Грани составил - 50,27 тыс. тенге/т.

Наибольшая рентабельность (111,58 %) производства зерна была получена на комбинации варианта B_2C_1 – при обработке семян разработанным комплексным стимулирующим средством, прикатыванием почвы после посева, боронованием почвы в период кущения. Рентабельность в комбинации варианта A_2B_2 не достигла максимального уровня из-за больших затрат, несмотря на более высокую урожайность зерна на 0,58 ц/га по сравнению с вариантом A_1B_2 .

Для получения зерна яровой мягкой пшеницы высокого качества (урожайность - 32,63 ц/га, содержание клейковины - не менее 27,0 %, массовая доля белка - не менее 14 % на абсолютно сухое вещество) экономически целесообразным (уровень рентабельности - 111,58 %) является возделывание сорта Таймас при применении элементов комплекса технологии возделывания, направленных на повышение устойчивости к засухе и продуктивности. Данная технология возделывания яровой мягкой пшеницы включает предпосевную обработку семян, обработку посевов в фазу кущения разработанным комплексным стимулирующим препаратом, а также прикатывание почвы после посева.

Применение указанной технологии при возделывании сорта Таймас обеспечивает снижение производственной себестоимости 1 тонны зерна яровой мягкой пшеницы до 48,37 тыс. тенге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из поставленных задач и проведённых исследований, сделаны следующие выводы:

1. Молекулярно-генетический скрининг с использованием Amplifluor SNP-маркеров, направленных на гены *Dr1*, *Dreb1*, *TaLTP*, *TaPARG*, *TaPPH*, *FEH* и *COMT3B*, ассоциированные с устойчивостью яровой мягкой пшеницы к засухе, выявил наличие узкодогматического однонуклеотидного полиморфизма в ряде сортов. В том числе, из сорта отечественной селекции Таймас (НПЦ ЗХ им. А.И.Бараева) и зарубежной селекции Гранни (Австрия).

2. Комплексный препарат, включающий микроэлементы, полисахарид и регулятор роста, существенно снижает негативное воздействие засухи на ранних этапах онтогенеза пшеницы и способствует увеличению длины корешков (3,56-5,44 см), массы проростков (5,44-8,36 г/100шт) и корней (7,31-9,33г/100шт.), повышению лабораторной всхожести (21,46-22,7%), индекса всхожести (GI-40,25-41,52 ед.) и индекса жизнеспособности проростков (SVI-21,11-42,73 ед.). Кроме того, отмечается снижение токсического воздействия стрессовых факторов и повышения стимулирующего эффекта, что в совокупности обеспечивает повышение ростовых процессов в начальный период.

3. Применение комплекса агротехнических приёмов, включающего обработку семян и посевов комплексным стимулирующим препаратом, прикатывание после посева и боронование в период вегетации, способствует увеличению продолжительности межфазных периодов и общего вегетационного периода (2-3 суток). Установлено, что указанные агротехнологические мероприятия повышают сохранность (в среднем на 7,01 %) и адаптивность (3,14-6,53%) растений изучаемых сортов яровой мягкой пшеницы, обеспечивая формирование оптимального фотосинтетического потенциала посевов на всех этапах их развития, и увеличивают чистую продуктивность фотосинтеза.

4. Максимальная урожайность (в среднем за 3 года - 30,28-33,03 ц/га) отмечается в вариантах опыта, предусматривающих обработку семян и посевов комплексными стимулирующими средствами в сочетании с проведением прикатывания и боронования посевов яровой мягкой пшеницы. Подтверждены достоверные влияния изучаемых факторов на формирование урожайности зерна во все годы проведения эксперимента. При этом основная доля вклада в пределах 19,7-24,4% отмечалась на вариантах с обработкой семян комплексным стимулирующим препаратом.

Установлена тесная положительная и статистически значимая корреляционная связь между показателями урожайности и массы зерна с

колоса ($r = 0,93$, $p < 0,001$), а также сильная отрицательная и значимая связь между показателями озернённости колоса и массы 1000 семян ($r = -0,7$, $p < 0,001$).

5. Применение комплекса агротехнических мероприятий, включающего применение комплексных стимулирующих средств для обработки семян и посевов пшеницы в сочетании с прикатыванием и боронованием, способствовало получению высокого содержания белка (15,3-15,66%), клейковины (28,74-29,54%), числа падения (237-214 сек) и натурной массы (758-768 г/л) изучаемых сортов яровой мягкой пшеницы. Обработка семян и посевов комплексным стимулирующим средством оказала существенное влияние $r = 0,64$ (при $p < 0,01$) на качество зерна пшеницы.

6. Обработка комплексным стимулирующим средством семян и посевов, а также поверхностная обработка почвы посевов яровой мягкой пшеницы способствует увеличению индекса толерантности (3,01-3,17ед.), засухоустойчивости (5,71-8,04 ед.), стрессоустойчивости (1,24 - 1,81 ед.) и обеспечивает высокую стабильность (до 24,73 %) и достоверность (0,91 ед.) в условиях ТОО «Найдоровское» Осакаровского района, Карагандинской области.

7. Применение разработанной модели возделывания яровой мягкой пшеницы в условиях ТОО «Найдоровское» с обработкой семян комплексным стимулирующим препаратом и использованием листовых подкормок в комплексе в сочетании с прикатыванием после посева позволяет обеспечить стабильно высокую урожайность культуры ($R_x = 0,87-0,93$) и экономическую эффективность производства за счёт снижения себестоимости зерна до 48,37 тыс. тенге за тонну, что способствует повышению рентабельности до 111,58 %.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

Для получения высококачественного зерна яровой мягкой пшеницы (более 30 ц/га), с высоким качеством рекомендуется возделывать сорта яровой мягкой пшеницы Таймас и Гранни с применением комплекса агротехнических мероприятий, включающего применение разработанного комплексного стимулирующего средства для обработки семян (с нормой 0,2 л/т) и посевов (с нормой 0,5 л/га.) пшеницы в сочетании с прикатыванием после посева.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Karatayev M., Clarke M., Salnikov V., Bekseitova R., Nizamova M. Monitoring climate change, drought conditions and wheat production in Eurasia: the case study of Kazakhstan. *Heliyon*. Volume 8, Issue 1, 2022, e08660, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08660>
2. FAOSTAT. Selected indicators. Economic and political stability. 2023. <https://www.fao.org/faostat/en/#country/108>
3. Romanovska P., Schauburger B., Gornott C. Wheat yields in Kazakhstan can successfully be forecasted using a statistical crop model. *European Journal of Agronomy*. Volume 147. 2023. 126843. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126843>
4. Schierhorn F., Hofmann M., Adrian I., Bobojonov I., Müller D. Spatially varying impacts of climate change on wheat and barley yields in Kazakhstan. *Journal of Arid Environments*. Volume 178. 2020. 104164. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104164>.
5. Агроклиматические ресурсы Акмолинской области: научно-прикладной справочник / Под ред. С.С.Байшоланова - Астана. - 2017. - 133 с.
6. Валовой сбор основных сельскохозяйственных культур за 1990-2024гг. Бюро национальной статистики. Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/113764/>
7. Romanovska P., Schauburger B., Gornott C. Wheat yields in Kazakhstan can successfully be forecasted using a statistical crop model. *European Journal of Agronomy*. Volume 147. 2023. 126843. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126843>
8. Karatayev M., Clarke M., Salnikov V., Bekseitova R., Nizamova M. Monitoring climate change, drought conditions and wheat production in Eurasia: the case study of Kazakhstan. *Heliyon*. Volume 8. Issue 1. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08660>
9. Pavlova V.N., Varcheva S.E., Bokusheva R., Calanca P. Modelling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan. *Ecological Modelling*. Volume 277. 2014. Pages 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.01.014>
10. Teleubay Z, Yermekov F, Rustembayev A, Topayev S, Zhabayev A, Tokbergenov I, Garkushina V, Igilmanov A, Shelia V, Hoogenboom G. Comparison of Climate Change Effects on Wheat Production under Different Representative Concentration Pathway Scenarios in North Kazakhstan. *Sustainability*. 2024; 16(1):293. <https://doi.org/10.3390/su16010293>
11. Rajesh Kumar Singhal, Saurabh Pandey, Bandana Bose. Seed priming with Mg(NO₃)₂ and ZnSO₄ salts triggers physio-biochemical and antioxidant defense to induce water stress adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Stress*. - 2021. - Vol 2. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100037>

12. Kiss, István. (2011). Significance Of Wheat Production In World Economy And Position Of Hungary In It. Abstract: Applied Studies in Agribusiness and Commerce. 05. 10.19041/Abstract/2011/1-2/14.
13. de Sousa T., Ribeiro M., Sabença C., Igrejas G. The 10,000-Year Success Story of Wheat! Foods. 2021 Sep 8;10 (9): 2124. <https://doi.org/10.3390/foods10092124>
14. Senbeta A.F., Worku W.. Ethiopia's wheat production pathways to self-sufficiency through land area expansion, irrigation advance, and yield gap closure. Heliyon. Volume 9, Issue 10. 2023. e20720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20720>.
15. Shewry P.R., Hey S.J. The contribution of wheat to human diet and health. Food Energy Secur. 2015 Oct;4(3):178-202. <https://doi.org/10.1002/fes3.64>
16. Официальный сайт службы сельского хозяйства МСХ США. 2025. <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0410000>
17. Shiferaw B., Smale M., Braun H.J. et al. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. Food Sec. 5, 291-317 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y>
18. FAO. 2024. Crop Prospects and Food Situation - Triannual Global Report No.3, November 2024.Rome. <https://doi.org/10.4060/cd3168en>
19. Diego N. L. Pequeno, Ixchel M Hernández-Ochoa, Matthew Reynolds, Kai Sonder, Anabel MoleroMilan, Richard D Robertson, Marta S Lopes, Wei Xiong, Martin Kropff, Senthold Asseng. Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. Environmental Research Letters. Volume 16. Number 5. 054070. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd970>
20. Dixon, John & Braun, H.J. & Crouch, J. (2009). Transitioning wheat research to serve the future needs of the developing world. Wheat Facts and Futures. 1-25. <https://repository.cimmyt.org/xmlui/handle/10883/3978>
21. C. Zhao et. al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 114 (35) 9326-9331, <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114> (2017).
22. Nancy A Eckardt et. al. Climate change challenges, plant science solutions, The Plant Cell, Volume 35, Issue 1, January 2023, Pages 24-667 <https://doi.org/10.1093/plcell/koac303>
23. David B. Lobell et al., Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. Science. 333, 616-620(2011). <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
24. Challinor A., Watson J., Lobell D. et al. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nature Clim Change 4, 287-291 (2014). <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>.
25. Rosenzweig C., Jones J.W., Hatfield J.L., Ruane A.C., Boote K.J., Thorburn P., Antle J.M., Nelson G.C., Porter C., Janssen S., Asseng S., Basso B., Ewert F., Wallach D., Baigorría G., Winter J.M. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies.

Agricultural and Forest Meteorology. Volume 170. 2013. Pages 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>.

26. Bing Liu, Pierre Martre, Frank Ewert et al., Global wheat production with 1.5 and 2.0°C above pre-industrial warming. Global Change Biology. Volume 25, Issue 4 Apr 2019 Pages i-ii, e4-e6, 1191-1547. <https://doi.org/10.1111/gcb.14542>

27. Ahmed HGM-D., Zeng Y., Shah A.N., Yar M.M., Ullah A. Ali M. (2022) Conferring of drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using seedling indices. Front. Plant Sci. - 2022. -Vol. 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.961049>

28. Zulkiffal M., Ahsan A., Ahmed J., Musa M., Kanwal A., Saleem M., Makky Javaid, M.. Heat and Drought Stresses in Wheat (*Triticum aestivum* L.): Substantial Yield Losses, Practical Achievements, Improvement Approaches, and Adaptive Mechanisms. Intech Open. - 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92378>

29. Fehér I. et al. (2017). Kazakhstan's Wheat Production Potential. In: Gomez y Paloma, S., Mary, S., Langrell, S., Ciaian, P. (eds) The Eurasian Wheat Belt and Food Security. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33239-0_11

30. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Fourth Assessment Report: Climate Change. Geneva; - 2007. - URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf (дата обращения 03.09.2024)

31. Казахстан рискует в два раза снизить урожайность пшеницы из-за изменения климата.-2020г. URL:https://forbes.kz/process/resources/kazakhstan_riskuet_v_dva_raza_sokratit_u_rojajnost_pshenitsyi_iz-za_izmeneniya_klimata/ (дата обращения 02.09.2024)

32. Abhishek Ranjan, Derrick Mario Denis, Arpan Sherring, Mukesh Kumar, Vikram Singh, and Shalini Masih. 2023. “Water Requirements of Wheat Crops in a Small Watershed by Using CROPWAT”. International Journal of Environment and Climate Change. 13 (2):126–133. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i21662>

33. Tian, Y., Liu, W., Chen, T. et al. Variations in wheat water requirement and climatic causes in arid regions of northwest China. Environ Monit Assess. 197, 172 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13619-0>

34. Акшалов К.А., Байшоланов С.С., Баймуканова О.Н., Ауесханов Д.А., Кужинов М.Б. Анализ агрометеорологических условий вегетационного периода 2020 и 2021 годов в северном Казахстане: Особенности и меры адаптации к изменению климата. Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина (междисциплинарный). - 2022. - №3 (114). - Ч.1. - С. 161-176.

35. Schierhorn F., Hofmann M., Adrian I, Bobojonov I., Müller D. Spatially varying impacts of climate change on wheat and barley yields in Kazakhstan. Journal of Arid Environments. Volume 178, 2020, 104164. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104164>

36. Guo Q., Wang Y., Zhang H. Alleviation of adverse effects of drought stress on wheat seed germination using atmospheric dielectric barrier discharge plasma treatment. *Sci Rep.* -2017. -№7.-P.166-180 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16944-8>
37. Masa Malko M., Khanzada A., Xiao Wang, Samo A., Qing Li, Dong Jiang, Jian Cai. Chemical treatment refines drought tolerance in wheat and its implications in changing climate: A review, *Plant Stress.* - 2022. - Vol. 6. - P. 100-118. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100118>
38. Basu S., Ramegowda V., Kumar A., Pereira A. Plant adaptation to drought stress [version 1; peer review: 3 approved]. *F1000Research.* -2016. -Vol. 5. -P.1554 <https://doi.org/10.12688/f1000research.7678.1>
39. Kido É.A., Ferreira-Neto, J.R.C., Pandolfi V., de Melo Souza A.C., Benko-Iseppon A.M. Drought Stress Tolerance in Plants: Insights from Transcriptomic Studies. In *Drought Stress Tolerance in Plants.* - 2016. - Vol. 2. - P. 153–185.
40. Nezhadahmadi A., Hossain Z., Golam Faruq P. Drought Tolerance in Wheat, *The Scientific World Journal.*, Article ID 610721. - 2013. - Vol. 2013. - P.12. <https://doi.org/10.1155/2013/610721>
41. Faisal S., Mujtaba S., Khan M., Mahboob W.. Morphophysiological assessment of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought stress tolerance at seedling stage. *Pak. J. Bot.* -2017. - Vol. 49. - P. 445-452.
42. Mahpara S., Zainab A., Ullah R., Kausar S., Bilal M., Latif M. I. The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *PLoS ONE*7, e0262937. - 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262937>
43. Shaffique S., Imran M., Kang S-M., Khan M.A., Asaf S., Kim W-C., Lee I-J. Seed Bio-priming of wheat with a novel bacterial strain to modulate drought stress in Daegu, South Korea. *Front. Plant Sci.* - 2023. - Vol. 14. -P. 941- 1118. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118941>
44. Zhao Q., Ma Y., Huang X., Song L., Li N., Qiao M., Li T., Hai D., Cheng Y. GABA Application Enhances Drought Stress Tolerance in Wheat Seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Plants.* - 2023. - Vol.12(13). - P. 2495. <https://doi.org/10.3390/plants12132495>
45. Gholizadeh F., Janda T., Gondor O.K., Pál M., Szalai G., Sadeghi A., Turkoglu A. Improvement of Drought Tolerance by Exogenous Spermidine in Germinating Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plants Is Accompanied with Changes in Metabolite Composition. *Int J Mol Sci.* - 2022. - Vol.12. -№23(16). - P.9047. <https://doi.org/10.3390/ijms23169047>
46. Zeng, D. and Luo, X. Physiological Effects of Chitosan Coating on Wheat Growth and Activities of Protective Enzyme with Drought Tolerance. *Open Journal of Soil Science*, 2012. - Vol. 2, P. 282-288. <https://doi.org/10.4236/ojss.2012.23034>
47. Aksenov M., Petrov N., Zvereva G., Belyaev A., Pugacheva A. Optimal parameters of sunflower seeds complex pre-sowing treatment. *Journal of Physics:*

Conference Series. -2021. 2060. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/012001>

48. Wu S., Hu C., Tan Q., Nie Z., Sun X. Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress. Plant Physiol Biochem. - 2014. - Vol. 83. - P.365-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.022>

49. Nawaz F., Yasin Ashraf M., Ahmad R., Ahmad Waraich E., Nauman Shabbir R. Selenium (Se) Regulates Seedling Growth in Wheat under Drought Stress". Advances in Chemistry., Article ID 143567. – 2014. - Vol. 2014. - P.7 <https://doi.org/10.1155/2014/143567>

50. Ashraf M. Inducing drought tolerance in plants: Recent advances. Biotechnology Advances. - 2010.- Vol. 28. - Issue 1. -P.169-183. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.11.005>

51. Khan, M. A., Waseem Akram, M., Iqbal, M., Ghulam Muhu-Din Ahmed, H., Rehman, A., Arslan Iqbal, H. S. M., & Alam, B. (2022). Multivariate and Association Analyses of Quantitative Attributes Reveal Drought Tolerance Potential of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 54(2), 178-195. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2110893>

52. Zampieri M., Ceglar A., Dentener F., Toreti A. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. 2017. Environmental Research Letters, Volume 12, Number 6. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b>

53. Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E., & Pessarakli, M. (2022). Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches-a review. Journal of Plant Nutrition, 46(9), 2198-2230. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720>

54. Blum A., Ramaiah S., Kanemasu E.T., Paulsen G.M.. Wheat recovery from drought stress at the tillering stage of development. Field Crops Research. - 1990. -Vol. 24. -Issues 1-2.- P. 67-85. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90022-4).

55. Pufang Li, Baoluo Ma, Jairo A. Palta, Tongtong Ding, Zhengguo Cheng, Guangchao Lv, Youcai Xiong. Wheat breeding highlights drought tolerance while ignores the advantages of drought avoidance: A meta-analysis. European Journal of Agronomy. -2021. – Vol. 122. - P.126-196. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126196>

56. Sangtarash MH. Responses of different wheat genotypes to drought stress applied at different growth stages. Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS. - 2010. - Vol. 13(3). - P.114-119. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2010.114.119>

57. Yang, J. and Zhang, J. (2006), Grain filling of cereals under soil drying. New Phytologist. -2006. - Vol. 169. - P.223-236. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01597.x>

58. Abid M., Ali S., Qi L.K. et al. Physiological and biochemical changes during drought and recovery periods at tillering and jointing stages in wheat (*Triticum aestivum* L.). Sci Rep.-2018. -Vol. 8, - P.4615 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21441-7>
59. Gregorova Z., Kovacik J., Klejdus B., Maglovski M., Kuna R., Hauptvogel P., & Matusikova, I. Drought-induced responses of physiology, metabolites, and PR proteins in *Triticum aestivum*. Journal of agricultural and food chemistry. - 2015. -№63 (37).- P. 8125-8133. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02951>
60. Jisha K.C., Vijayakumari K., Puthur J.T. Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview. Acta Physiol Plant. - 2013. - №35. - P. 1381–1396. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1186-5>
61. John M. Clarke. 1986. Effect of leaf rolling on leaf water loss in *Triticum* spp. Canadian Journal of Plant Science. 66(4): 885-891. <https://doi.org/10.4141/cjps86-111>
62. Ali, Z., Merrium, S., Habib-ur-Rahman, M. et al. Wetting mechanism and morphological adaptation; leaf rolling enhancing atmospheric water acquisition in wheat crop a review. Environ Sci Pollut Res. 29, 30967-30985 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18846-3>
63. Kadioglu, A., Terzi, R. A dehydration avoidance mechanism: Leaf rolling. Bot. Rev. 73, 290-302 (2007). [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2007\)73](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2007)73)
64. Benito-Verdugo P., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Almendra-Martín L., Gaona J., Herrero-Jiménez C.M. Impact of AgriSiltural Drought on Barley and Wheat Yield: A Comparative Case Study of Spain and Germany. AgriSilture. 2023, 13, 2111. <https://doi.org/10.3390/agriSilture13112111>
65. Wan C, Dang P, Gao L, Wang J, Tao J, Qin X, Feng B and Gao J (2022) How Does the Environment Affect Wheat Yield and Protein Content Response to Drought? A Meta-Analysis. Front. Plant Sci. 13:896985. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.896985>
66. Yang J., Yang R., Liang Xi., Marshall J. M., Neibling W. (2023). Impact of drought stress on spring wheat grain yield and quality. Agrosystems, Geosciences & Environment,6, e20351. <https://doi.org/10.1002/agg2.20351>
67. Liu E.K., Mei X.R., Yan C.R., Gong D.Z., Zhang Y.Q. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. Agricultural Water Management. - 2016. -Vol. 167. - P. 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.026>
68. Xiao Wang, Qing Li, Jingjing Xie, Mei Huang, Jian Cai, Qin Zhou, Tingbo Dai, Dong Jiang. Abscissic acid and jasmonic acid are involved in drought priming-induced tolerance to drought in wheat. The Crop Journal. -2021. -Vol. 9.- Issue 1.- P. 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.06.002>
69. Pessarkli M. Hand book of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker Inc. - 1999. - P.697.

70. Reynolds M., Tuberosa R. Translational research impacting on crop productivity in drought-prone environments. *Curr Opin Plant Biol.* - 2008. - №11 (2). - P.171-179. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.02.005>
71. Nisa W., Nisa V., Nagoo S.A., Dar Z.A. Drought tolerance mechanism in wheat: A Review. *The Pharma Innovation Journal.* -2019. -№ 8(2).- P. 714-724
72. Lukács A., Pártay G., Németh T., Csorba S., Farkas C. Drought stress tolerance of two wheat genotypes. *Soil & Water Res.* 2008. - Vol. 3 (Special Issue 1). - P 95-104. <https://doi.org/10.17221/10/2008-SWR>
73. Rakszegi M., Lovegrove A., Balla K., Láng L., Bedő Z., Veisz O., R. Shewry P. Effect of heat and drought stress on the structure and composition of arabinoxylan and β -glucan in wheat grain. *Carbohydrate Polymers.* - 2014. - Vol 102. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.005>
74. Moreno-Jiménez E., Plaza C., Saiz H. et al. Aridity and reduced soil micronutrient availability in global drylands. *Nat Sustain* 27 - 2019. - Vol. 7 - P.371-377. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0262-x>
75. Anwar S., Khalilzadeh R., Khan, S. et al. Mitigation of Drought Stress and Yield Improvement in Wheat by Zinc Foliar Spray Relates to Enhanced Water Use Efficiency and Zinc Contents. *Int. J. Plant Prod.* - 2021. - Vol. 7 - №157. - P.377-389. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00136-6>
76. Mdluli, S.Y., Shimelis, H., & Mashilo, J. Screening for pre- and post-anthesis drought responses in selected bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science.* - 2020. - Vol. 70 (4). -P.272-284. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1725105>
77. Arjenaki G.F., Jabbari R., Morshedi A. Evaluation of drought stress on relative water content, chlorophyll content and mineral elements of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Int.J.Agricrop Sci.*-2012.-Vol. 4(11). - P.726-729
78. Mohi-Ud-Din, M., Hossain M.A., Rohman M.M., Uddin M.N., Haque M.S., Ahmed J.U., Hossain A., Hassan M.M., Mostofa M.G. Multivariate Analysis of Morpho-Physiological Traits Reveals Differential Drought Tolerance Potential of Bread Wheat Genotypes at the Seedling Stage. *Plants.* - 2021. - Vol. 10.- P. 879. <https://doi.org/10.3390/plants10050879>
79. Qamari P., Shekari F., Afsahi K. Response of wheat Siltivars to zinc application for seed yield and quality improvement. *The Journal of AgriSiltural Science.* - 2023.- №161(4). -P.549-562. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000473>
80. Janmohammadi M., Mohamadzadeh-Alghoo M., Sabaghnia N., Ion V., Naeem S. Seed pre-sowing treatments and essential trace elements application effects on wheat performance. *Acta AgriSilturae Slovenica.* - 2023. - Vol. 119 (1). - P. 1-10. <https://doi.org/10.14720/aas.2023.119.1.2671>
81. Zhou Guoqin, Shen Guanyu, Chen Zhenzhen, Xie Xudong, Yin Zhigang, Shi Shoushe, Zhu Baolei, Chen Hong. Effects of Trace Elements on Yield and Quality of Wheat [J]. *Journal of AgriSilture.* - 2023. - Vol. 13(1). - P.11-15. <https://doi.org/10.11923/j.issn.2095-4050.cjas2022-0118>

82. Zhao D., Shen J., Lang K., Liu Q., Li Q. Effects of irrigation and wide-precision planting on water use, radiation interception, and grain yield of winter wheat in the north China plain. *Agric. Water Manage.* - 2013. - Vol. 118. -P.87-92. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.019>
83. Gao Z., Wang Y., Tian G., Zhao Y., Li C., Cao Q., et al. Plant height and its relationship with yield in wheat under different irrigation regime. *Irrig. Sci.*- 2020.- Vol. 38 (4). -P. 365–371. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00678-z>
84. Memon S. A., Sheikh I. A., Talpur M. A., Mangrio M. A. Impact of deficit irrigation strategies on winter wheat in semi-arid climate of sindh. *Agric. Water Manage.*- 2020. -Vol. 243. -P. 106389. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106389>
85. Haque M.S., Saha N.R., Islam M.T. et al. Screening for drought tolerance in wheat genotypes by morphological and SSR markers. *J. Crop Sci. Biotechnol.* - 2021.- Vol. 24. - P.27–39. <https://doi.org/10.1007/s12892-020-00036-7>
86. Kumar P., Gupta V., Singh C. et al. Capturing the Variability for Heat and Drought Tolerance in Wheat Using Multiple Selection Indices. *Journal of Crop Health.* -2024. - Vol. 76. -P.219-234.<https://doi.org/10.1007/s10343-023-00938-w>
87. Bao Xiaoyuan, Hou Xiaoyang, Duan Weiwei, Yin Baozhong, Ren Jianhong, Wang Yandong, Liu Xuejing, Gu Limin, Zhen Wenchao. Screening and evaluation of drought resistance traits of winter wheat in the North China Plain. *Frontiers in Plant Science.* - 2023. -Vol. 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1194759>
88. Fangming Mei, Bin Chen, Linying Du, Shumin Li, Dehe Zhu, Nan Chen, Yifang Zhang, Fangfang Li, Zhongxue Wang, Xinxiu Cheng, Li Ding, Zhensheng Kang, Hude Mao, A gain-of-function allele of a DREB transcription factor gene ameliorates drought tolerance in wheat, *The Plant Cell.* - 2022. -Vol. 34. P.4472-4494. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac248>
89. Begna T. Drought's Harmful Effect on Crops Production and its Mitigation Approaches. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences (IJRSAS)* Volume 10, Issue 2, 2024, PP 1-23 DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-6224.1002001>
90. Wang L., Shangguan Z. Water–use efficiency of dryland wheat in response to mulching and tillage practices on the Loess Plateau. *Sci Rep.* 5, 12225 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep12225>
91. Cabusora CC. 2024. Developing climate-resilient crops: adaptation to abiotic stress-affected areas. *Technology in Agronomy.* 4: e005 doi:10.48130/tia-0024-0002
92. Kingra P.K., Kaur J., Kaur R. Management Strategies for Sustainable Wheat (*Triticum Aestivum L.*) Production Under Climate Change in South Asia – A Review. Vol. 19, No. 1, pp. 21-34 (2019) *Journal of Agricultural Physics.* <https://www.agrophysics.in/admin/adminjournalpdf/202008081359081332905113/journal-1844597927.pdf>
93. Mutanda, M., Shimelis, H., Chaplot, V., & Figlan, S. (2025). Managing drought stress in wheat (*Triticum aestivum L.*) production: strategies and impacts.

South African Journal of Plant and Soil, 42 (1-3), 1-12.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2025.2497229>

94. Shahzad S., Khan M.I., Alsamadany H., Zahran Y.Al., Ahmed Z. Shah Z.H. Climate Change and Mitigation: Discussion of Climate-Smart Agronomical and Breeding Tools in view of the Global Food Security Dynamics. 2019. Journal of Agronomy & Agricultural Science. DOI:10.24966/AAS-8292/100010

95. Berkman P.J., Lai K., Lorenc M.T., Edwards D. Next-generation sequencing applications for wheat crop improvement†. American Journal of Botany. - 2012. - Vol. 99. - P.365-371. <https://doi.org/10.3732/ajb.1100309>

96. Singh C., Yadav S., Khare V., Gupta V., Patial M., Kumar S., Mishra C.N., Tyagi B.S., Gupta A., Sharma A.K. Wheat Drought Tolerance: Unveiling a Synergistic Future with Conventional and Molecular Breeding Strategies. Plants. 2025; 14 (7):1053. <https://doi.org/10.3390/plants14071053>

97. Rehman Hu, Tariq A., Ashraf I., Ahmed M., Muscolo A., Basra SMA, Reynolds M. Evaluation of Physiological and Morphological Traits for Improving Spring Wheat Adaptation to Terminal Heat Stress. Plants. – 2021. - Vol. 10(3). - P.455. <https://doi.org/10.3390/plants10030455>

98. Ashfaq W., Brodie G., Fuentes S., Gupta D. Infrared Thermal Imaging and Morpho-Physiological Indices Used for Wheat Genotypes Screening under Drought and Heat Stress. Plants.- 2022. - Vol. 11(23). - P.3269. <https://doi.org/10.3390/plants11233269>

99. Chowdhury M.K., Hasan M.A., Bahadur M.M., Islam M.R., Hakim M.A., Iqbal M.A., Javed T., Raza A., Shabbir R., Sorour S., et al. Evaluation of Drought Tolerance of Some Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes through Phenology, Growth, and Physiological Indices. Agronomy. - 2021. -Vol. 11. - P. 1792. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091792>

100. Gabay G., Wang H., Zhang J. et al. Dosage differences in 12-Oxophytodienoate reductase genes modulate wheat root growth. Nat Commun.- 2023. -Vol. 14.-P.539. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36248-y>

101. Spiertz J.H.J., Struik P.C., van Laar H.H. Scale and complexity in plant systems research: Gene-plant-crop relations. -2007. -Vol. 21. P.212-219

102. Guizani A, Babay E, Askri H, Sialer MF, Gharbi F. Screening for drought tolerance and genetic diversity of wheat varieties using agronomic and molecular markers. Mol Biol Rep.- 2024. - Vol. 51(1). - P.432. <https://doi.org/10.1007/s11033-024-09340-9>

103. Dorostkar S., Dadkhodaie A., Heidari B. Evaluation of grain yield indices in hexaploid wheat genotypes in response to drought stress. Archives of Agronomy and Soil Science. -2014. - Vol. 61(3). P. 397-413. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.936855>

104. Zhao Z., Wang E., Kirkegaard J.A. et al. Novel wheat varieties facilitate deep sowing to beat the heat of changing climates. Nat. Clim. Chang. - 2022. - Vol. 12. - P. 291–296. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01305-9>

105. Singh, A., Singh, D., Kang, J. S., & Aggarwal, N. (2011). Management practices to mitigate the impact of high temperature on wheat: a review. IIOAB J, 2 (7), 11-22. <https://scispace.com/pdf/management-practices-to-mitigate-the-impact-of-high-2r3xf2ddu5.pdf>
106. Kunanbayev K., Scoblikov V., Solovyov O., Tulayev Y., Churkina G., Zueva N., Bekeshev, B. (2024). Influence of Sowing Dates, Soil Fertility and Crop Rotation System on Increasing the Yield Level of Various Varieties of Spring Wheat (*Triticum Aestivum* L.). OnLine Journal of Biological Sciences, 24(1), 1-8. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2024.1.8>
107. Richards R.A. Lukacs Z. Seedling vigour in wheat - sources of variation for genetic and agronomic improvement. Australian Journal of Agricultural Research. - 2002. - Vol. 53.- P. 41-50. <https://doi.org/10.1071/AR00147>
108. Di He, Enli Wang, Jing Wang, Julianne M. Lilley. Genotype×environment×management interactions of canola across China: A simulation study. Agricultural and Forest Meteorology. - 2017. – Vol. 247. - P.424-433. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.027>
109. Dhakal A A. (2021). Effect of Drought Stress and Management in Wheat - A Review. Food Agribusiness Management, 2(1): 62-66. DOI: <http://doi.org/10.26480/fabm.02.2021.62.66>
110. Shestakova N., Shelia V., Absattarova A., Shvidchenko V., Nurpeissov D., Gordeyeva, Y., Hoogenboom, G. (2024). Adaptation of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.) to steppe and dry steppe growing conditions. Cogent Food & Agriculture, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2412732>
111. Bali A. S. et al. Biological Trace Elements Confer Abiotic Stress Tolerance in Plants. CABI Books. CABI. 2022. - Vol. 47.- P.306-322 <https://doi.org/10.1079/9781789248098.0019>
112. Abdel-Motagally F.M.F., Manal El-Zohri. Improvement of wheat yield grown under drought stress by boron foliar application at different growth stages. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. - 2018. Vol. 17. - Issue 2. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.03.005>
113. Da Silva Folli-Pereira M., Ramos A.C., Canton G.C., da Conceição J.M., de Souza S.B., Cogo A.J.D., Figueira F.F., Eutrópio F.J. and Rasool N. Foliar application of trace elements in alleviating drought stress. In Water Stress and Crop Plants, P. Ahmad (Ed.). -2016. <https://doi.org/10.1002/9781119054450.ch38>
114. Shamsi Keyvan. The effects of drought stress on yield, relative water content, proline, soluble carbohydrates and chlorophyll of bread wheat cultivars. Journal of Animal & Plant Sciences. - 2010. -Vol. 8. -Issue 3.- P.1051- 1060
115. Hasanuzzaman M., Mahmud J.A., Anee T.I., Nahar K., Islam M.T. Drought Stress Tolerance in Wheat: Omics Approaches in Understanding and Enhancing Antioxidant Defense. In: Zargar, S., Zargar, M. (eds) Abiotic Stress-Mediated Sensing and Signaling in Plants: An Omics Perspective. Springer, Singapore. -2018. -P.267-307. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7479-0_10

116. Mehrinfar A.R., Rezaei Moradali M., Mirmahmoody T., Yazdan Seta S., Yazdan Setad S. The effect of foliar application of nutrients and humic acid on grain yield and quality of bread wheat cultivars under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. -2023. - Vol.16. - № 1. - P.1-18. <https://doi.org/10.22077/escs.2022.4234.2000>
117. Mahdy R. E., Farghali K. A. Role of Zinc on Drought Tolerance in Some Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars under Reduced Soil Water. *Egyptian Journal of Agronomy*. - 2021. - Vol 43(3). - P. 417-430. <https://doi.org/10.21608/agro.2022.105221.1291>
118. Ma D., Sun D., Wang C., Ding H., Qin H., Hou J., Huang X., Xie Y., Guo T. Physiological Responses and Yield of Wheat Plants in Zinc-Mediated Alleviation of Drought Stress. *Front. Plant Sci.* - 2017. – Vol. 8. - P.860. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860>
119. Raeisi Sadati SY., Jahanbakhsh Godehkahriz S., Ebadi A., Sedghi M. Zinc Oxide Nanoparticles Enhance Drought Tolerance in Wheat via Physio-Biochemical Changes and Stress Genes Expression. *Iran J Biotechnol.* - 2022. - Vol. 20 (1). - P.3027. <https://doi.org/10.30498/ijb.2021.280711.3027>
120. Taran N., Storozhenko V., Sviatlova N. Effect of Zinc and Copper Nanoparticles on Drought Resistance of Wheat Seedlings. *Nanoscale Res Lett.* - 2017. -Vol. 12. P.60. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1839-9>
121. Rai-Kalal P., Jajoo A. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*. -2021. - Vol. 160. -. P.341-351. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.032>
122. Nile S.H., Thiruvengadam M., Wang Y., Samynathan R., Shariati M.A., Rebezov M., Nile A., Sun M., Venkidasamy B., Xiao J., Kai G.. Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture-recent developments and future perspectives. *J Nanobiotechnology*. - 2022. -Vol. 3. 20(1). - P.254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
123. Hai-jun Gong, Kun-ming Chen, Guo-cang Chen, Suo-min Wang, Cheng-lie Zhang. Effects of Silicon on Growth of Wheat Under Drought. *Journal of Plant Nutrition*. -2003.- Vol. 26. - Issue 5. P.1055-1063. <https://doi.org/10.1081/PLN-120020075>
124. Marylyn M. Christian, Hussein Shimelis, Mark D. Laing, Toi J. Tsilo & Isack Mathew. Breeding for silicon-use efficiency, protein content and drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.): a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*. - 2022. - Vol. 72:1. - P.17-29
125. Alejandro Santiago, Höller Stefanie, Meier Bastian, Peiter Edgar. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*. - 2020. - Vol.11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
126. Rukhsar-Ul-Haq, Kausar A., Hussain S., Javed T., Zafar S., Anwar S., Hussain S., Zahra N., Saqib M. Zinc oxide nanoparticles as potential hallmarks for

enhancing drought stress tolerance in wheat seedlings. *Plant Physiol Biochem.* - 2023. - Vol. 195. - P.341-350. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.014>

127. Zhu J., Zou Z., Shen Y., Li J., Shi S., Han S., Zhan X. Increased ZnO nanoparticle toxicity to wheat upon co-exposure to phenanthrene. *Environ Pollut.* - 2019. – Vol. 247. - P.108-117. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.046>

128. El Rasafi T., Nouri M., Bouda S., Haddioui A. The effect of Cd, Zn and Fe on seed germination and early seedling growth of wheat and bean. *Ekológia (Bratislava).* - 2016. -Vol. 35. - № 3. – P. 213–223. <https://doi.org/10.1515/eko-2016-0017>

129. Shaikh, Isak Rajjak, Parveen Rajjak Shaikh, Rafique Ahmed Shaikh and Alamgir Abdulla Shaikh. “Phytotoxic effects of Heavy metals (Cr, Cd, Mn and Zn) on Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seed Germination and Seedlings growth in Black Cotton Soil of Nanded, India. - 2013. - Vol. 3(6).

130. Wang H., Zhong G., Shi G., Pan, F. (2011). Toxicity of Si, Pb, and Zn on seed germination and young seedlings of wheat (*Triticum aestivum* L.). In *Computer and Computing Technologies in AgriSilture IV: 4th IFIP TC 12 Conference, CCTA 2010, Nanchang, China, Springer Berlin Heidelberg.* – 2010. - Part III 4. - P.231-240. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18354-6_29

131. Carvalho A., Reis S., Pavia I., Lima-Brito J.E. Influence of seed priming with iron and/or zinc in the nucleolar activity and protein content of bread wheat. *Protoplasma.* - 2019. -Vol. 256. - Issue 3. - P.763-775. <https://doi.org/10.1007/s00709-018-01335-1>

132. Reis S., Pavia I., Carvalho A., Moutinho-Pereira J., Correia C., Lima-Brito J. Seed priming with iron and zinc in bread wheat: effects in germination, mitosis and grain yield. *Protoplasma.* -2018. -Vol.255(4). - P.1179-1194. <https://doi.org/10.1007/s00709-018-1222-4>

133. Rehman A., Farooq M., Ahmad R., Basra S.M.A. Seed priming with zinc improves the germination and early seedling growth of wheat. *Seed Science and Technology.* -2015. -Vol. 43(2). - P.262-268. <https://doi.org/10.15258/sst.2015.43.2.15>

134. Imtiaz M., Alloway B.J., Shah K.H., Siddiqui S.H., Memon M.Y., Aslam M., Khan P. Zinc Nutrition of Wheat: II: Interaction of Zinc with other Trace Elements. *Asian Journal of Plant Sciences.* - 2003. -Vol. 2. -P.156-160. <https://doi.org/10.3923/ajps.2003.156.160>

135. Hafeez M.B., Ramzan Y., Khan S., Ibrar D., Bashir S., Zahra N., Rashid N., Nadeem M., Rahman S. U., Shair H., Ahmad J., Hussain M., Irshad S., Al-Hashimi A., Alfagham A., Diao Z. H.. Application of Zinc and Iron-Based Fertilizers Improves the Growth Attributes, Productivity, and Grain Quality of Two Wheat (*Triticum aestivum*) Siltivars. *Frontiers in nutrition.* – 2021. -Vol. 8. – P. 779595. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.779595>

136. Guo X., Ma X., Zhang J. et al. Meta-analysis of the role of zinc in coordinating absorption of mineral elements in wheat seedlings. *Plant Methods.* - 2021. -Vol. 17. - P.105 <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00805-7>

137. Yang B, Wen H, Wang S, Zhang J, Wang Y, Zhang T, Yuan K, Lu L, Liu Y, Xue Q. Enhancing Drought Resistance and Yield of Wheat through Inoculation with *Streptomyces pactum* Act12 in Drought Field Environments. *Agronomy*. 2024; 14(4):692. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040692>
138. Ahmad A., Aslam Z., Abbas R.N., Bellitürk K., Hussain S., Ahmad M., Zulfiqar U., Moussa I.M., Elshikh M.S. Enhancing Wheat Crop Resilience to Drought Stress through Cellulolytic Microbe-Enriched Cow Dung Vermicompost. *ACS Omega* 2024, 9, 2123-2133. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04402>
139. Meenakshi, Annapurna, K., Govindasamy, V. et al. Mitigation of drought stress in wheat crop by drought tolerant endophytic bacterial isolates. *Vegetos*. 32, 486–493 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42535-019-00060-1>
140. Chetverikov S., Kuzina E., Feoktistova A., Timergalin M., Rameev T., Bakaeva M., Zaitsev G., Davydychev A., Korshunova, T. (2024). Mitigation of the Negative Effect of Drought and Herbicide Treatment on Growth, Yield, and Stress Markers in Bread Wheat as a Result of the Use of the Plant Growth Regulator Azolen. *Plants*, 13(16), 2297. <https://doi.org/10.3390/plants13162297>
141. Қазақстан Республикасында пайдалануға ұсынылған селекциялық жетістіктердің мемлекеттік тізбесі/Государственный реестр селекционных достижений, рекомендуемых к использованию в Республике Казахстан-Астана. -2025.-149с.
142. Michel B.E., Kaufmann M.R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.* – 1973. -Vol. 51(5). –P.914-916. <https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914>
143. Ещенко В.Е. Основы опытного дела в растениеводстве / В.Е. Ещенко, М.Ф. Трифонова, П.Г. Копытко и др.; Под ред. В.Е. Ещенко и М.Ф. Трифоновой. - Москва: Колос. - 2013. - 268 с.
144. Dreisigacker S., D. Sehgal A.E Reyes-Jaimez B. Luna-Garrido, S. Muñoz-Zavala, C. Núñez-Ríos, J. Mollins and S. Mall. CIMMYT Wheat Molecular Genetics: Laboratory Protocols and Applications to Wheat Breeding. CIMMYT, 2016.
145. Myakishev MV, Khripin Y, Hu S, Hamer DH. High-throughput SNP genotyping by allele-specific PCR with universal energy-transfer-labeled primers. *Genome Res*. 2001 Jan;11(1):163-9. <https://doi.org/10.1101/gr.1579012011>
146. Jatayev S, Kurishbayev A, Zotova L, Khasanova G, Serikbay D, Zhubatkanov A, Botayeva M, Zhumalin A, Turbekova A, Soole K, Langridge P, Shavrukov Y. Advantages of Amplifluor-like SNP markers over KASP in plant genotyping. *BMC Plant Biol.* 2017 Dec 28;17(Suppl 2):254. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1197-x>
147. Fu L. P. et al. Characterization of TaCOMT genes associated with stem lignin content in common wheat and development of a gene-specific marker // *Journal of Integrative Agriculture*. - 2019. - T. 18. - №. 5. -P. 939-947.
148. Zhang J, Xu Y, Chen W, Dell B, Vergauwen R, Biddulph B, Khan N, Luo H, Appels R, Van den Ende W. A wheat 1-FEH w3 variant underlies enzyme

activity for stem WSC remobilization to grain under drought. *New Phytol.* 2015 Jan;205(1):293-305. <https://doi.org/10.1111/nph.13030>

149. Zotova L, Kurishbayev A, Jatayev S, Goncharov NP, Shamambayeva N, Kashapov A, Nuralov A, Otemissova A, Sereda S, Shvidchenko V, Lopato S, Schramm C, Jenkins C, Soole K, Langridge P, Shavrukov Y. The General Transcription Repressor TaDr1 Is Co-expressed With TaVrn1 and TaFT1 in Bread Wheat Under Drought. *Front Genet.* 2019 Feb 8;10:63. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00063>

150. Wei, B., Jing, R., Wang, C. et al. Drebl genes in wheat (*Triticum aestivum* L.): development of functional markers and gene mapping based on SNPs. *Mol Breeding.* 23, 13-22 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11032-008-9209-z>

151. Qian L.I., Jing-yi WANG, Nadia Khan, Xiao-ping CHANG, Hui-min LIU, Rui-lian JING. Polymorphism and association analysis of a drought-resistant gene TaLTP-s in wheat. *Journal of Integrative Agriculture.* Volume 15, Issue 6. 2016. Pages 1198-1206. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61189-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61189-3)

152. Li B, Li Q, Mao X, Li A, Wang J, Chang X, Hao C, Zhang X, Jing R. Two Novel AP2/EREBP Transcription Factor Genes TaPARG Have Pleiotropic Functions on Plant Architecture and Yield-Related Traits in Common Wheat. *Front Plant Sci.* 2016 Aug 9;7:1191. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01191>

153. Wang H., Wang S., Chang, X. et al. Identification of TaPPH-7A haplotypes and development of a molecular marker associated with important agronomic traits in common wheat. *BMC Plant Biol.* 19, 296 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1901-0>

154. ГОСТ 12036-85 Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Правила приёмки и методы отбора проб. 2000. - 10 с. <https://fsvps.gov.ru/files/gost-12036-85-mezhgosudarstvennyj-standart-s/>

155. ГОСТ 12040-66. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения силы роста. <https://docs.cntd.ru/document/822914517>

156. The Interstate Standard. 12038-84. Agricultural seeds. Methods for determination of germination. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=38369226&pos=1;-8#pos=1;-8

157. Hellal F.A., El-Shabrawi H.M., Abd El-Hady M., Khatab I.A., El-Sayed S.A.A., Chedly Abdelly. Influence of PEG induced drought stress on molecular and biochemical constituents and seedling growth of Egyptian barley cultivars. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology.* - 2018. – Vol. 16. - Issue 1. - P. 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.10.009>

158. Barbero P., Beltrami M., Baudo R., Rossi D. Assessment of Lake Orta Sediments Phytotoxicity After the Liming Treatment. *Journal of Limnology.* – 2001. – Vol. 60 (2). -P. 269-76. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2001.1.269>

159. Chou C.H., Lin H.J. Autointoxication mechanism of *Oryza sativa* L. Phytotoxic effects of decomposing rice residues in soil. *J Chem Ecol* 2. – 1976. – Vol. 2. – P. 353-367 <https://doi.org/10.1007/BF00988282>
160. Методика проведения сортоиспытания сельскохозяйственных растений: утв. Приказ Министра сельского хозяйства Республики Казахстан 13 августа 2015 года, №06-2/254 https://zakon.pravительство_республики_kazakhstan_premier_ministr_rk/selskoe_hozyaystvo/i
161. Fisher R.A., Maurer R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses // *Aust. J. Agric. Res.* - 1978. - Vol. 28. - P. 897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
162. Павлова М.Д. Практикум по агрометеорологии: учебное пособие. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 183 с.
163. Benjamin L.R., Brian T., Brian G.M., Denis J.M. Growth Analysis, Crops, Editor(s) *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (Second Edition), Academic Press, 2017, Pages 23-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00225-2>
164. Можаяев Н., Серекпаев Н., Стыбаев Г. Программирование урожаев сельскохозяйственных культур: Учебное пособие.-Астана: Фолиант, 2013.-160с.
165. Правила проведения сортоиспытания сельскохозяйственных растений. Утверждены приказом Министра сельского хозяйства Республики Казахстан от 02 июля 2015 года. № 4-2/602. <https://zan.gov.kz/client/#!/doc/94052/rus/17.04.2017>
166. Эффективность сельскохозяйственного производства (методические рекомендации) /Под ред. И. Санду, В. Свободина, В. Нечаева, М. Косолаповой, В. Федоренко. -М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013.-228 с.
167. Продкорпорация объявила закупочные цены на зерно. 2024. АО «НК «Продкорпорация». https://fcc.kz/wp-content/uploads/2024/10/obyavlenie-zakup-ceny_osen-2024-g.pdf
168. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). - 5-е изд., дополнение и переработка-М.: Агропромиздат, 1985. - 351 с., ил. - (Учебники и учебные пособия. пособия для высших учебных заведений. исследования. учреждения)
169. Bashir, L., Budhlakoti N., Pradhan A.K. et al. Identification of quantitative trait nucleotides for grain quality in bread wheat under heat stress. [Text] *Scientific Reports*, 2025. – №15 – P.6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91199-2>
170. Huang X., Song X., Chen R., Zhang B., Li C., Liang Y., Qiu L., Fan Y., Zhou Z., Zhou H. et al. Genome-Wide Analysis of the DREB Subfamily in *Saccharum spontaneum* Reveals Their Functional Divergence During Cold and Drought Stresses. *Front. Genet.* 2020; 10:1326. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01326>

171. Mutanda, M., Shimelis, H., Chaplot, V., & Figlan, S. (2025). Managing drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) production: strategies and impacts. South African Journal of Plant and Soil, 42 (1-3), 1-12. <https://doi.org/10.1080/02571862.2025.2497229>
172. Yang B, Wen H, Wang S, Zhang J, Wang Y, Zhang T, Yuan K, Lu L, Liu Y, Xue Q, et al. Enhancing Drought Resistance and Yield of Wheat through Inoculation with *Streptomyces pactum* Act12 in Drought Field Environments. Agronomy. 2024; 14(4):692. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040692>
173. Dhakal A. (2021). Effect of Drought Stress and Management in Wheat - a Review. Food Agribusiness Management. <https://doi.org/10.26480/FABM.02.2021.62.66>
174. Hai-jun Gong, Kun-ming Chen, Guo-cang Chen, Suo-min Wang, Cheng-lie Zhang. Effects of Silicon on Growth of Wheat Under Drought. Journal of Plant Nutrition. Volume 26, 2003 - Issue 5. Pages 1055-1063. <https://doi.org/10.1081/PLN-120020075>
175. Broadley M., Brown P., Cakmak I., Rengel Z., Zhao F. Chapter 7 - Function of Nutrients: Micronutrients, Editor(s): Petra Marschner. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition). Academic Press. 2012
176. Gomaa, M. (2023). Biodegradable Plastics Based on Algal Polymers: Recent Advances and Applications. In: Ali, G.A.M., Makhlof, A.S.H. (eds) Handbook of Biodegradable Materials. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09710-2_20
177. Lutschak P., Amantayev B., Kipshakbayeva G., Stybayev G., Zargar M., Ebzeev D., Soltani Nejad M. Enhancing drought resistance in early-stage development of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.) using trace elements in a dry steppe zone. Research on Crops 25 (3): 394-402 (2024). <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2024>
178. Rizvi A., Zaidi F., Ameen B., Ahmed M. D. F., Al Kahtani and Mohd. S. K. Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. RSC Advances, 2020, 10, 38379. <http://dx.doi.org/10.1039/D0RA05610C>
179. Amantayev B., Kipshakbayeva G., Turbekova A., Kulzhabayev Y., Lutschak P. Enhancing Drought Resistance in Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) Through Chelated Zinc Seed Treatment: An Experimental Study. OnLine Journal of Biological Sciences 2025, 25 (1): 53-64 <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2025.53.64>
180. Berski W., Ziobro R., Gorczyca A., Oleksy A. (2025). The Effects of Sowing Density and Timing on Spike Characteristics of Durum Winter Wheat. Agriculture, 15(4), 359. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040359>
181. Behzad, M.A., Omerkhil, N. and Faqiryar, F.(2021). Influence of Different Seed Rates on the Growth and Yield Characteristics of Wheat Crop (*Triticum aestivum* L.): Case Study of Takhar Province, Afghanistan. Grassroots

Journal of Natural Resources, 4(4): 1-12.
<https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.040401>

182. Duvnjak J., Katanic Z., Sarcevic H., Spanic V. (2024). Analysis of the Photosynthetic Parameters, Grain Yield, and Quality of Different Winter Wheat Varieties over a Two-Year Period. *Agronomy*, 14(3), 478.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14030478>

183. Dong Wang, Winda Rianti, Fabián Gálvez, Peter E.L. van der Putten, Paul C. Struik, Xinyou Yin. Estimating photosynthetic parameter values of rice, wheat, maize and sorghum to enable smart crop cultivation. *Crop and Environment*. Volume 1, Issue 2. 2022. P 119-132.
<https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.05.004>

184. Zheng X, Yu Z, Yu F and Shi Y (2022) Grain-filling characteristics and yield formation of wheat in two different soil fertility fields in the Huang–Huai–Hai Plain. *Front. Plant Sci.* 13:932821. doi: 10.3389/fpls.2022.932821

185. Leilah A.A., Al-Khateeb S.A. Statistical analysis of wheat yield under drought conditions. *Journal of Arid Environments*. Volume 61, Issue 3. 2005. P.483-496. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.011>

186. Bezu, K.H., Chala, B.W., & Itticha, M.W. (2021). Economic Efficiency of Wheat Producers: The Case of Debra Libanos District, Oromia, Ethiopia. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(6): 953-960.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i6.953-960.4244>

187. Atamanyuk, I., Havrysh, V., Nitsenko, V., Diachenko, O., Tepliuk, M., Chebakova, T., & Trofimova, H. (2023). Forecasting of Winter Wheat Yield: A Mathematical Model and Field Experiments. *Agriculture*, 13(1), 41.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13010041>

188. Chen Y, Wutanbieke H, Zhong D, Chen J, Huo Z and Dong H (2025) Spatial patterns and key driving factors of wheat harvest index under irrigation and rainfed conditions in arid regions. *Front. Plant Sci.* 16:1614204.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1614204>

189. Kamruzzaman, Mohd., Manos, B., & Begum, Moss. A. A. (2006). Evaluation of Economic Efficiency of Wheat Farms in a Region of Bangladesh under the Input Orientation Model. *Journal of the Asia Pacific Economy*, 11(1), 123–142. <https://doi.org/10.1080/09503110500348008>

190. Mansoor A.K., Lingling Q., Habibullah M., Abbas A.C., Ge He. Comparing economic efficiency of wheat productivity in different cropping systems of Sindh Province, Pakistan. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. Volume 17, Issue 4. 2018. P. 398-407.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.006>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1. Продолжительность основных периодов развития растений у изучаемых сортов яровой мягкой пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, суток, 2023 год

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	посев - полные всходы	всходы - кущения	кущения - выход в трубку	выход в трубку-колошение	колошение - молочная спелость	молочная спелость - восковая спелость	восковая спелость - полная спелость	Длина вегетационного периода, суток
А ₀	В ₀	С ₀	11	21	15	11	19	10	9	85
		С ₁	11	22	16	11	21	11	11	92
		С ₂	11	22	16	11	20	12	10	91
	В ₁	С ₀	10	22	16	12	20	12	11	93
		С ₁	10	22	16	12	20	12	14	96
		С ₂	11	22	17	12	19	14	11	95
	В ₂	С ₀	10	22	16	12	18	12	13	93
		С ₁	10	23	17	12	20	13	16	101
		С ₂	10	23	17	12	19	14	14	99
	А ₁	В ₀	С ₀	11	21	15	11	18	9	81
			С ₁	11	22	16	11	17	9	84
			С ₂	11	22	17	11	15	8	82
		В ₁	С ₀	10	22	17	12	19	10	87
			С ₁	10	22	18	12	18	11	90
			С ₂	10	22	18	12	16	12	87
		В ₂	С ₀	10	22	17	12	19	11	89
			С ₁	10	23	18	12	18	13	93
			С ₂	10	23	18	12	16	10	92

Таблица А2. Продолжительность основных периодов развития растений у изучаемых сортов яровой мягкой пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, суток, 2024 год

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	посев - полные всходы	всходы - кущения	кущения - выход в трубку	выход в трубку- колошение	колошение - молочная спелость	молочная спелость - восковая спелость	восковая спелость - полная спелость	Длина вегетационного периода, суток
А ₀	В ₀	С ₀	9	20	16	11	18	14	17	96
		С ₁	9	21	17	11	19	13	19	100
		С ₂	9	21	17	11	19	12	19	99
	В ₁	С ₀	10	21	17	12	19	14	17	100
		С ₁	10	22	18	12	19	14	18	103
		С ₂	10	22	18	12	20	11	18	101
	В ₂	С ₀	10	21	17	12	17	15	16	98
		С ₁	10	22	18	12	19	15	19	105
		С ₂	10	22	18	12	20	12	20	104
А ₁	В ₀	С ₀	9	20	16	11	16	11	14	88
		С ₁	9	21	17	11	17	12	15	93
		С ₂	9	21	17	11	16	12	15	92
	В ₁	С ₀	10	21	17	12	17	10	15	92
		С ₁	10	22	18	12	19	10	15	96
		С ₂	10	22	18	12	18	9	16	95
	В ₂	С ₀	10	21	17	12	18	12	15	95
		С ₁	10	22	18	12	20	11	17	100
		С ₂	10	22	18	12	19	11	16	98

Таблица А3. Продолжительность основных периодов развития растений у изучаемых сортов яровой мягкой пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, суток, 2025 год

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка почвы (С)	посев - полные всходы	всходы - кущения	кущения - выход в трубку	выход в трубку- колошение	колошение - молочная спелость	молочная спелость - восковая спелость	восковая спелость - полная спелость	Длина вегетационного периода, суток
А ₀	В ₀	С ₀	10	21	15	11	18	8	10	83
		С ₁	10	22	16	11	19	8	11	87
		С ₂	10	22	16	11	19	9	11	88
	В ₁	С ₀	11	22	16	12	18	8	13	89
		С ₁	11	23	17	12	18	9	12	91
		С ₂	11	23	17	12	19	9	13	93
	В ₂	С ₀	11	22	16	12	18	10	10	88
		С ₁	11	23	17	12	18	11	10	91
		С ₂	11	23	17	12	19	11	11	93
А ₁	В ₀	С ₀	10	21	15	11	17	8	7	79
		С ₁	10	22	16	11	17	9	7	82
		С ₂	10	22	16	11	17	10	8	84
	В ₁	С ₀	11	22	16	12	17	9	6	82
		С ₁	11	23	17	12	17	10	7	86
		С ₂	11	23	17	12	17	11	7	87
	В ₂	С ₀	11	22	16	12	17	10	6	83
		С ₁	11	23	17	12	17	11	7	87
		С ₂	11	23	17	12	17	12	7	88

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1. Густота стояния, полевая всхожесть и сохранность растений сорта Таймас яровой мягкой пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, (среднее за 2023-2025 гг.)

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка повы (С)	Число семян, шт/м ²	Количество растений, шт/м ²						Полевая всхожесть, %			Сохранность, %		
				по всходам			перед уборкой			2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
				2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.						
Таймас (А0)	Контроль без обработки (В ₀)	Контроль без обработки (С ₀)	320,0	269,8	265,7	229,42	212,0	172,1	190,22	84,4	82,8	71,49	78,5	64,4	83,07
		Прикатывание почвы после посева (С ₁)	320,0	276,5	276,2	231,06	225,0	168,4	198,67	86,4	86,3	72,21	81,5	60,9	86,14
		Прикатывание + боронование почвы (С ₂)	320,0	277,4	274,3	231,18	235,0	188,5	206,78	86,7	85,7	72,24	84,5	68,7	89,44
	Обработка семян комплексным средством (В ₁)	Контроль без обработки (С ₀)	320,0	270,8	276,9	231,09	219,0	192,7	199,33	84,6	86,5	72,22	80,9	69,4	86,28
		Прикатывание почвы после посева (С ₁)	320,0	276,1	283,3	234,27	228,0	191,8	205,78	86,3	88,5	73,21	82,9	67,6	87,69
		Прикатывание + боронование почвы (С ₂)	320,0	276,7	281,1	236,76	236,0	199,2	210,22	86,5	87,8	73,99	85,2	70,8	88,43
	Обработка комплексным средством семян и посевов (В ₂)	Контроль без обработки (С ₀)	320,0	271,7	276,5	230,85	224,0	175,9	202,67	84,9	86,4	72,14	82,4	63,6	87,44
		Прикатывание почвы после посева (С ₁)	320,0	276,4	278,8	235,12	236,0	199,8	208,22	86,4	87,1	73,48	85,3	71,6	88,56
		Прикатывание + боронование почвы (С ₂)	320,0	276,6	283,3	237,3	241,7	201	216,22	86,4	88,5	74,16	87,4	70,9	90,77

Таблица Б2. Густота стояния, полевая всхожесть и сохранность растений сорта Гранни яровой мягкой пшеницы по вариантам агротехнических мероприятий, (среднее за 2023-2025 гг.)

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка повы (С)	Число семян, шт/м²	Количество растений, шт/м²						Полевая всхожесть, %			Сохранность, %		
				по всходам			перед уборкой								
				2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.						
Грани (А1)	Контроль без обработки (В₀)	Контроль без обработки (С₀)	320,0	276,0	238,1	185,39	222,1	174,7	160,78	86,3	74,4	57,92	80,8	73,1	86,53
		Прикатывание почвы после посева (С₁)	320,0	281,8	249,9	194,91	225,0	183,7	174,33	88,0	78,1	60,91	83,5	72,6	89,09
		Прикатывание + боронование почвы (С₂)	320,0	288,8	253,1	194,76	235,0	198,2	174,56	90,1	79,1	60,86	85,5	76,7	89,53
	Обработка семян комплексным средством (В₁)	Контроль без обработки (С₀)	320,0	277,4	250,9	199,97	219,0	190,3	181,67	86,7	78,4	62,49	82,7	76,1	90,9
		Прикатывание почвы после посева (С₁)	320,0	283,9	263,8	204,03	228,0	209,9	185,22	88,7	82,4	63,76	85,3	78,5	91,02
		Прикатывание + боронование почвы (С₂)	320,0	294,3	265,4	204,12	236,0	206,9	185,56	91,9	82,9	63,79	86,1	77,4	90,8
	Обработка комплексным средством семян и посевов (В₂)	Контроль без обработки (С₀)	320,0	279,6	252,6	200,45	224,0	184,2	182,22	87,2	78,9	62,64	84,5	73,2	91,32
		Прикатывание почвы после посева (С₁)	320,0	287,3	256,1	202,82	236,0	189,9	187,78	89,6	80	63,38	86,5	74,1	92,23
		Прикатывание + боронование почвы (С₂)	320,0	295,6	257,1	207,91	259,2	197,4	193,67	92,4	80,4	64,97	87,8	77,4	93,48

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Площадь листовой поверхности яровой мягкой пшеницы в зависимости от применяемых агротехнических мероприятий,
(среднее за 2023-2025 гг.)

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка повы (С)	Площадь листовой поверхности, тыс.м²/га														
			начало кущение			кущение			выход в трубку			колошение			молочная спелость		
			2023 год	2024 год	2025 год	2023 год	2024 год	2025 год	2023 год	2024 год	2025 год	2023 год	2024 год	2025 год	2023 год	2024 год	2025 год
А₀	В₀	С₀	4,81	6,18	6,42	11,69	15,01	15,58	20,41	22,68	23,55	24,67	25,97	25,91	11,82	10,87	14,84
		С₁	4,96	6,06	6,08	12,05	14,73	14,78	20,78	23,3	24,72	25,28	26,68	28,34	13,27	11,22	16,3
		С₂	4,86	6,2	5,87	11,81	15,05	14,25	20,53	23,33	24,57	24,78	26,72	30,16	14,31	11,27	16,97
	В₁	С₀	4,93	6,9	6,41	11,97	16,77	15,57	20,69	25,21	23,53	24,97	28,86	26,89	13,71	12,18	15,14
		С₁	5,06	6,46	5,56	12,3	15,69	13,52	21,03	26,34	24	25,62	30,16	29,46	14,65	13,91	16,58
		С₂	5,08	6,25	5,26	12,34	15,18	12,76	21,06	26,88	24,47	26,4	30,78	30,03	15,28	14,59	17,33
	В₂	С₀	4,88	6,66	6,32	11,85	16,17	15,36	20,58	26,19	24,88	24,87	29,98	27,54	13,74	13,87	16,65
		С₁	5,15	6,37	5,22	12,51	15,47	12,69	21,23	27,38	25,04	26,11	31,35	29,73	14,28	14,84	17,37
		С₂	5,07	6,27	5,01	12,33	15,23	12,18	21,05	29,38	24,72	27,41	33,64	30,34	15,07	15,64	17,39
А₁	В₀	С₀	4,41	5,41	5,4	10,7	13,15	13,13	17,9	18,47	17,79	19,51	21,7	22,08	12,54	10,16	12,8
		С₁	4,59	5,25	4,74	11,15	12,76	11,51	18,35	18,82	18,19	20,21	22,11	22,58	13,12	10,74	12,97
		С₂	4,74	5,18	4,87	11,52	12,58	11,83	18,73	20,21	18,74	21,13	23,73	23,27	13,2	11,86	13,63
	В₁	С₀	4,67	6,15	5,46	11,35	14,94	13,26	18,56	19,17	16,89	20,64	22,52	20,97	12,55	11,35	13,75
		С₁	4,75	6,44	5,92	11,53	15,64	14,38	18,74	19,34	18,08	21,71	22,72	22,44	12,57	11,9	14,49
		С₂	5,04	5,62	5,19	12,24	13,64	12,61	19,45	20,68	18,9	23,43	24,3	23,47	13,1	12,26	14,84
	В₂	С₀	4,87	5,81	5,32	11,81	14,12	12,91	19,02	19,66	17,1	21,65	23,09	21,23	12,71	12,08	12,55
		С₁	4,96	6,31	5,89	12,06	15,34	14,3	19,26	21,29	19,09	23,62	25	23,7	13,57	11,37	13,51
		С₂	5	4,83	4,9	12,15	11,75	11,9	19,35	22,2	20,64	24,94	26,08	25,62	15,33	12,72	14,2
Среднее			4,88	6,02	5,55	11,85	14,63	13,47	19,82	22,81	21,38	23,72	26,42	26,38	13,60	12,38	15,07

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Динамика накопления сухого вещества сортов яровой мягкой пшеницы в зависимости от применяемых агротехнических мероприятий, (среднее за 2023-2025 гг.)

Сорт (А)	Обработка комплексным средством (В)	Обработка повы (С)	Общая сухая биомасса, г/м2														
			начало кущение			кущение			выход в трубку			колошение			молочная спелость		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
			год	год	год	год	год	год	год	год	год	год	год	год	год	год	год
А ₀	В ₀	С ₀	32,95	74,38	63,4	83,57	188,64	160,79	186,85	398,37	347,22	222,1	502,74	428,26	351,7	809,72	689,45
		С ₁	34,43	72,29	59,83	87,31	183,33	151,73	190,58	431,62	366,35	259,22	544,7	450,78	407,25	861,68	711,68
		С ₂	38,67	76,11	61,53	98,08	193,03	156,05	201,35	444,35	386,66	298,31	560,76	475,77	443,33	867,66	708,17
	В ₁	С ₀	36,59	91,16	64,56	92,81	231,19	163,74	196,08	527,98	382,35	265,69	666,3	470,47	388,26	976,18	688,37
		С ₁	32,62	75,56	58,07	82,74	191,64	147,26	186,01	469,44	366,66	255,27	592,42	451,17	394,36	918,26	696,77
		С ₂	36,3	85,7	58,09	92,05	217,34	147,33	195,33	555,46	385,33	295,79	700,98	474,13	444,37	1070,5	705,67
	В ₂	С ₀	36,52	79,53	64,03	92,61	201,69	162,39	195,89	497,26	411,56	288,88	627,53	506,41	411,08	901,02	714,35
		С ₁	33,19	83,9	56,57	84,19	212,77	143,46	187,46	537,27	371,24	267,54	678,02	456,8	425,59	1044,1	716,7
		С ₂	40,16	74,13	55,21	101,85	188,01	140,03	205,12	488,68	373,21	335,16	616,71	459,22	512,25	955,16	709,77
А ₁	В ₀	С ₀	36,41	60,98	62,44	92,34	154,66	158,35	195,61	321,01	343,35	246,65	405,11	422,47	351,7	577,53	589,11
		С ₁	37,35	57,58	55,83	94,72	146,03	141,58	197,99	323,76	321,25	265,38	408,59	395,28	407,25	620,01	600,53
		С ₂	37,9	54,5	51,58	96,11	138,22	130,82	199,38	318,79	308,07	278,77	402,31	379,07	443,33	634,71	597,79
	В ₁	С ₀	36,79	61,73	59,05	93,31	156,57	149,76	196,59	333,85	326,5	252,93	421,32	401,74	388,26	628,68	594,18
		С ₁	37,86	62,51	59,69	96,03	158,54	151,38	199,31	366,14	357,31	280,87	462,06	439,66	394,36	648,66	611,25
		С ₂	38,73	57,71	52,26	98,22	146,37	132,54	201,5	348,81	323,78	293,84	440,19	398,4	444,37	656,35	590,4
	В ₂	С ₀	37,36	51,78	51,24	94,75	131,32	129,96	198,02	290,12	294,76	266,66	366,13	362,69	411,08	559,07	550,33
		С ₁	38,41	61,57	55,62	97,42	156,14	141,07	200,7	352,71	336,95	286,8	445,11	414,61	425,59	650,36	606,9
		С ₂	39,47	51,06	48,35	100,1	129,49	122,63	203,37	306,84	314,06	313,68	387,23	386,43	509,8	628,37	614,19
Среднее			36,76	68,49	57,63	93,23	173,69	146,16	196,51	406,57	350,92	276,31	513,09	431,85	419,66	778,57	649,76

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Цена реализации зерна в зависимости от категории качества, за 2023-2025 годы

№	Культура, класс	Год	Натура, г/л (не менее)	Клейковина, % (не менее)	Качество клейковины ед., ИДК	Влажность, % (не более)	Сорная примесь, %	Зерновая примесь, %	Массовая доля белка, %	Число падения, сек.	Закупочные цены, тенге/тонна	
											с НДС	без НДС
1	Пшеница 2 класса	2023	750	28	43-77	14	2	4	14,5	200	125 000	111 613
		2024	750	28	20-100	14	2	4	14,5	200	117 000	104 469
		2025	750	28	20-100	14	2	4	14,5	200	121 000	108 040
2	Пшеница 3 класса (А)	2023	750	27	20-100	14	2	5	14,0	160	112 000	100 005
		2024	750	27	20-100	14	2	5	14	160	100 000	89 296
		2025	750	27	20-100	14	2	5	14	160	115 000	102 684
3	Пшеница 3 класса (В)	2023	740	25	20-100	14	2	5	13	160	105 500	94 200
		2024	740	25	20-100	14	2	5	13	160	95 000	84 825
		2025	740	25	20-100	14	2	5	13	160	96 000	85 718
4	Пшеница 3 класса (С)	2023	730	25	20-100	14	2	5	12,5	160	99 000	88 397
		2024	730	25	20-100	14	2	5	12,5	160	90 000	80 366
		2025	730	25	20-100	14	2	5	12,5	160	94 000	83 933
5	Пшеница 3 класса (D)	2023	730	23	20-100	14	2	5	12	160	95 000	84 825
		2024	730	23	20-100	14	2	5	12	160	87 000	77 682
		2025	730	23	20-100	14	2	5	12	160	92 000	82 147
6	Пшеница 3 класса (Е)	2023	730	23	20-100	14	2	5	11,5	160	92 000	82 147
		2024	730	23	20-100	14	2	5	11,5	160	85 000	75 893
		2025	730	23	20-100	14	2	5	11,5	160	90 000	80 361
7	Пшеница 4 класса (А)	2023	710	21	20-100	14	2	5	10,5	100	90 000	80 361
		2024	720	21	20-100	14	2	5	10,5	100	75 000	66 974
		2025	720	20	20-100	14	2	5	10,5	100	82 000	73 218
8	Пшеница 4 класса (В)	2023	700	18	20-100	14	2	5	9,5	80	88 000	78 575
		2024	700	18	20-100	14	2	5	9,5	80	65 000	58 046
		2025	700	18	20-100	14	2	5	9,5	80	80 000	71 432