

МГУ имени М.В. Ломоносова

Факультет почвоведения

№ госрегистрации
121041300098-7



УДК

631.8 Удобрения. Внесение удобрений. Стимуляция роста растений. Ростовые вещества

631.95 Сельскохозяйственная экология

631.4 Почвоведение. Почвенные исследования

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Разработка и оценка комплекса инновационных агрохимических средств,
мелиорантов и регуляторов роста в условиях агро- , техногенеза и
городской среды
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

Руководитель темы
Воронина Л.П.


«11» января 2024 г.


«30» декабря 2023 г.

Москва 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

ведущий научный сотрудник,
доктор биологических наук, до-
цент/с.н.с. по специальности

 (Воронина Л.П.)

Исполнители темы:

старший научный сотрудник,
доктор биологических наук,
профессор по специальности
аспирант

 (Виноградов Д.В.)

старший научный сотрудник,

 (Гальцова А.Д.)
 (Госсе Д.Д.)

кандидат биологических наук

научный сотрудник, кандидат
биологических наук

 (Дядькина С.Е.)

старший научный сотрудник,

 (Кинжаев Р.Р.)

кандидат биологических наук

старший научный сотрудник,

 (Кокаева Л.Ю.)

кандидат биологических наук
инженер 1 категории

 (Колесникова С.Ф.)
 (Куликова Н.А.)

ведущий научный сотрудник,

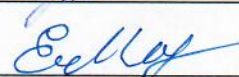
кандидат биологических наук,

доктор биологических наук

 (Кутузова И.А.)

младший научный сотрудник,

кандидат биологических наук

 (Морачевская Е.В.)

ведущий научный сотрудник,

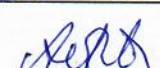
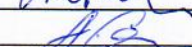
кандидат биологических наук

 (Пашкевич Е.Б.)

старший научный сотрудник,

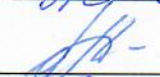
доктор биологических наук

аспирант

 (Почтенная А.И.)
 (Снег А.А.)

специалист, кандидат биологи-
ческих наук

ведущий научный сотрудник,

 (Хомутовский М.И.)

кандидат биологических наук

старший научный сотрудник,

 (Хуснетдинова Т.И.)

кандидат биологических наук

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

продукты осадка сточных вод, продуктивность агроэкосистем, биоремедиация нефтезагрязненных почв, гуминовые биопрепараты, качество продукции, удобрения пролонгированного действия, биотестирование, почвенное плодородие, микроэлементы

Ключевые слова по-английски:

crop quality, biosolids, agricultural ecosystem productivity, humic biological products, bioremediation of oil-contaminated soils, bioassay's methods, trace elements, slow-release fertilizers, sewage sludge, soil fertility

Отчет 55 с., 1 кн., 8 рис., 22 табл., 43 источн. 3 прил.

Объекты исследования: природные и синтетические соединения для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур – гуминовые вещества, растительные гормоны брассиностероиды, наночастицы серебра.

Цель: изучение роли новых удобрений пролонгированного действия, микроэлементов, мелиорантов и гуминовых биопрепаратов в агроценозах и городских ландшафтах в управлении продуктивностью, качеством и защите растений от стрессовых факторов; основным направлением проведения исследований стала оценка эффективности обработки семян стимуляторами роста (на примере гуминовых веществ и брассиностероидов) и наночастицами (на примере наночастиц серебра).

Методы: метод проростков, лабораторно-вегетационный метод, микроделяночные эксперименты, метод обмывки семян, метод проращивания в рулонах из фильтровальной бумаги, методы химического анализа почвы, растений и растительной продукции, методика трехуровневого трехфакторного плана Бокса-Бенкена, дисперсионный анализ.

Результаты: оптимизированы условия праймирования (концентрация, продолжительность, температура) семян пшеницы и редиса гуминовыми веществами и наночастицами серебра; установлена обратная связь между оптимальной продолжительностью праймирования и ζ -потенциалом наночастиц; показана способность эпибрассинолидов стимулировать поступление воды при набухании семян ноготков ладьевидной и серповидной формы; установлено, что праймирование семян пшеницы гуминовыми веществами снижает водный дефицит в листьях растений при недостаточном увлажнении; показано, что праймирование наночастицами серебра снижает поверхностную зараженность семян, слабо влияя на внутренние инфекции, и способствует перезимовке озимой пшеницы; показана неэффективность гуминовых веществ и наночастиц серебра как праймирующих агентов семян редиса в полевых условиях в случае использования праймирования как единственного приема смягчения стресса; высказано предположение, что положительного эффекта от праймирования семян можно ожидать, если эффект в лабораторных условиях превышает 200%; продемонстрирована меньшая отзывчивость семян редиса на праймирование, по сравнению с семенами пшеницы, как в оптимальных, так и стрессовых условиях.

Область применения: технологии предпосевной обработки семян.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Термины и определения	6
Перечень сокращений и обозначений	7
Введение	8
Основная часть отчета о НИР	10
1 Выбор направления исследований	10
2 Экспериментальные исследования. Материалы и методы	12
2.1 Исследованные вещества	12
2.1.1 Гуминовые препараты	12
2.1.2 Эпибрассинолиды	12
2.1.3 Наночастицы серебра	13
2.2 Тест-объекты	13
2.2.1 Пшеница	13
2.2.2 Редис	13
2.2.3 Нюгетки	13
2.3 Оценка влияния стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в оптимальных условиях	14
2.3.1 Оптимизация условий праймирования с использованием плана Бокса-Бенкена	14
2.3.2 Оценка параметров прорастания	14
2.3.3 Определение степени набухания	15
2.4 Оценка влияния стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в стрессовых условиях	16
2.4.1 Оценка влияния на прорастание в стрессовых условиях по методу проростков	16
2.4.2 Оценка влияния на прорастание в стрессовых условиях лабораторно-вегетационным методом	16
2.5 Оценка наночастиц влияния на зараженность семян	17
2.5.1 Метод обмывки семян	17
2.5.2 Метод анализа семян в рулонах фильтровальной бумаги	18
2.6 Мелкоделяночные эксперименты	18
2.6.1 Проведение мелкоделяночных экспериментов с пшеницей	18
2.6.2 Проведение мелкоделяночных экспериментов с редисом	19
3 Экспериментальные исследования. Результаты	20
3.1 Влияние стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в оптимальных условиях	20
3.1.1 Оптимизация праймирования гуминовыми веществами	20
3.1.2 Оптимизация условий праймирования наночастицами серебра	22
3.1.3 Влияние стимуляторов роста растений на набухание семян	23
3.2 Влияние стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в условиях водного стресса	23
3.2.1 Влияние праймирования гуминовыми веществами и наночастицами на параметры прорастания семян в условиях водного дефицита	23
3.2.2 Влияние праймирования гуминовыми веществами на рост пшеницы в условиях водного стресса в лабораторно-вегетационном эксперименте	25
3.3 Влияние наночастиц серебра на зараженность семян пшеницы	27

3.4 Влияние стимуляторов роста и наночастиц на рост пшеницы и редиса в условиях мелкоделяночных экспериментов	28
3.4.1 Влияние праймирования наночастицами серебра на перезимовку пшеницы	28
3.4.2 Эффективность гуминовых веществ как агентов для праймирования семян редиса в условиях мелкоделяночных экспериментов	29
3.4.3 Эффективность наночастиц серебра как агентов для праймирования семян редиса в условиях мелкоделяночных экспериментов	30
Список использованных источников	32
Заключение	36
Приложение А	38
Приложение Б	39
Приложение В	48

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Гетерокарпичность – генетически обусловленная особенность некоторых видов растений, заключающаяся в наличии у одного и того же экземпляра разнотипных плодов, отличающих друг от друга морфологией, способами распространения, характером прорастания либо физиологическими свойствами

Праймирование – предпосевная обработка семян, направленная на увлажнение семян и инициирование процесса набухания, не допуская при этом появления зародышевого корня, с последующим высушиванием семян до первоначального уровня влажности

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения

AgНЧ – наночастицы серебра
ГВ – гуминовые вещества
ГОСТ – государственный стандарт
ГП – гидропрайминг
ДДС – додецилсульфат натрия
ИЖ – индекс жизнеспособности
КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза
КОЕ – колониеобразующая единица
НВ – наименьшая влагоемкость
НПП – научно-производственное предприятие
НПО – научно-производственное объединение
НСР – наименьшая существенная разница
ОЛЕ – олеат натрия
ООО – общество с ограниченной ответственностью
п.п. – процентный пункт
ПАВ – поверхностно-активное вещества
ПВП – поливинилпирролидон
ПЭГ – полиэтиленгликоль
СВП – среднее время прорастания
ТВИ – ТВИН-80 (полисорбат 80, полиоксиэтилен(20)-сорбитанмоноолеат)
ТУ – технические условия
ФГБНУ – федеральное государственное бюджетное научное учреждение
ФГБОУ ВО – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
РГАУ-МСХА – Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия

ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам Департамента по экономическим и социальным вопросам Организации Объединенных Наций (ООН) к 2030 г. число жителей планеты составит 8.5 млрд., а к 2050 – 9.7 млрд. [1]. Несмотря на существующие альтернативные варианты прогнозов, согласно которым возможно снижение численности населения, российские демографы наиболее вероятным считают прогноз Департамента народонаселения ООН, согласно которому в ближайшее столетие вряд ли опустится ниже 7 млрд. [2]. Поэтому продовольственная безопасность, при которой все люди в каждый момент времени имеют физический и экономический доступ к достаточной в количественном отношении безопасной пище, необходимой для ведения активной и здоровой жизни, является одной из главных целей аграрной и экономической политики государства.

Рост населения Земли сопровождается снижением площади пахотных земель в расчете на 1 человека. Согласно существующим оценкам, с 1961 г. по 2020 г. эта величина уменьшилась на 58% [3]. Поэтому в настоящее время остро стоит проблема повышения урожайности различных сельскохозяйственных культур [1]. «Зеленая революция», известная также как Третья сельскохозяйственная революция, обеспечила необходимый ежегодный прирост урожайности при минимальном расширении землепользования за счет применения химических удобрений, контролируемого орошения и средств механизации, внедрения высокоурожайных сортов зерновых культур, а также широкого использования пестицидов. Однако эти методы и технологии в настоящее время часто признаются малоэффективными, а их использование часто вызывает неприемлемое ухудшение состояния окружающей среды, что указывает на окончание «зеленой революции» [4]. Поэтому в настоящее время актуальным является поиск новых подходов и материалов в области сельского хозяйства для повышения его эффективности и устойчивости. Одним из развивающихся направлений в этой области является изучение возможности улучшения ростовых показателей семян, и, как следствие, повышение урожайности. Праймирование представляет собой перспективный агротехнический прием, позволяющий стимулировать рост растений на ранних этапах развития, в том числе в условиях абиотических стрессов. Поэтому в последнее время ведется поиск новых праймирующих агентов, среди которых большой интерес вызывают природные стимуляторы роста и инженерные наночастицы.

Целью выполнения этапа НИР в 2023 г. было изучение роли новых удобрений пролонгированного действия, микроэлементов, мелиорантов и гуминовых биопрепаратов в агроценозах и городских ландшафтах в управлении продуктивностью, качеством и защите растений от стрессовых факторов. Выполнение этапа является продолжением работ по НИР «Разработка и оценка комплекса инновационных агрохимических средств, мелиорантов и регуляторов роста в условиях агро-, техногенеза и городской среды», в рамках которого ранее были исследованы другие инновационные агрохимические средства, такие как соевая меласса, биочар (отчет за 2021 г. «Научно-теоретическое обоснование агрохимического действия в реализации потенциальной продуктивности инновационных средств, получаемых путем направленной переработки растительных отходов

и осадков сточных вод») и осадки сточных вод (отчет за 2022 г. «Оценка безопасности продуктов переработки осадков сточных вод с использованием методов биотестирования»). В рамках поставленной цели основным направлением проведения исследований стала оценка эффективности обработки семян стимуляторами роста на примере гуминовых веществ и растительных гормонов брассиностероидов, а также наночастицами на примере наночастиц серебра, стабилизированных различными поверхностно-активными веществами.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Выбор направления исследований

В марте 2023 г. население Земли составляло 8.02 млрд. человек. По прогнозам Департамента по экономическим и социальным вопросам Организации Объединенных Наций (ООН) к 2030 г. число жителей планеты составит 8.5 млрд., а к 2050 – 9.7 млрд. [1]. Несмотря на существующие альтернативные варианты прогнозов, согласно которым возможно снижение численности населения, российские демографы наиболее вероятным считают прогноз Департамента народонаселения ООН, согласно которому в ближайшее столетие вряд ли опустится ниже 7 млрд. [2]. Поэтому продовольственная безопасность, при которой все люди в каждый момент времени имеют физический и экономический доступ к достаточной в количественном отношении безопасной пище, необходимой для ведения активной и здоровой жизни, является одной из главных целей аграрной и экономической политики государства.

Рост населения Земли сопровождается снижением площади пахотных земель. Согласно существующим оценкам, с 1961 г. по 2020 г. площадь пахотных земель в расчете на 1 человека уменьшилась на 58% [3]. Поэтому в настоящее время остро стоит проблема повышения урожайности различных сельскохозяйственных культур [1]. «Зеленая революция», известная также как Третья сельскохозяйственная революция и начавшаяся более шести десятилетий назад, обеспечила необходимый ежегодный прирост урожайности при минимальном расширении землепользования за счет применения химических удобрений, прежде всего, недорогих азотных удобрений, обеспечиваемых технологией Габера-Боша; контролируемого орошения и средств механизации; внедрения высокоурожайных сортов зерновых культур, особенно карликовой пшеницы и риса, а также широкого использования пестицидов. Однако методы и технологии «зеленой революции» в настоящее время часто признаются малоэффективными, а их использование часто вызывает неприемлемое ухудшение состояния окружающей среды. Низкая эффективность использования применяемых агрохимикатов и потери урожая из-за болезней и засухи приводят к массовым потерям энергии и воды, а также к загрязнению окружающей среды устойчивыми ксенобиотиками, что создает риски для здоровья человека. Монокультурное земледелие, деградация почв, нехватка воды и глобализация болезней привели к тому, что сельскохозяйственные системы обладают низкой устойчивостью. Повсеместное и неэффективное использование пестицидов вызывает появление устойчивых биотипов вредителей, снижение биоразнообразия и нарушение экосистемных функций почвы, необходимых для здоровой агроэкосистемы. Все эти факторы приводят к выравниванию кривых урожайности, что указывает на окончание «зеленой революции» [4].

Поэтому с середины 80-х гг. XX в. остро встал вопрос перехода к экологичным технологиям возделывания, наносящим минимальный ущерб окружающей среде с целью развития устойчивого сельского хозяйства. В настоящее время продовольственная проблема усугубляется процессами изменения климата, приводящим к более частым явлениям абиотического стресса, которые негативно влияют на рост и развитие

сельскохозяйственных культур [5]. Например, в последнее время, наряду с глобальными изменениями климата, глобальная структура осадков также изменилась, что привело к расширению зон, подверженных как засухе, так и переувлажнению [6].

Поэтому актуальным является поиск новых подходов и материалов в области сельского хозяйства, позволяющих улучшить ростовые показатели ее семян, и, как следствие, повысить урожайность [7]. Перспективным агротехническим приемом, позволяющим стимулировать рост растений на ранних этапах развития, в том числе в условиях водного стресса, является праймирование [8, 9, 10]. Праймированием называют предпосевную обработку семян, направленную на увлажнение семян и иницирование процесса набухания, не допуская при этом появления зародышевого корня, с последующим высушиванием семян до первоначального уровня влажности [8]. В зависимости от праймирующего вещества различают несколько видов праймирования, самым распространенным среди которых является гидропраймирование, основанное на замачивании семян в воде [8]. Особый интерес представляет использование в качестве праймирующих агентов природных стимуляторов роста, таких как гуминовые вещества (ГВ) и растительные гормоны, и инженерных наноматериалов (т.н. нанопраймирование), обладающих способностью частично нивелировать действие биотических и абиотических стрессов [11, 12, 13].

Благодаря своим уникальным антибактериальным и фунгицидным свойствам наночастицы серебра ($AgHCl$) являются одними из наиболее перспективных агентов для нанопраймирования [14]. Положительное влияние $AgHCl$ было продемонстрировано на семенах пшеницы, ячменя, кукурузы, арбуза, кабачков [14, 15]. Однако в ряде случаев было показано, что нанопраймирование $AgHCl$ приводит к уменьшению длины корней и биомассы проростков и повреждению корней, обусловленному деформацией ядра и хромосомными абберациями, что может свидетельствовать о способности $AgHCl$ проникать в клетки растений и нарушать клеточное деление. Поэтому определение оптимальных условий праймирования $AgHCl$ для каждой культуры – необходимое условие эффективного применения наночастиц в качестве праймирующих агентов [15].

Еще одним фактором, ограничивающим применение праймирования, является недостаточное количество полевых исследований, посвященных оценке эффективности этого способа предпосевной обработки семян [8, 16]. Исследования, связанные с положительным влиянием праймирования семян на их прорастание и рост растений в начальных фазах развития, в основном проводятся в контролируемых условиях окружающей среды в камерах для выращивания растений или теплицах. Однако связь между поведением сельскохозяйственных культур в камерах для выращивания растений и продуктивностью взрослого растения в полевых условиях далеко не всегда однозначна [8].

Целью выполнения этапа НИР было изучение роли новых удобрений пролонгированного действия, микроэлементов, мелиорантов и гуминовых биопрепаратов в агроценозах и городских ландшафтах в управлении продуктивностью, качеством и защите растений от стрессовых факторов. В рамках поставленной цели основным направлением проведения исследований стала оценка эффективности обработки

семян стимуляторами роста (на примере ГВ и брассиностероидов) и наночастицами (на примере AgНЧ).

Для решения поставленных задач использовали методы биотестирования (метод проростков, лабораторно-вегетационный, микроделяночные эксперименты). Оценку влияния на зараженность семян проводили с использованием метода смыва семян и метода проращивания в рулонах из фильтровальной бумаги. В качестве стрессовых условий использовали водный дефицит и переувлажнение.

2 Экспериментальные исследования. Материалы и методы

2.1 Исследованные вещества

Объектами исследования в работе были гуминовые препараты, эпибрассинолиды и наночастицы серебра.

2.1.1 Гуминовые препараты

В качестве гуминовых веществ (ГВ) в работе использовали следующие гуминовые препараты: «Гумистим», «Powhumus», гумат калия «Сахалинский» и «Лигногумат».

Препарат «Гумистим» (ООО «Женьшень», РФ) представляет собой жидкое органического удобрения. Массовая доля органического вещества 49%. Согласно описанию производителя, содержит в растворенном состоянии: гумины, фульвокислоты, витамины, природные фитогормоны, микро- и макроэлементы в виде биодоступных органических соединений и споры полезных почвенных микроорганизмов. Фунгицидные и бактерицидные свойства препарата обусловлены присутствием природных фунгицидов и антибиотиков, выделяемых микрофлорой кишечника дождевого червя в процессе вермикультивирования. pH лежит в диапазоне 7.5–11.0. Выпускается по техническим условиям Российской Федерации ТУ – 0392-002-41267614-2004.

Препарат «Powhumus» (Humintech, Германия) – гумат калия, получаемый из леонардита путем щелочной экстракции. Массовая доля органического вещества 68–73%. Согласно данным производителя, содержит (% масс. на сухое вещество): гуматы калия 80–85%, гуминовые кислоты 63–67%, фульвокислоты 5–6%. pH лежит в диапазоне 9.5–10.5.

Препарат гумат калия «Сахалинский» (ООО «Сахалинские гуматы», РФ) – гумат калия, получаемый из леонардита путем щелочной экстракции. Массовая доля органического вещества 76.0%. Согласно данным производителя, содержит (% масс.) соли гуминовых кислот 12%, соли фульвокислот 3%. Кроме того, в состав входят макро- и микроэлементы: K, P, Si, Fe, Mg, S, Zn, Co, Cu.

Лигногумат (НПО «РЭТ», РФ) – продукт окислительно-гидролитической деструкции лигнинсодержащего сырья. Массовая доля органического вещества 60–62%. Согласно данным производителя, содержит калиевые и натриевые соли гуминовых кислот (до 18%), а также макро- и микроэлементы: K, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Co. pH 12.98.

2.1.2 Эпибрассинолиды

В качестве эпибрассинолидов в данной работе использовали препарат «Эпин-Экстра» производства НПП «Нэст М» (РФ). Зарегистрирован как регулятор роста растений в Справочнике пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации в 2023 г.

(регистрационный номер: 233-07-1771-1). Представляет собой раствор синтетического брассиностероида 24-эпибрассинолида в концентрации 0.025 г/л. Является адаптогеном широкого спектра действия, обладающим неспецифическим антистрессовым действием. Эпин-Экстра повышает энергию прорастания всхожесть семян и появление более дружных всходов.

2.1.3 Наночастицы серебра

Для проведения экспериментов использовали водные коллоидные растворы наночастиц серебра (AgНЧ) производства компании М9 (Тольятти, РФ), представляющие собой коллоидное серебро, стабилизированное различными биологически активными веществами. Всего было исследовано 5 различных AgНЧ (таблица Таблица 1), включая наночастицы, стабилизированные карбоксиметилцеллюлозой (AgНЧ-КМЦ), олеатом натрия (AgНЧ-ОЛЕ), поливинилпирролидоном (AgНЧ-ПВП), додецилсульфатом натрия (AgНЧ-ДДС) и ТВИН-80 (AgНЧ-ТВИ). КМЦ, олеат натрия и ДДС представляют собой анионные поверхностно-активные вещества (ПАВ), а ПВП и Твин-80 – неионогенные ПАВ. Выбор ПАВ в качестве стабилизирующих агентов был обусловлен их способностью облегчать поступление наночастиц в растения. Характеристика использованных наночастиц, проведенная в рамках работы по НИР в 2021 г., приведена в таблице Б1.

Согласно данным производителя, все исследованные AgНЧ имели сферическую форму.

2.2 Тест-объекты

В качестве тест-объектов использовали семена пшеницы, редиса и ноготков.

2.2.1 Пшеница

Исследования проводили с использованием семян пшеницы мягкой *Triticum aestivum* L. яровых сортов «Иволга» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, код сорта в Государственном реестре селекционных достижений допущенных к использованию сортов растений 8801193) и «Радмира» (ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», код сорта в Государственном реестре селекционных достижений допущенных к использованию сортов растений 8261389), а также семян озимой пшеницы линии Л-1 [17]. Для проведения экспериментов отбирали предварительно откалиброванные (> 3 мм) семена без видимых повреждений.

2.2.2 Редис

Для проведения экспериментов использовали семена редиса *Raphanus sativus* var. *radicula* Pers. сорта «Софит» (оригинатор ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства», код сорта в Государственном реестре селекционных достижений допущенных к использованию сортов растений 8902208) и сорта «Французский завтрак» (код сорта в Государственном реестре селекционных достижений допущенных к использованию сортов растений 9811293). Исследования проводили с предварительно откалиброванными (> 3 мм) семенами без видимых повреждений.

2.2.3 Ноготки

Исследования проводили на семенах ноготков лекарственных *Calendula officinalis* L., сорт «Кальта» (оригинатор ФГБНУ «Всероссийский

научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений», код сорта в Государственном реестре селекционных достижений допущенных к использованию сортов растений 8006598). Так как ноготков характерна гетерокарпичность, то для проведения экспериментов семена ноготков предварительно на разделяли на группы семян с разной формой (таблица Б2, рисунок В1).

Согласно [18], выделяли фракции семян с серповидной, ладьевидной и крючковидной формой.

2.3 Оценка влияния стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в оптимальных условиях

Оценку влияния исследуемых веществ на параметры прорастания в случае семян пшеницы и редиса проводили в лабораторных условиях с использованием праймирования; в случае семян ноготков с этой целью использовали такой показатель как степень набухания. На первом этапе оптимизировали условия праймирования.

2.3.1 Оптимизация условий праймирования с использованием плана Бокса-Бенкена

В рамках реализации НИР в 2021 г. было установлено, что основными параметрами, влияющими на эффективность праймирования, являются температура и продолжительность праймирования, а также концентрация праймирующего агента. Было показано, что оптимальная концентрация ГВ лежит в диапазоне 0.25–0.5 г/л, температура составляет ок. 24°C, а продолжительность – ок. 6 ч. Для AgНЧ аналогичные параметры составили ок. 50 мг/л и ок. 16°C соответственно.

Для уточнения оптимальных параметров праймирования (концентрация X1, продолжительность X2 и температура X3) были проведены эксперименты с использованием методики трехуровневого трехфакторного плана Бокса-Бенкена. Уровни варьирования факторов – низкий (–1), центральный (0) и высокий (+1) – определяли для каждой культуры на основании ранее полученных данных (см. отчета за 2021 г.). Опыт проводили в соответствии с рекомендуемой матрицей проведения экспериментов [19] (таблица Б3).

С использованием матрицы, представленной в таблице 3, были проведены эксперименты по оптимизации параметров праймирования для пшеницы и редиса (таблица Б4).

Далее проводили эксперименты по методу проростков (см. п. 2.3.2). Полученные в ходе эксперимента данные подвергали анализу в ПО Statistica 8.0 (StatSoft, США). Путем рассмотрения одной переменной отклика на ее оптимальном уровне и построения графика с учетом двух значимых факторов были сгенерированы трехмерные графики поверхности отклика. Для процесса оптимизации каждой зависимой переменной использовался профиль прогнозируемых значений и анализ желательности. Прогнозируемые значения были оптимизированы по шкале от 0.0 (нежелательно) до 1.0 (крайне желательно). Оптимальными считали значения факторов, при которых был получены максимальные положительные значения параметров.

2.3.2 Оценка параметров прорастания

Праймирование. Предварительно откалиброванные (> 3 мм) семена

без видимых повреждений замачивали в дистиллированной воде (гидропрайминг, ГП) или в испытуемых растворах при выбранных температуре и продолжительности (таблицаБ 4) в соотношении 5 мл на 50 семян или 2 мл на 50 семян для пшеницы и редиса соответственно. После окончания праймирования семена промывали дистиллированной водой и высушивали при комнатной температуре до достижения исходной массы. Контрольные семена не подвергали праймированию. Далее проводили биотестирование по методу проростков.

Биотестирование по методу проростков. Биотестирование по методу проростков проводили согласно [20]. Праймированные семена помещали в чашки Петри по 10 штук, в каждую чашку приливали дистиллированную воду и помещали в термостат при температуре 24°C. В качестве контрольных использовали непраймированные семена. Через 72 ч. учитывали число проросших семян и измеряли длину побегов и корней проростков. На основании этих данных рассчитывали энергию прорастания (процент проросших семян от общего количества) и индекс жизнеспособности (ИЖ) семян – произведение энергии прорастания на сумму средних длин корней и побегов проростков. В отличие от раздельного определения энергии прорастания и длины корней и побегов, преимуществом ИЖ является то, что он отражает способность семян давать нормальные всходы при неоптимальных условиях выращивания, аналогичных тем, которые могут возникнуть в полевых условиях [16]. Повторность опыта четырехкратная.

Статистическая обработка данных включала в себя расчет среднего значения показателя и его стандартное отклонение ($\pm$). Значимость различий между средними оценивали с помощью дисперсионного анализа с использованием критерия Фишера (наименьшая существенная разница, НСР).

2.3.3 Определение степени набухания

Определение степени набухания семян предназначено для оценки жизнеспособности семян с низкой всхожестью и основано на разной скорости набухания живых и мертвых семян. В нашей работе этот способ применяли для оценки влияния гуминовых веществ и эпибрасинолидов на жизнеспособность семян ноготков лекарственных, так как лекарственные растения, в отличие от полевых и овощных культур, обычно характеризуются более низкими показателями энергии прорастания и всхожести.

Степень набухания определяли согласно [21]. Для этого навески семян массой 2–3 г, предварительно завернутые в марлевую салфетку, помещали в стеклянные сосуды объемом 200 мл. Затем к семенам приливали по 100 мл растворов исследуемых препаратов согласно схеме эксперимента:

- 1) Контроль (дистиллированная вода);
- 2) Эпин-экстра 0.125 мг/л;
- 3) Гумистим в разведении 5.

Концентрации Эпина-экстра и Гумистима выбирали в соответствии с рекомендациями производителя.

Далее через определенные интервалы времени в течение 24 ч семена извлекали из сосудов, быстро обсушивали на фильтровальной бумаге, взвешивали и рассчитывали степень набухания М [22]:

$$M = (m_k - m_c) / m_c \times 100\%,$$

где m_k – масса семян на конец учетного периода, г, а m_c – масса сухих семян, г.

Повторность трехкратная.

2.4 Оценка влияния стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в стрессовых условиях

2.4.1 Оценка влияния на прорастание в стрессовых условиях по методу проростков

Оценку влияния исследуемых веществ на параметры прорастания по методу проростков проводили на примере препарата Rowhumus и AgHЧ-КМЦ. В качестве стресса использовали водный дефицит. Праймирование семян пшеницы линии Л-1 и редиса «Французский завтрак» проводили аналогично описанному в п. 2.3.2. Условия праймирования выбирали на основании результатов опытов по оптимизации (п.2.3.1). Для AgHЧ условия праймирования были 16°C, 12 ч, 50 мг/л и 23°C, 6 ч, 100 мг/л для пшеницы и редиса соответственно. Для ГВ (эксперименты проведены только с пшеницей) аналогичные параметры составили 16°C, 14 ч; 0.5–2.5 г/л.

В качестве стрессовых условий использовали водный дефицит, создаваемый с помощью раствора полиэтиленгликоля с молекулярной массой 6000 г/моль (ПЭГ6000) в концентрации 150 г/л. Семена пшеницы, праймированные в растворах ГВ с концентрацией 0,5, 1, 1,5, 2 и 2,5 г/л (ГВ0.5, ГВ1.0, ГВ1.5, ГВ2.0, ГВ2.5), помещали в чашки Петри по 10 штук, в каждую чашку приливали воду или раствор ПЭГ6000 в соответствии со схемой эксперимента и помещали в термостат при температуре 24°C. Далее опыт проводили как описано в п. 2.3.2. Через 72 ч. учитывали число проросших семян и измеряли длину побегов и корней проростков. На основании этих данных рассчитывали энергию прорастания и ИЖ. Повторность опыта пятикратная.

Статистическая обработка данных включала в себя расчет среднего значения показателя и его стандартное отклонение ($\pm$). Значимость различий между средними оценивали с помощью дисперсионного анализа с использованием критерия Фишера (наименьшая существенная разница, НСР).

2.4.2 Оценка влияния на прорастание в стрессовых условиях лабораторно-вегетационным методом

Для оценки влияния праймирования ГВ на оценку показателей роста пшеницы на ранних стадиях развития в оптимальных условиях, условиях затопления и условиях водного дефицита был проведен лабораторно-вегетационный эксперимент. Использовали семена, праймированные в воде или растворе ГВ с концентрацией 2 г/л. Температура праймирования 16°C, продолжительность – 14 ч. В качестве контроля использовали сухие семена. Перед посевом подготовленные семена пшеницы замачивали в течение суток на увлажненной фильтровальной бумаге при +23°C в темноте. Проклюнувшиеся семена высаживали в пластиковые сосуды объемом 100 мл с предварительно внесенной почвой (100 г), просеянной через сито с диаметром ячеек 2 мм. В каждый сосуд помещали по 5 семян. Была использована почва

мощно-дерновая среднеподзолистая легкосуглинистая окультуренная на моренных суглинках. Реакция водной вытяжки 6.9, содержание гумуса 1.8%, обеспеченность N высокая (86 мг/100 г), P_2O_5 повышенная (20 мг/100 г), K_2O средняя (7 мг/100 г).

Опыт проводили при трех уровнях почвенной влажности: 100%, 70% и 40% от наименьшей влагоемкости (НВ). Влажность 100% соответствовала условиям переувлажнения, 40% – засухе, а 70% – оптимальным значениям. Уровень влажности в почве поддерживали путем увлажнения дистиллированной водой по результатам взвешивания. Опыт проводили при естественном освещении и температуре. Относительная влажность воздуха в период проведения эксперимента варьировала в диапазоне 35–57%. Повторность пятикратная.

В процессе эксперимента учитывали динамику появления всходов, на основании которой рассчитывали среднее время прорастания (СВП), рассчитываемое как отношение суммы произведений количества всходов, появившихся в конкретный день учета, к сумме всходов, в которые проводили учет [23]. Дружность прорастания $V_{свп}$ оценивали по коэффициенту вариации показателя [16].

Через 21 день после посева оценивали интенсивность фотосинтеза растений по показателям флуоресценции хлорофилла (максимальная скорость электронного транспорта $rETR_{max}$, коэффициент использования света в условиях низкой освещенности α и коэффициент светового насыщения E_k) согласно [24]. Измерения проводили на импульсном флуориметре Imaging-PAM M-series (Walz, Германия). Кроме того, учитывали массу и длину растений, водный дефицит в листьях растений, содержание в листьях каротиноидов и хлорофиллов a и b согласно [25]. Содержание хлорофиллов a и b и каротиноидов в этанольном экстракте определяли спектрофотометрически при длинах волн 440 нм, 649 нм и 665 нм соответственно на спектрофотометре PG Instruments (Англия).

Статистическая обработка данных включала в себя расчет среднего значения показателя и его стандартное отклонение ($\pm$). Значимость различий между средними оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа (фактор А – тип обработки семян, фактор Б – условия увлажнения) с использованием критерия Фишера (наименьшая существенная разница, НСР). При обработке данных, имеющих процентную размерность (энергия прорастания, итоговая всхожесть), обработке подвергали исходные абсолютные величины (количество проросших семян), а в таблицах представляли величины в процентах.

2.5 Оценка наночастиц влияния на зараженность семян

В связи с антибактериальной и фунгицидной активностью $AgHCl$, в рамках НИР были проведены эксперименты, направленные на определение способности наночастиц снижать зараженность семян. Для этого проводили оценку эффективности $AgHCl$ как дезинфекторов с использованием семян пшеницы сорта Радмира.

2.5.1 Метод обмывки семян

Метод направлен на количественный учет колониеобразующих единиц (КОЕ) на поверхности семян [26]. Навеску семян пшеницы, предварительно праймированных $AgHCl$ (16°C, 14 ч, 50 мг/л) массой 1 г помещали в колбу с 10 мл стерильной водопроводной воды и взбалтывали круговыми

вращательными движениями в течение 10 мин. Из полученной вытяжки готовили разведения (10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4}). Далее стерильными пипетками Мора отбирали аликвоты суспензии объемом по 10 мл и переносили в колбы, содержащие 90 мл стерильной водопроводной воды. Затем из каждой колбы брали по 1 мл суспензии соответствующего разведения и вносили их в стерильные чашки Петри с селективными средами. В работе использовали лизогенную среду (среда Лурия) для учета бактерий и среду Чапека-Докса для учета грибов (таблица Б5). Далее чашки инкубировали при 30°C. Через 72 ч инкубирования подсчитывали общее число КОЕ в чашках и рассчитывали количество КОЕ 1 г зерна. В качестве контрольных использовали семена, не подвергавшиеся праймированию. Дополнительно исследовали вариант с семенами, стерилизованными с помощью H_2O_2 (15%, 40 мин). Повторность двукратная.

Определение микроорганизмов на основании фенотипических признаков (морфология колоний, окраска, микроморфология под микроскопом, тест с 3% КОН) было любезно проведено докт. биол. наук проф. Л.В. Лысак.

2.5.2 Метод анализа семян в рулонах фильтровальной бумаги

Метод основан на стимуляции развития и роста микроорганизмов в зараженных семенах и позволяет определять присутствие микроорганизмов не только на поверхности, но внутри семян [27].

Зараженность семян определяли путем проращивания их в рулонах фильтровальной бумаги. Для проращивания по 50 шт. праймированных AgНЧ (16°C, 14 ч, 50 мг/л) семян пшеницы раскладывали на полоску предварительно увлажненной до полной влагоемкости фильтровальной бумаги в одну линию с интервалом 1 см и на расстоянии 2 см от верхнего и боковых краев бумаги зародышами вниз. Разложенные на бумаге семена накрывали такой же полоской увлажненной фильтровальной бумаги, поверх которой накладывали полоску полиэтилена для предотвращения пересыхания, и сворачивали в рулон. Рулоны ставили вертикально в стеклянные сосуды и помещали для проращивания в термостат при температуре 23°C. Для предотвращения пересыхания рулонов в сосуды приливали по 15 мл дистиллированной воды, на дно термостата помещали поддоны с водой. Через 72 ч проводили учет количества зараженных семян, а также длину побегов и корней. Повторность пятикратная.

2.6 Мелкоделяночные эксперименты

2.6.1 Проведение мелкоделяночных экспериментов с пшеницей

Для проведения экспериментов использовали семена озимой пшеницы линии Л-1, праймированные AgНЧ-КМЦ (+16°C, 14 ч, 50 мг/л). Целью эксперимента была оценка влияния праймирования семян пшеницы AgНЧ на ее полевую всхожесть и способность перезимовки.

Микроделяночный эксперимент был проведен в октябре 2022 г – апреле 2023 г. на территории Ботанического сада Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Размер деленок 1.0×0.5 м, планирование рандомизированное полноблочное. Повторность четырехкратная. Посев семян пшеницы проводили вручную на глубину 1.0–1.5 см. Плотность посева 100 шт./м.

Почва среднесуглинистого гранулометрического состава с нейтральной

реакцией ($pH_{\text{водн}}$ 7.4). Содержание макроэлементов было следующим: органический С 38 г/кг, обменный К 172 мг K_2O /кг и доступный Р 570 мг P_2O_5 /кг. Таким образом, почва характеризовалась высоким содержанием углерода, высокой обеспеченностью фосфором и калием [28].

Посев семян пшеницы был проведен 07.10.2022 вручную. Уход за посевами состоял в ручной прополке. Учет всходов был проведен 25.04.2023.

2.6.2 Проведение мелкоделяночных экспериментов с редисом

Для проведения мелкоделяночных экспериментов использовали семена редиса сорта «Софит», праймированные гуматом калия «Сахалинский» (+17°C, 4.5 ч, 0.5 г/л) или AgНЧ-КМЦ (+24°C, 2.5 ч, 50 мг/л).

Мелкоделяночные эксперименты проводили в мае–сентябре 2023 г на территории Ботанического сада Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Размер делянок 1.0×0.5 м, планирование рандомизированное полноблочное. Повторность четырехкратная. Посев семян редиса проводили вручную на глубину 1.0–1.5 см. Расстояния между рядами и между растениями составляли 7 и 5 см соответственно. Погодные условия во время проведения экспериментов представлены на рисунке В2.

Эксперименты с семенами, праймированными ГВ, проводили в период с 26.05.2023 по 19.06.2023 и с 26.05.2023 по 27.06.2023. Почва среднесуглинистого гранулометрического состава с нейтральной реакцией ($pH_{\text{водн}}$ 7.4). Содержание макроэлементов было следующим: органический С 38 г/кг, обменный К 172 мг K_2O /кг и доступный Р 570 мг P_2O_5 /кг. Таким образом, почва характеризовалась высоким содержанием углерода, высокой обеспеченностью фосфором и калием [28].

Эксперименты с семенами, праймированными наночастицами, проводили в период с 09.08.2023 по 05.09.2023 и с 22.08.2023 по 18.09.2023. Почва среднесуглинистого гранулометрического состава со слабокислой реакцией ($pH_{\text{водн}}$ 6.1). Содержание макроэлементов было следующим: органический С 57 г/кг, обменный К 322 мг K_2O /кг и доступный Р 556 P_2O_5 мг/кг. Таким образом, почва характеризовалась высоким содержанием углерода, высокой обеспеченностью фосфором и калием [28].

Начиная с 5-го дня после посева проводили учет появляющихся проростков редиса, на 12-ый день – определение полевой всхожести. После 14-го дня ни на одной из опытных делянок новых всходов отмечено не было. [16].

Борьбу с сорняками проводили вручную по мере необходимости. На 24-ый – 32-ой день после посева растения были собраны вручную и промыты водопроводной водой. Учитывали массу корнеплодов и надземную биомассу. Для получения данных об урожайности учитывали общую массу свежих корнеплодов на делянках. Десять корнеплодов с каждой делянки были отобраны случайным образом для каждого варианта обработки для определения содержания сухого вещества, общего содержания сахаров и витамина С.

Общее количество сахаров в корнеплодах измеряли фенол-серным методом [30]. Редис измельчали в блендере, отбирали навеску ок. 2 г отбирали в полипропиленовую пробирку и приливали 50 мл

дистиллированной воды, предварительно нагретой до 70°C. Для экстракции пробирки оставляли в сушильном шкафу (Binder, ФРГ) при температуре 70°C на 30 мин. После окончания экстракции взвесь фильтровали через фильтр «синяя лента» и из фильтрата отбирали 100 мкл пробы в стеклянную пробирку. Далее к пробе последовательно добавляли 300 мкл 5% раствора фенола и через 10 мин 1.8 мл концентрированной серной кислоты. Для развития окраски смесь оставляли на 30 мин при комнатной температуре. Концентрацию сахаров определяли путем измерения оптической плотности при 490 нм на спектрофотометре (PG Instruments, Англия). Стандартные растворы для построения калибровочной кривой готовили путем разведения 0.05% раствора аскорбиновой кислоты.

Определение витамина С (аскорбиновой кислоты) в редисе проводили аммониймолибдатным методом согласно [31]. Редис измельчали в блендере, отбирали навеску ок. 2 г отбирали в полипропиленовую пробирку и приливали 20 мл экстрагирующей смеси (4.5 г щавелевой кислоты и 0.006 г ЭДТА в 1 л дистиллированной воды). Для экстракции пробирку встряхивали в течение 10 мин (встряхиватель Intelli Mixer, Латвия); после окончания экстракции взвесь фильтровали через фильтр «синяя лента». Из фильтрата на окрашивание в стеклянную колбу на 25 мл отбирали 5 мл фильтрата, приливали 0.5 мл смеси метафосфорная-уксусная кислота (к 40 мл ледяной уксусной кислоты, растворенной в 200 мл дистиллированной воды, добавляли 15 г метафосфорной кислоты и доводили объем до 500 мл дистиллированной водой), 1 мл 5% серной кислоты, 2 мл 5% раствора молибдата аммония и доводили до метки дистиллированной водой. Смесь оставляли на 15 мин при комнатной температуре для развития окраски и далее определяли оптическую плотность при длине волны 760 нм на спектрофотометре (PG Instruments, Англия). Стандартные растворы для построения калибровочной кривой готовили путем разведения 0.1% раствора аскорбиновой кислоты.

Определение количества сухого вещества проводили путем высушивания предварительно измельченного редиса (навеска ок. 10 г) 105°C в сушильном шкафу (Binder, ФРГ) до достижения постоянной массы [32].

Данные представляли в виде среднего $\pm$ стандартное отклонение. Для анализа различий между средними значениями был применен однофакторный дисперсионный анализ с последующим сравнением средних значений с использованием критерия наименьшей значимой разницы Фишера при $p < 0.05$.

3 Экспериментальные исследования. Результаты

3.1 Влияние стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в оптимальных условиях

3.1.1 Оптимизация праймирования гуминовыми веществами

На основании экспериментов, проведенных согласно плану Бокса-Бенкена, были получены блоки данных, обработка которых позволила построить поверхности отклика (ИЖ, длина корней, длина побегов, всхожесть) от изучаемых параметров праймирования (концентрация X1, продолжительность X2, температура X3). Типичный вид получаемых поверхностей представлен на рисунке В3.

На основании полученных параметров модели рассчитывали значения оптимизированных условий праймирования ГВ семян пшеницы (таблица Б6) и редиса (таблица Б7).

Как видно из представленных в таблице 6 данных, оптимальная концентрация гумата «Сахалинский» для праймирования семян пшеницы в зависимости от оптимизируемого параметра лежала в диапазоне от 0.9 до 1.0 г/л. В случае редиса (таблица 7) для этого же гуминового препарата нижняя граница аналогичного диапазона была несколько ниже (0.5 г/л). Возможно, наблюдаемые различия объясняются разными размерами семян пшеницы и редиса.

Оптимальная продолжительность праймирования для семян яровой пшеницы и редиса составила 1.0–5.5 ч и 0.5–6.0 ч соответственно. Этот параметр праймирования менялся в более широком диапазоне, по сравнению с концентрацией и температурой, и в наибольшей степени определялся оптимизируемым откликом. В случае гумата «Сахалинский» по оптимальной продолжительности праймирования семян пшеницы отклики можно было расположить в следующий ряд по возрастанию: длина корней < ИЖ < длина побегов < энергия прорастания. Для семян редиса аналогичный ряд имел вид: длина побегов < ИЖ = длина корней < энергия прорастания. Таким образом, как в случае семян пшеницы, так и в случае семян редиса наибольшая продолжительность праймирования была необходима для достижения максимальных значений энергии прорастания. При этом оптимальная продолжительность праймирования для получения максимальной энергии прорастания в случае использования гумата «Сахалинский» для семян пшеницы составила 5.5 ч, а для редиса – 2.5 ч. По всей видимости, это объясняется тем, что пшеница характеризуется более высоким средним временем прорастания (15–18 ч), чем редис (ок. 3 ч) [33, 34]. Тем не менее, следует отметить, что для других исследованных гуминовых препаратов (Rowhumus и Лигногумат) были отмечены другие зависимости оптимальной продолжительности праймирования от оцениваемого отклика. Это указывает, что свойства гуминового препарата также оказывают влияние на результаты праймирования. В частности, Rowhumus и Лигногумат имели меньшее содержание органического вещества, чем гумат «Сахалинский».

Отдельно следует подчеркнуть установленный факт, что оптимальная продолжительность праймирования ГВ (0.5–6.0 ч) была значительно ниже, чем продолжительность набухания семян. Например, для яровой пшеницы сорта Омская было показано, что стадия ускоренного поглощения воды (поступление воды в зародыш) наблюдается в течение 2–6 ч, потом наступает стадия быстрого набухания (преимущественное поступление воды в эндосперм) продолжительностью 6–16 ч. Через 16–22 ч. стадия набухания заканчивается стадией насыщения [35]. По-видимому, это указывает на способность ГВ ускорять прорастание семян.

Оптимальные температуры праймирования семян пшеницы ГВ составили 14.8–19.4°C, а семян редиса – 19–27°C. В обоих случаях полученные величины были чуть выше оптимальных температура прорастания этих культур: для яровой пшеницы приводимые в литературе оптимальные температуры прорастания 12–15°C [36], а для редиса 15–20°C [37].

Таким образом, оптимизация параметров праймирования ГВ показала,

что

- диапазон оптимальных концентраций ГВ составляет 0.5–1.0 г/л;
- оптимальная продолжительность праймирования ГВ не превышает 6 ч и ниже продолжительности стадии набухания семян, что связано, по-видимому, со стимулирующей активностью ГВ; наибольшая продолжительность праймирования необходима для достижения максимальных показателей энергии прорастания;
- оптимальная температура праймирования ГВ близка к оптимальной температуре прорастания культуры.

3.1.2 Оптимизация условий праймирования наночастицами серебра

На основании экспериментов, проведенных согласно плану Бокса-Бенкена, были получены блоки данных, обработка которых позволила построить поверхности отклика (ИЖ, длина корней, длина побегов, всхожесть) от изучаемых параметров праймирования (концентрация X1, продолжительность X2, температура X3). Результаты представлены в таблице Б8 (пшеница) и таблице Б9 (редис).

В случае семян пшеницы рассчитанная оптимальная концентрация AgНЧ в большинстве случаев (оптимизация по ИЖ, длине побегов и длине корней) лежала в узком диапазоне и была близка к 50 мг/л; исключение составил препарат AgНЧ-ТВИ, для которого оптимальная концентрация была в 1.5–2.8 раза ниже. По сравнению с другими наночастицами, AgНЧ-ТВИ характеризовался наименьшим размером частиц и самыми высокими абсолютными значениями ζ -потенциала. Интересно отметить, что если в качестве оптимизируемого показателя использовать энергию прорастания, то для всех препаратов наночастиц рассчитанная оптимальная концентрация была ниже, чем при оптимизации других показателей. Для AgНЧ-ТВИ, напротив, максимальная оптимальная температура была отмечена именно для показателя «энергия прорастания». Для редиса рассчитанные оптимальные показатели концентрации AgНЧ (AgНЧ-КМЦ) были выше при всех оптимизируемых параметрах и составляли около 100 мг/л.

Оптимальная продолжительность праймирования для семян редиса, напротив, была выше в случае пшеницы. Ранговый корреляционный анализ полученных результатов показал, что существует обратная связь между рассчитанной оптимальной продолжительностью праймирования и ζ -потенциалом наночастиц. Так как все исследованные наночастицы характеризовались отрицательными значениями ζ -потенциала, обнаруженная зависимость может объясняться тем, что снижение отрицательного заряда приводит к увеличению сродства наночастиц к поверхности семян, что, в свою очередь, способствует уменьшению времени взаимодействия, необходимого для проявления эффекта праймирования. Как и в случае оптимизации праймирования ГВ, минимальные оптимальные величины продолжительности праймирования были обнаружены при оптимизации по параметру «энергия прорастания». Однако, в отличие от праймирования ГВ, оптимизированные величины продолжительности обработки для семян пшеницы (9–15 ч) соответствовали длительности стадии набухания семян (6–16 ч) [35].

Рассчитанные оптимальные значения температуры праймирования AgНЧ лежали в диапазоне 13.5°C–17.6°C и были близки к таковым,

определенным для праймирования ГВ (14.8°C–19.4°C). Для редиса наблюдали сходную картину: 19.0°C–27.0°C при обработке ГВ и 21.2°C–24.0°C при обработке AgНЧ. Во всех случаях минимальная температура праймирования была отмечена при использовании в качестве показателя «энергия всхожести».

Таким образом, оптимизация параметров праймирования AgНЧ показала, что

- диапазон оптимальных концентраций AgНЧ составляет 10.2–90.0 мг/л;
- оптимальная продолжительность праймирования AgНЧ близка к продолжительности стадии набухания семян;
- оптимальная температура праймирования AgНЧ близка к оптимальной температуре прорастания культуры.

3.1.3 Влияние стимуляторов роста растений на набухание семян

Проведенные эксперименты показали, что степень набухания заметно увеличивается уже после первого часа замачивания (таблица Б10).

Через 24 ч после начала замачивания масса семян ноготков, в зависимости от формы семян и варианта, возрастала в 2.4–4.0 раза. Наименьший рост массы был отмечен для семян крючковидной формы (в среднем 2.7 раза), а наибольший – для семян ладьевидной формы (в среднем 4.5 раза). По всей видимости, наблюдаемые различия объясняются особенностями строения оболочки семян разной формы: известно, что крючковидные семена характеризуются плотной оболочкой со слабой капиллярностью покровных тканей и, как следствие, сниженной способностью к водопоглощению [38]. Через 24 ч после начала замачивания по степени набухания М контрольные семена ноготков образовывали следующий ряд: ладьевидные (255%) > серповидные (233%) > крючковидные (205%).

При замачивании семян ноготков ладьевидной и серповидной формы в препарате Эпин-экстра наблюдали увеличение степени набухания семян (рисунок В4). Через 24 ч этот показатель для семян ладьевидной и серповидной формы достигал 304% и 280% соответственно. В случае крючковидных семян, однако, Эпин-экстра не влиял на набухание.

В отличие от препарата Эпин-экстра, Гумистим не оказывал положительного влияния на поглощение воды семенами ноготков. В случае семян ладьевидной и серповидной формы семена, замоченные в Гумистиме, характеризовались пониженной степенью набухания; в случае семян крючковидной формы эта тенденция сохранялась на всем протяжении эксперимента (24 ч). Наблюдаемое снижение, возможно, объясняется высокой концентрацией минеральных элементов в составе Гумистима, что могло привести к формированию гиперосмотических свойств. Однако высказанное предположение требует проведения дополнительных исследований.

Таким образом, проведенные эксперименты продемонстрировали способность эпибрассинолидов стимулировать поступление воды при набухании семян ноготков ладьевидной и серповидной формы.

3.2 Влияние стимуляторов роста и наночастиц на прорастание в условиях водного стресса

3.2.1 Влияние праймирования гуминовыми веществами и наночастицами

на параметры прорастания семян в условиях водного дефицита

Праймирование гуминовыми веществами. Проращивание семян пшеницы в гиперосмотическом растворе ПЭГ6000 с концентрацией 150 г/л, имитирующем недостаток воды, показало, что из исследованных параметров прорастания негативной влияния таких условий обнаруживается только по отношению к длине побегов. На остальные исследованные параметры – энергию прорастания и длину корней – создание условий водного дефицита не оказало влияния (таблица Б11). Это согласуется с данными других исследователей, также отмечавших, что наиболее чувствительным параметром к водному дефициту является длина побегов проростков [9].

Гидропраймирование и праймирование ГВ в концентрации 0.5 г/л не оказало статистически значимого влияния на длину побегов пшеницы. В диапазоне концентраций ГВ 1.0–2.5 г/л праймирование семян позволило увеличить длину корней до 140–157%. Максимальное значение ИЖ было отмечено при концентрации ГВ 2.0 г/л, поэтому эту концентрацию использовали далее при проведении лабораторно-вегетационных экспериментов в качестве рабочей концентрации. Во всех случаях праймирование гуминовыми веществами привело к увеличению ИЖ до значений, превышающих контрольные за счет стимуляции роста корней. Ранее преимущественное влияние ГВ на корневую систему растений было продемонстрировано в ряде исследований.

В случае редиса водный стресс также привел к снижению длины корней побегов (таблица Б12).

Однако, в отличие от экспериментов с пшеницей, обработка семян гуминовыми веществами не привела к снятию ингибирующего эффекта ПЭГ6000.

Таким образом, результаты с оценкой эффективности ГВ как праймирующих агентов в стрессовых условиях показали, что, как и в случае оптимальных условий, редис был менее отзывчив на эту обработку.

Праймирование наночастицами серебра. Результаты экспериментов приведены в таблице Б13 и таблице Б14.

Как видно из данных таблицы Б13, праймирование AgНЧ способствовало частичному снятию стрессового состояния проростков пшеницы, вызванного водным стрессом. После обработки семян практически во всех случаях наблюдали увеличение длины побегов и корней проростков и возрастание ИЖ. Для проростков пшеницы, полученных из семян, обработанных препаратами AgНЧ-КМЦ, AgНЧ-ОЛЕ и AgНЧ-ПВП длины корней даже превышали контрольные значения. По-видимому, в данном случае угнетающий эффект ПЭГ6000 переходил в явление гормезиса, при котором наблюдается стимулирующее действие низких доз стрессоров. Исключение составил препарат AgНЧ-ДДС, для которого не было отмечено положительного эффекта. Максимальную эффективность проявил препарат AgНЧ-КМЦ. В случае редиса праймирование семян редиса AgНЧ-КМЦ также частично снимал водный стресс: длина побегов и корней и ИЖ превышала значения для проростков, выращенных в присутствии ПЭГ, не достигая, тем не менее, контрольных значений.

На основании проведенных экспериментов для проведения лабораторно-вегетационных и мелкоделяночных опытов использовали AgНЧ-КМЦ.

3.2.2 Влияние праймирования гуминовыми веществами на рост пшеницы в условиях водного стресса в лабораторно-вегетационном эксперименте

В лабораторно-вегетационном опыте, в отличие от биотестирования по методу проростков (см. п. 3.2.1), был отмечен положительный эффект праймирования ГВ на параметры прорастания: праймирование ГВ привело к увеличению всхожести семян относительно контроля (рисунок В5).

Как видно из рисунка В5, наиболее выраженным положительное влияние праймирования было в условиях переувлажнения, когда итоговая всхожесть в контрольном варианте не превышала 20%. Принимая во внимание, что при посадке использовали наклюнувшиеся семена, полученные результаты свидетельствуют, что при избыточном увлажнении происходит гибель проростков пшеницы. В условиях оптимального увлажнения праймирование семян повышало всхожесть пшеницы на 12–20 п.п. Более полно параметры, характеризующие появление всходов, представлены в таблице Б15.

Избыточное увлажнение угнетающе действовало на пшеницу. Это выразилось в снижении энергии прорастания в 10 раз и уменьшении всхожести в 3.6 раза по сравнению с условиями оптимальной влажности. Энергия прорастания семян, выращенных в условиях избыточного увлажнения, но праймированных ГВ, увеличивалась в 6 раз. Гидропрайминг в этих условиях полностью снимал негативный эффект переувлажнения: энергия прорастания и всхожесть семян, праймированных водой, не отличались от контрольных показателей при оптимальном увлажнении. Недостаточное увлажнение приводило к снижению энергии прорастания в 2.5 раза, праймирование ГВ увеличило энергию прорастания в 3.3 раза и всхожесть семян до 100%. Полученные результаты хорошо согласуются с данными о благоприятном влиянии ГП на энергию прорастания и всхожесть семян [8] и свидетельствуют, что праймирование ГВ также оказывает положительное влияние на эти показатели.

Тип обработки и влагообеспеченность не повлияли на среднее время прорастания семян. Но вместе с тем коэффициент вариации СВП при праймировании в условиях оптимального и избыточного увлажнения снижался на 13–24 п.п., что свидетельствует о повышении дружности появления всходов вследствие праймирования семян, что ранее было отмечено авторами [8, 39].

Следует отметить, что нами не было зафиксировано отрицательного влияния недостатка воды на итоговую всхожесть пшеницы, хотя энергия прорастания в этих условиях была ниже, чем на контроле в оптимальных условиях. По-видимому, это объясняется особенностью постановки вегетационного эксперимента, а именно тем, что в опыте использовали предварительно наклюнувшиеся семена. Это привело к тому, что разница в увлажнении появилась только после набухания – стадии, при которой семена наиболее чувствительны к наличию доступной воды.

При дальнейшем росте, тем не менее, недостаточное увлажнение отразилось на фотосинтетической активности растений – одном из ключевых показателей состояния растений (таблица Б16). Так, максимальная скорость электронного транспорта $gETR_{max}$ у контрольных растений в условиях засухи была в 1.8 раз ниже, чем при оптимальных условиях увлажнения.

В условиях избыточного увлажнения праймирование привело к

снижению показателя α до значений, соответствующих контрольным в оптимальных условиях увлажнения. Это указывает на повышение эффективности фотосинтеза в условиях недостатка освещения и хорошо согласуется с тем, что листья растений, выращенных из праймированных семян, характеризовались повышением содержания каротиноидов – пигментов, входящих в состав светособирающих антенн – на 15% и 27% для вариантов ГВ2.0 и ГП соответственно. При этом статистически значимых различий между вариантами ГП и ГВ2.0 не было найдено. На содержание хлорофиллов статистически значимое влияние праймирования было установлено также только в случае переувлажнения, несмотря на то, что во всех случаях средние значения этого показателя для контрольных растений были ниже, чем для растений, полученных из праймированных семян, достигая 105–131% и 105–128% для хлорофилла *a* и хлорофилла *b* соответственно.

Оценка водного дефицита листьев показала, что по этому показателю контрольные растения, выращенные в условиях избыточного и оптимального увлажнения, не отличаются друг от друга. При выращивании в условиях недостаточного увлажнения водный дефицит в листьях растений пшеницы возрастал более, чем в два раза. При праймировании ГВ2.0 и ГП водный дефицит в листьях в условиях недостаточного увлажнения снизился до контрольных показателей (таблица Б17). Это указывает на то, что праймирование семян способствовало частичному снятию водного стресса у растений, выращиваемых в условиях недостаточного увлажнения.

Несмотря на то, что праймирование положительно повлияло на содержание воды в листьях, некоторые параметры фотосинтеза и содержание каротиноидов, этот способ обработки семян не привел к значимому увеличению массы одного растения ни в условиях переувлажнения, ни в условиях водного дефицита. Однако общая надземная биомасса растений, выращенных из праймированных семян, почти во всех случаях превышала контрольные значения. Исключение составил вариант ГП при недостаточном увлажнении, когда общая надземная биомасса не отличалась от контрольной. Наблюдаемый выраженный положительный эффект праймирования обусловлен, главным образом, повышением всхожести пшеницы при такой обработке семян. Следует отметить, тем не менее, что в случае праймирования ГВ, повышение надземной биомассы наблюдали даже при выращивании растений в условиях водного дефицита, когда обработка семян не привела к увеличению их всхожести. Это указывает возможность частичного нивелирования у растений стресса, вызываемого недостатком воды, и хорошо согласуется с продемонстрированным ранее положительным влиянием на накопление воды листьями пшеницы.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что ГП и праймирование ГВ частично снимают водный стресс у растений пшеницы на ранних стадиях развития. При прорастании в условиях водного дефицита положительный эффект от праймирования ГВ, по сравнению с ГП, более выражен, что отражается на длине проростков и их ИЖ. В почвенных условиях в диапазоне влажности почвы от 40% до 100% НВ праймирование ГВ увеличивает итоговую всхожесть и дружность появления всходов. На более поздних стадиях роста – содержание каротиноидов и, как следствие, способности растений к фотосинтезу в условиях недостаточной

освещенности. При недостаточном увлажнении праймирование семян пшеницы ГВ уменьшает водный дефицит в листьях растений. В целом, как ГП, так и праймирование ГВ способствует увеличению надземной биомассы, однако действие ГВ более выражено в условиях водного дефицита, а ГП – в условиях переувлажнения.

3.3 Влияние наночастиц серебра на зараженность семян пшеницы

Анализ колоний микроорганизмов, полученных из смывов с семян пшеницы сорта Радмира на лизогенной среде Лурия, показал, что среди обнаруженных 12 культур преобладают грамотрицательные бактерии, которые на основании фенотипических признаков могут быть предположительно отнесены к родам *Erwinia*, *Xantomonas*, *Cytophaga*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* и *Enterobacter*; также один из обнаруженных штаммов относится к грамположительным (*Bacillus*). На среде Чапека было обнаружено 6 культур; на основании фенотипических признаков большинство из них также относятся к грамотрицательным (*Erwinia*, *Xantomonas*, *Enterobacter*). Один штамм – грамположительный (*Rhodococcus*). Дальнейшая идентификация требует проведения физиолого-биохимических тестов или секвенирования гена 16SpPHK.

Анализ смывов с семян показал, что праймирование всеми исследованными наночастицами приводит к снижению КОЕ в смывах в 3–13 раз (таблица Б18).

Максимальная эффективность была отмечена для наночастиц с минимальными размерами, а именно, для AgНЧ-ДДС и AgНЧ-ТВИ. На среде Чапека-Докса эффективность наночастиц серебра, стабилизированных додецилсульфатом натрия не отличалась от эффективности стерилизации перекисью водорода. Обнаруженная зависимость хорошо согласуется с опубликованными в литературе данными о влиянии размера наночастиц серебра на их бактерицидную активность: чем меньше размер, тем выше эффективность [14]. Обычно наблюдаемый эффект объясняется более выраженным образованием активных форм кислорода, являющихся одной из причин высокой бактерицидной активности наночастиц серебра.

Таким образом, оценка влияния нанопраймирования на поверхностное заражение семян показала эффективность AgНЧ как дезинфекторов. Однако при проращивании праймированных семян по методу проростков в чашках Петри (см п. 2.3.2) обработка не повлияла на количество зараженных семян (таблица Б19)

Как видно из таблицы 19, значимого снижения количества зараженных семян не наблюдали даже при использовании в качестве дезинфектора перекиси водорода. Несмотря на то, что количество семян с выраженным развитием инфекций в контроле составило 18%, а в случае AgНЧ-КМЦ, AgНЧ-ТВИ и AgНЧ-ДДС только 10%, 10% и 6% соответственно, проведенный дисперсионный анализ показал незначимость наблюдаемых различий. Это указывает на внутреннюю инфекцию использованных в работе семян пшеницы. Проведенный далее эксперимент с семенами пшеницы, праймированными AgНЧ-КМЦ, с использованием анализа в рулонах фильтровальной бумаги, показал, что внутренняя инфекция обусловлена преимущественно грибными болезнями (рисунок В6).

Обработка AgНЧ-КМЦ привела к значимому снижению количества зараженных семян (таблица Б20), однако снижение составило всего 7 п.п.,

что нельзя признать удовлетворительным показателем.

По всей видимости, это свидетельствует о незначительном поступлении AgНЧ-КМЦ во внутреннее пространство зерновки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что праймирование AgНЧ позволяет проводить эффективную поверхностную дезинфекцию семян, но слабо влияет на внутренние инфекции.

3.4 Влияние стимуляторов роста и наночастиц на рост пшеницы и редиса в условиях мелкоделяночных экспериментов

3.4.1 Влияние праймирования наночастицами серебра на перезимовку пшеницы

До установления снежного покрова (15.10.2023) всходов пшеницы не наблюдали, поэтому полевую всхожесть пшеницы оценить не удалось. Далее в осенне-зимний период 2022–2023 гг. в целом сложились неблагоприятные погодные условия для перезимовки озимых культур. Несмотря на значительную высоту снежного покрова, установившуюся к середине декабря (30–39 см) из-за сильной оттепели в 22.12.2022 – 01.01.2023 и дождей высота снежного покрова значительно уменьшилась. Рекордно высокая температура 01.01.2023 (+5.1°C) сменилась сильными морозами 07.01.2023 (–23.5°C) при низком уровне осадков (55% от средней нормы для января). Большие перепады температуры привели к уплотнению и обледенению снежного покрова. Согласно наблюдениям специалистов компании «Сингента» (<https://www.syngenta.ru/crops/crop-cereals/20230316-winter-ear-crops-at-the-beginning-of-spring-vegetation-in-2023>), на территории центральной части России зимой 2022–2023 гг. наблюдались такие погодные явления как ледяная корка и вымерзание. Минимальная температура почвы на глубине залегания узла кущения озимых была ниже критических значений и колебалась в диапазоне от –3 до –6°C. Часто были отмечены очень значительные перепады температуры с +8°C до –20°C и ниже. Перечисленные явления привели к плохой перезимовке озимых культур вследствие частичного вымерзания как надземной части растений, так и узла кущения и корневой системы, необходимых для возобновления весенней вегетации.

Количество всходов пшеницы в контрольном варианте, обнаруженных после перезимовки, составило 42 ± 8 шт./м², что соответствует тому, что из 100 посеянных зерновок только 42 дали всходы, пережившие зимовку (при использованной в работе плотности посева 100 шт./м²). Это значительно ниже, чем обычно указываемые величины для благоприятных погодных условий. В работе [40] сообщается, что при полевой всхожести пшеницы 70–76% перезимовало около 91–93% растений, т.е. из 100 семян весной было получено 64–70 всходов. Очевидно, что такая низкая выживаемость была обусловлена крайне неблагоприятными условиями зимой 2022–2023 гг. Тем не менее, проведенный микроделяночный эксперимент продемонстрировал перспективность праймирования для повышения выживаемости пшеницы. В случае гидропрайминга из 100 посеянных зерновок количество всходов, переживших зимовку, составило 46 ± 6 шт., в случае нанопрайминга AgНЧ-КМЦ – 52 ± 8 шт. Согласно проведенному дисперсионному анализу, установленные различия были достоверны при $p < 0.05$, НСР составила 1 шт.

Таким образом, праймирование семян пшеницы AgНЧ-КМЦ позволило увеличить выживаемость всходов на 10 п.п.

3.4.2 Эффективность гуминовых веществ как агентов для праймирования семян редиса в условиях мелкоделяночных экспериментов

Эксперименты с семенами, праймированными ГВ, проводили в период с 26.05.2023 по 19.06.2023 (эксперимент 1) и с 26.05.2023 по 27.06.2023 (эксперимент 2). Средняя температура и общее количество осадков составили 16.3°C и 16.7°C и 34.2 мм и 43.5 мм во время эксперимента 1 и эксперимента 2 соответственно. Такие условия можно считать относительно благоприятными для роста этой культуры с точки зрения температуры, но с водным дефицитом. Согласно существующим данным, высокие урожаи можно получать при общем потреблении воды редисом более 100 мм [41].

В период появления всходов редиса (4–12 день после посева) температура поверхности почвы колебалась от 12.7°C до 25.1°C, составляя в среднем 18.9°C, что соответствует рекомендуемому оптимальному диапазону 15–20°C [37]. В результате полевая всхожесть редиса «Софит» в контрольном варианте составила 83% как в эксперименте 1, так и в эксперименте 2, и была близка к лабораторной всхожести (рисунок В7).

Несмотря на то, что первые всходы из праймированных семян появились на сутки раньше, чем из контрольных, в дальнейшем количество появляющихся всходов было выше в контрольном варианте. В эксперименте 1 финальная всхожесть контрольных семян была значимо ($p < 0.05$), чем праймированных. Полученные результаты о негативном влиянии праймирования на всхожесть противоречат как нашим результатам, полученным в 2022 г. [42], так и обычно приводимым в литературных источниках данных. В большинстве случаев авторы отмечают более быстрое появление всходов из обработанных семян в первые дни после посева с дальнейшим выравниванием с контрольными показателями.

Несмотря на более низкую всхожесть, ни в эксперименте 1, ни в эксперименте 2, значимых отличий по урожайности между исследованными вариантами не наблюдали (таблица Б21).

В эксперименте 1 урожайность варьировала в диапазоне 0.4–0.6 кг/м², что значительно ниже, чем указываемая оригинатором сорта «Софит» (2.8–3.2 кг/м²). Очевидно, это связано с недостаточным уровнем осадков (34.2 мм). В эксперименте 2, где общее количество осадков возросло (43.5 мм), урожайность редиса увеличилась до 1.2–1.5 кг/м², но также не достигала значений, получаемых в оптимальных условиях роста.

Анализ качества редиса показал, что праймирование ГВ в эксперименте 1, когда дефицит воды был более выражен, привело к снижению в корнеплодах редиса содержания витамина С. По-видимому, это указывает, что праймирование вызывает частичную адаптацию растений редиса к повышенной температуре и дефициту воды, поскольку увеличение содержания витамина С часто является следствием стрессовых состояний [43]. Следует подчеркнуть, однако, что снижение содержания витамина С, с точки зрения потребительских характеристик редиса, является отрицательным эффектом праймирования ГВ.

Таким образом, проведенные исследования показали неэффективность ГВ как праймирующих агентов в случае использования праймирования

как единственного приема смягчения стресса. Кроме того, при оптимизировании условий праймирования, по-видимому, предпочтение следует отдавать условиям, обеспечивающим максимальную всхожесть, а не другие характеристики начального роста редиса (длина корней или побегов). Сделан вывод о том, что будущие исследования могут быть направлены на оценку возможности усиления эффекта праймирования ГВ путем сочетания его с внекорневыми обработками.

3.4.3 Эффективность наночастиц серебра как агентов для праймирования семян редиса в условиях мелкоделяночных экспериментов

Эксперименты с семенами, праймированными AgНЧ-КМЦ, проводили в период с 09.08.2023 по 05.09.2023 (эксперимент 3) и с 22.08.2023 по 18.09.2023 (эксперимент 4). Средняя температура и общее количество осадков составили 18.2°C и 14.9°C и 23.6 мм и 9.9 мм во время эксперимента 3 и эксперимента 4 соответственно. Это свидетельствует, что выращивание редиса происходило при благоприятной температуре, но при выраженном недостатке влаги. В эксперименте 4 количество осадков было экстремально низким.

Как и в случае праймирования ГВ, первые проростки из праймированных AgНЧ-КМЦ семян появлялись раньше контрольных, однако, начиная с 6–7 дня после посева разницы по количеству всходов между вариантами не было (рисунок В8).

В дальнейшем итоговая всхожесть была одинаковой для всех вариантов. В случае эксперимента 3 она составила 71–81% и не отличалась от всхожести, наблюдаемой в сходных условиях в эксперименте 1: 69–83%. Однако при проведении эксперимента 4 из-за сильного недостатка воды итоговая всхожесть не превышала 27–32% (таблица Б22).

Крайне засушливые условия во время проведения эксперимента 4 привели к чрезвычайно низкой урожайности. Тем не менее, как и в случае стрессовых условий при проведении эксперимента 1 и эксперимента 2, в корнеплодах семян, полученных из семян, праймированных AgНЧ-КМЦ, было обнаружено значимое снижение содержания витамина С.

Таким образом, как и в случае ГВ, проведенные исследования показали неэффективность AgНЧ-КМЦ как праймирующих агентов в случае использования праймирования как единственного приема смягчения стресса.

Обобщая полученные результаты мелкоделяночных экспериментов, можно заключить, что они подтверждают невозможность простой экстраполяции результатов праймирования, получаемых в лабораторных условиях, на результаты полевых экспериментов. Эксперименты с редисом показали, что повышение биометрических показателей менее, чем на 200%, не дает положительного отклика в полевых условиях. В случае, если эффект в лабораторных условиях превышает 200%, как наблюдалось в случае пшеницы, можно ожидать достоверных результатов, свидетельствующих о положительном влиянии этого способа обработки семян.

Дальнейшие направления исследований должны быть сосредоточены на оценке эффективности праймирования по отношению к растениям пшеницы в полевых условиях, а также на поиске возможных способов усиления эффективности праймирования. Для решения этих задач необходимо проведение исследований, направленных на поиск взаимосвязи

между процессами набухания и эффективностью праймирования, а также анализ этих процессов на биохимическом уровне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хомяков Д. М. «Климатически нейтральное» сельское хозяйство и «зеленая» агрохимия как инструменты обеспечения продовольственной безопасности и сохранения почв // Ресурсосберегающее земледелие. – 2023. – Т. 1. – № 57. – URL: <https://agriecomission.com/base/klimaticheski-neitralnoe-selskoe-hozyaistvo-i-zelenaya-agrohimiya-kak-instrumenty-obespecheniya-prodovolstvennoi-bezopasnosti-i-sohraneniya-pochv> (дата обращения 18.07.2023).
2. Гурьянов Н. Население Земли резко сократится. Какое будущее ждет Россию. РИА новости, 31 марта 2023. – URL: <https://ria.ru/20230331/naselenie-1861896371.html> (дата обращения 18.07.2023).
3. Our world in data. – URL: <https://ourworldindata.org/grapher/agricultural-area-per-capita?tab=table> (дата обращения 18.07.2023).
4. Lowry G. V., Avellan A., Gilbertson L. M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution // Nature Nanotechnology. – 2019. – Vol. 14, № 6. – P. 517–522.
5. Li H., Li X., Liu S., Zhu X., Song F., Liu F. Chapter 12. Induction of cross tolerance by cold priming and acclimation in plants: Physiological, biochemical and molecular mechanisms / Priming-mediated stress and cross-stress tolerance in crop plants. Academic Press: Cambridge, USA, 2020. – P. 183–201.
6. Bharadwaj N., Barthakur S., Gogoi N., Physiological responses of osmopriming and hormonal treatments in two contrasting mungbean (*Vigna radiata*) cultivars // Current Science. – 2017. – № 112. – P. 2467–2470.
7. Кубарев Е. Н., Роберт А. Э., Верховцева Н. В., Аньшаков В. И. Влияние предпосевной обработки экзогенными аминокислотами в разреженной среде на ростовые характеристики семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Проблемы агрохимии и экологии – 2021. – № 1. – С. 7–1
8. Lutts S., Benincasa P., Wojtyla L., Kubala S.S., Pace R., Lechowska K., Quinet M., Garnczarska M.. Seed Priming: New Comprehensive Approaches for an Old Empirical Technique / New challenges in seed biology – basic and translational research driving seed technology. IntechOpen Limited, London, UK, 2016. – P. 1–46.
9. Noman A., Ali Q., Maqsood J., Iqbal N., Javed M. T., Rasool N., Naseem J. Deciphering physio-biochemical, yield, and nutritional quality attributes of water-stressed radish (*Raphanus sativus* L.) plants grown from Zn-Lys primed seeds // Chemosphere. – 2018. – № 195. – P. 175–189.
10. Abro A., Memon S., Abro S. A., Sam E. K., He R., Rind M. H., Memon S., Solangi Z., Muhammad T., Ali B., Ahmed W., Dev W., Abro M. A., Rajput N., Nizamani S., Nargis M, Kumbhar R. A. Evaluation of drought tolerance

in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars at early seedling stage using polyethylene glycol induced osmotic stress // *The Journal of Animal & Plant Sciences*. 2020. – Vol. 30, № 4. – P. 950–957.

11. Baia D. C., Olivares F. L., Zandonadi D. B., Soares C. P., Spaccin R., Canellas L. P. Humic acids trigger the weak acids stress response in maize seedlings // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. – 2020. – № 7. – Article Number 31.
12. Canellas L. P., Canellas N., Irineu L. S., Olivares F. L., Piccolo A. Plant chemical priming by humic acids // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. – 2020. – № 2. – Article Number 17.
13. Kah M., Tufenkji N., White J.C. Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection // *Nature Nanotechnology*. – 2019. – Vol. 14, № 6. – P. 532–540.
14. Acharya P., Jayaprakasha G. K., Crosby K. M., Jifon J. L., Patil B. S. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas // *Scientific Reports* – 2020. – № 10. – Article Number 5037.
15. Pawar V. A., Laware S. L. Seed priming: a critical review // *International Journal of Scientific Researches in Biology Sciences* – 2018. – № 5. – P. 94–101.
16. Damalas C. A., Koutroubas S. D., Fotiadis S. Hydro-priming effects on seed germination and field performance of faba bean in spring sowing // *Agriculture*. – 2019. – № 9. – Article Number 201.
17. Тарзанова Т. В., Мельников А. В. Влияние азотных подкормок на технологические свойства зерна озимой пшеницы // *Известия ТСХА* – 2010. – № 10. – С. 147–151.
18. Костылев Д. А., Исмагилов Р. Р., Тимофеева О.В. Семенной материал календулы лекарственной в Предуралье // *Аграрный вестник Урала*. – 2011. – №1(80). – С. 9–10.
19. Ferreira S. L., Bruns R. E., Ferreira H. S., Matos G. D., David J. M., Brandão G. C., da Silva E. G., Portugal L. A., dos Reis P. S., Souza A. S., dos Santos W. N. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods // *Analitica Chimica Acta*. – 2007. – Vol. 597. – № 2. – P. 179–186.
20. Куликова Н. А., Филиппова О. И., Зиганшина А. Р. Эффективность праймирования семян пшеницы наночастицами серебра: влияние продолжительности обработки и стабилизирующего агента // *Проблемы агрохимии и экологии* – 2021. – № 3–4. – С. 25–31.
21. Вальтер О. А., Пиневиц Л. М., Варасов Н.Н. Практикум по физиологии растений с основами биохимии. – Л.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1959. – 258 с.

22. Самофалова Л. А., Сафронова О. В. Методологические подходы к проращиванию семян сельскохозяйственных культур, тестирование успеха прорастания // *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2017. – №3(23). – С.68–74.
23. Бухаров А. Ф., Балеев Д. Н., Бухарова А. Р. Кинетика прорастания семян. Методы исследования и параметры // *Известия ТСХА* – 2017. – № 2. – С. 5–19.
24. Chernysheva M. G., Myasnikov I. Yu., Badun G. A., Matorin D. N., Gabbasova D. T., Konstantinov A. I., Korobkov V. I., Kulikova N. A. Humic substances alter the uptake and toxicity of nanodiamonds in wheat seedlings // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 1335–1346.
25. Малый практикум по физиологии растений. – М.: Издательство Московского университета, 1994. – С. 155–156.
26. Теппер Е. З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии: учебное пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2005. – 256 с.
27. ГОСТ 12044-93 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями – М.: Стандартинформ, 2011. – 57 с.
28. Практикум по агрохимии: Учеб. пособие – М.: Изд-во МГУ, 2001 – 689 с.
29. Погода и климат. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=27612> (дата обращения 22.11.2023).
30. Dubois M., Gilles K. A., Hamilton J., Robers P. A., Smith F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances // *Analytical Chemistry*. – 1956. – № 28. – P. 350–356.
31. Bajaj K. L., Kaur G. Spectrophotometric determination of L-ascorbic acid in vegetables and fruits // *Analyst*. – 1981. – № 106. – P. 117–120.
32. Lu Z., Liu L., Li X., Gong Y., Hou H., Zhu X., Yang J., Wang L. Analysis and evaluation of nutritional quality in chinese radish (*Raphanus sativus* L.) // *Agricultural Science of China*. – 2008. – № 7. – P. 823–830.
33. Sghayar S., Debez A., Lucchini G., Abruzzese A., Zorrig W., Negrini N., Morgutti S., Abdelly C., Sacchi G.A., Pecchioni N., Vaccino P. Seed priming mitigates high salinity impact on germination of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) by improving carbohydrate and protein mobilization // *Plant Direct*. – 2023. – Vol. 7, № 6. – e497.
34. Kanjevac M., Jakovljević D., Todorović M., Stanković M., Ćurčić S., Bojović B. Improvement of germination and early growth of radish (*Raphanus sativus* L.) through modulation of seed metabolic processes // *Plants (Basel)*. – 2022. – Vol. 11, № 6. – 757.

35. Рогожин В. В., Рогожина Т. В. Физиолого-биохимические механизмы прорастания зерновок пшеницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 8(82). – С. 17–21.
36. Панфилов А. Л., Абдрашитов Р. Р. Влияние температуры и влажности почвы на количество всходов яровой мягкой пшеницы при выращивании на склоновых землях Оренбургского Приуралья // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2019. – № 4. – С. 1–7.
37. Abdel C. G. Germination performance of four radish (*Rhapanus sativus* L. var *sativus*) seeds under varying temperatures // International Journal of Farming and Allied Sciences. – 2015. – Vol. 4, № 4. – P. 355–360.
38. Тиманн К. В., Дженн Р.К., Амен Р.Д. и др. Физиология и биохимия покоя и прорастания семян. – М.: Колос, 1982. – 495 с.
39. Mal D., Verma J., Levan A., Reddy M. R., Avinash A. V., Velaga P. K. Seed priming in vegetable crops: A review // International Journal of Current Microbiology and Applied Science – 2019. – Vol. 8, № 6. – P. 868–874.
40. Малкандуева А. Х., Шамурзаев Р. И., Малкандуев Х. А. Перезимовка озимой пшеницы в зависимости от приемов возделывания в условиях вертикальной зональности КБР // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2020. – № 6(98). – С. 173–180.
41. Bokhtiar S., Karim A., Hossain K. M., Hossain T., Egashira K. Response of radish to varying levels of irrigation water and fertilizer potassium on clay terrace soil of Bangladesh // Communication in Soil Science and Plant Analysis. – 2001. – № 32. – p. 2979–2991.
42. Kulikova N. A., Khusnetdinova T. I., Filippova O. I., Klein O. I. Priming with humic substances affects the field performance of radishes (*Raphanus Raphanistrum* subsp. *sativus* L. domin) in hot, dry conditions. – AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2817, № 1. – P. 1–6.
43. Locato V., Cimini S., Gara L. D. Strategies to increase vitamin C in plants: from plant defense perspective to food biofortification // Frontier in Plant Science. – 2013. – № 4. – Article Number 152.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках реализации этапа 2023 г. были проведены эксперименты, нацеленные на оптимизацию условий и оценку эффективности праймирования семян пшеницы и редиса гуминовыми веществами и наночастицами серебра в лабораторных и полевых условиях. Поставленные на 2023 г. задачи выполнены полностью, полученные результаты соответствуют мировому уровню. Установлено, что:

- диапазон оптимальных концентраций гуминовых веществ для праймирования составляет 0.5–1.0 г/л; оптимальная продолжительность не превышает 6 ч и ниже продолжительности стадии набухания семян, что связано, по-видимому, со стимулирующей активностью ГВ; наибольшая продолжительность праймирования необходима для достижения максимальных показателей энергии прорастания; оптимальная температура близка к оптимальной температуре прорастания культуры;

- диапазон оптимальных концентраций наночастиц серебра составляет 10.2–90.0 мг/л; оптимальная продолжительность близка к продолжительности стадии набухания семян, а оптимальная температура – к оптимальной температуре прорастания культуры; установлена обратная связь между оптимальной продолжительностью праймирования и ζ -потенциалом наночастиц;

- эпибрассинолиды стимулируют поступление воды при набухании семян ноготков ладьевидной и серповидной формы;

- праймирование семян пшеницы и редиса гуминовыми веществами и наночастицами серебра частично снимает водный стресс растений на стадии прорастания в лабораторных условиях;

- праймирование семян пшеницы гуминовыми веществами в условиях избыточного увлажнения увеличивает содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений лабораторных условиях, а при недостаточном увлажнении – уменьшает водный дефицит в листьях растений;

- праймирование семян пшеницы наночастицами серебра позволяет проводить эффективную поверхностную дезинфекцию семян, но слабо влияет на внутренние инфекции в лабораторных условиях;

- праймирование семян пшеницы наночастицами серебра способствует лучшей перезимовке растений в полевых условиях;

- показана неэффективность гуминовых веществ и наночастиц серебра как праймирующих агентов семян редиса в полевых условиях в случае использования праймирования как единственного приема смягчения стресса; высказано предположение, что при оценке потенциальных праймирующих агентов положительного эффекта от обработки семян можно ожидать, если эффект от этого приема в лабораторных условиях превышает 200%;

- показана меньшая отзывчивость семян редиса, по сравнению с семенами пшеницы, на праймирование гуминовыми веществами и наночастицами серебра как в оптимальных, так и в стрессовых условиях.

Рекомендации по конкретному использованию результатов НИР:

- при выборе условий праймирования в качестве оптимизируемого показателя следует использовать показатель «энергия всхожести»;

– перспективными праймирующими агентами являются, вещества, эффект от которых в лабораторных условиях превышает 200%.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2023 году
Таблица А.1

Источник финансирования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные средства в виде субсидии на выполнение фундаментальных научных исследований в соответствии с госзаданием МГУ, часть 2 (р. 01 10)	17 237 148,76	17 237 148,76

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 – Свойства использованных в работе наночастиц серебра ($\pm$ – стандартное отклонение, $n = 3$)

Название	Стабилизирующий агент	Диаметр, нм	ζ -потенциал, мВ
AgНЧ-КМЦ	Карбоксиметилцеллюлоза	5.4 ± 0.5	$-(9.3 \pm 0.2)$
AgНЧ-ОЛЕ	Олеат натрия	10.3 ± 0.6	$-(15.3 \pm 0.6)$
AgНЧ-ПВП	Поливинилпирролидон	7.9 ± 0.2	$-(18.7 \pm 0.3)$
AgНЧ-ДДС	Додецилсульфат натрия	4.1 ± 0.4	$-(17.1 \pm 0.5)$
AgНЧ-ТВИ	Твин-80	2.6 ± 0.9	$-(19.1 \pm 0.5)$

Таблица Б2 – Морфологические признаки семян разных фракций ноготков лекарственных сорта Кальта

Фракция семян	Характеристика и размер семян
Серповидные	Сильно изогнутые, напоминают форму серпа, бугорчатые, по внешнему краю имеют шиповатые выросты, лишенные «крыльев». Бурые и светло-бурые. Длина семянки 18–30 мм
Ладьевидные	Имеют сильно развитые боковые крылья и наружный киль «ладьи», с острым бугорком на спинке по внешнему краю, шиповатые выросты развиты слабо или почти отсутствуют. Светло-бурые и бурые. Длина семянки 11–20 мм
Крючковидные	Сильно согнутые, по форме напоминают кольцо, имеют шиповатые выросты маленькие в виде бугорков, не имеют ни крыльев. Коричневые и темно-коричневые до с оттенком черного цвета. Длина семянки 4–11 мм

Таблица Б3 – Матрица проведения экспериментов методики с использованием планирования эксперимента Бокса-Бенкена

Порядок выполнения	Стандартный порядок	X1	X2	X3
6	1	-1	-1	0
13	2	1	1	0
11	3	-1	-1	0
5	4	1	1	0
10	5	-1	0	-1
1	6	1	0	1
8	7	-1	0	-1
4	8	1	0	1
9	9	0	-1	-1
3	10	0	1	1
14	11	0	-1	-1
12	12	0	1	1
2	13	0	0	0
15	14	0	0	0
7	15	0	0	0

Таблица Б4 – Матрица проведения экспериментов с использованием планирования эксперимента Бокса-Бенкена

Препарат	Культура	Значения факторов (–1 / 0 / +1)		
		Концентрация, г/л	Продолжительность, ч	Температура, С°
Powhumus	Редис «Софит»	0.5 / 1.25 / 2	2 / 4 / 6	+13 / +19 / +25
Сахалинский	Редис «Софит»	0.1 / 0.55 / 1.0	1 / 3 / 5	+14 / +19 / +24
Сахалинский	Пшеница «Иволга»	0.1 / 0.55 / 1.0	1 / 5.5 / 10	+15 / +19 / +24
Лигноумат	Редис «Софит»	0.1 / 0.55 / 1.0	0.5 / 2.25 / 4	+7 / +17 / +27
AgHЧ-КМЦ	Редис «Французский завтрак»	0.01 / 0.03 / 0.05	6 / 15 / 24	+9 / +16 / +23
AgHЧ-ОЛЕ	Редис «Французский завтрак»	0.01 / 0.03 / 0.05	6 / 15 / 24	+4 / +14 / +24
AgHЧ-ПВП	Редис «Французский завтрак»	0.01 / 0.03 / 0.05	6 / 15 / 24	+4 / +14 / +24
AgHЧ-ДДС	Редис «Французский завтрак»	0.01 / 0.03 / 0.05	6 / 15 / 24	+4 / +14 / +24

Таблица Б5 – Состав использованных питательных сред

Чапека-Докса		Среда L (Лурия)	
Компонент	г/л	Компонент	г/л
Сахароза	30	Дрожжевой экстракт	5
KH ₂ PO ₄	1	Пептон	15
MgSO ₄ ×7H ₂ O	0.5	NaCl	5
KCl	0.5	Агар	15
FeSO ₄ ×7H ₂ O	0.01		
NaNO ₃	2		
Агар	15		

Таблица Б6 – Значения оптимизированных условий праймирования семян пшеницы ГВ

Препарат	Концентрация, г/л	Продолжительность, ч	Температура, С°	Значение при оптимальных параметрах
ИЖ, % от контроля				
«Сахалинский»	1.0	3.9	19.4	558
Длина побегов, % от контроля				
«Сахалинский»	0.9	5.0	19.4	455
Длина корней, % от контроля				
«Сахалинский»	1.0	1.0	19.4	493
Энергия прорастания, %				
«Сахалинский»	1.0	5.5	14.8	90

Таблица Б7 – Значения оптимизированных условий праймирования семян редиса ГВ

Препарат	Концентрация, г/л	Продолжительность, ч	Температура, С°	Значение при оптимальных параметрах
ИЖ, % от контроля				
Powhumus	1.5	6.0	25.0	160
Лигногумат	0.1	4.0	27.0	131
«Сахалинский»	0.8	1.3	22.6	177
Длина побегов, % от контроля				
Powhumus	2.0	6.0	25.0	146
Лигногумат	0.1	4.0	22.7	129
«Сахалинский»	1.0	1.0	23.0	129
Длина корней, % от контроля				
Powhumus	2.0	6.0	25.0	186
Лигногумат	0.1	0.5	27.0	127
«Сахалинский»	0.8	1.3	22.6	190
Энергия прорастания, %				
Powhumus	2.0	6.0	19.0	96
Лигногумат	0.2	2.4	23.8	100
«Сахалинский»	0.5	2.5	20.8	100

Таблица Б8 – Значения оптимизированных условий праймирования семян пшеницы Ag-НЧ

Препарат	Концентрация, мг/л	Продолжительность, ч	Температура, С°	Значение при оптимальных параметрах
ИЖ, % от контроля				
AgНЧ-КМЦ	49.9	13.2	16.2	217
AgНЧ-ОЛЕ	48.2	12.7	16.4	226
AgНЧ-ПВП	50.0	14.2	15.7	216
AgНЧ-ДДС	49.9	12.9	16.0	214
AgНЧ-ТВИ	33.6	11.6	16.6	198
Длина побегов, % от контроля				
AgНЧ-КМЦ	50.0	13.2	15.9	208
AgНЧ-ОЛЕ	49.9	14.2	15.8	220
AgНЧ-ПВП	50.0	14.2	15.8	212
AgНЧ-ДДС	49.9	13.5	16.0	217
AgНЧ-ТВИ	18.6	12.1	16.0	204
Длина корней, % от контроля				
AgНЧ-КМЦ	49.9	13.9	16.3	223
AgНЧ-ОЛЕ	50.0	14.6	15.9	223
AgНЧ-ПВП	49.9	15.1	15.9	209
AgНЧ-ДДС	49.9	13.8	17.6	214
AgНЧ-ТВИ	30.1	13.2	16.3	213
Энергия прорастания, %				
AgНЧ-КМЦ	38.8	12.9	15.2	94
AgНЧ-ОЛЕ	33.9	10.9	15.7	100
AgНЧ-ПВП	42.2	14.6	13.5	96
AgНЧ-ДДС	10.2	9.0	14.5	96
AgНЧ-ТВИ	48.9	11.4	15.4	92

Таблица Б9 – Значения оптимизированных условий праймирования семян редиса Ag-НЧ

Препарат	Концентрация, мг/л	Продолжительность, ч	Температура, С°	Значение при оптимальных параметрах
ИЖ, % от контроля				
AgНЧ-КМЦ	90.0	7.9	23.9	140
Длина побегов, % от контроля				
AgНЧ-КМЦ	89.4	7.9	23.9	129
Длина корней, % от контроля				
AgНЧ-КМЦ	89.9	7.9	24.0	136
Энергия прорастания, %				
AgНЧ-КМЦ	89.9	7.9	21.2	99

Таблица Б10 – Влияние препаратов Эпин-экстра и Гумистим на скорость набухания плодов ноготков лекарственных разной формы

Вариант	Форма семян	Исходный вес, г	Масса семян после набухания, г					
			1 ч	2 ч	3 ч	4 ч	5 ч	24 ч
Контроль (вода)	Ладьевидные	0.22	0.56	0.63	0.65	0.68	0.68	0.78
	Серповидные	0.21	0.47	0.52	0.55	0.57	0.58	0.70
	Крючковидные	0.21	0.42	0.44	0.49	0.51	0.56	0.64
Эпин-экстра	Ладьевидные	0.24	0.63	0.72	0.76	0.81	0.83	0.97
	Серповидные	0.20	0.46	0.52	0.56	0.60	0.61	0.76
	Крючковидные	0.21	0.45	0.48	0.50	0.53	0.54	0.59
Гумистим	Ладьевидные	0.20	0.45	0.48	0.54	0.59	0.62	0.68
	Серповидные	0.22	0.44	0.50	0.53	0.58	0.60	0.73
	Крючковидные	0.23	0.41	0.44	0.48	0.50	0.52	0.56

Таблица Б11 – Влияние ГВ как праймирующих агентов на параметры прорастания пшеницы в условиях водного дефицита ($\pm$ – стандартное отклонение, $n = 5$; нз – различия не значимы)

Вариант	Энергия прорастания, %	Длина корней, мм	Длина побегов, мм	ИЖ, % от контроля
Оптимальные условия (проращивание в дистиллированной воде)				
Контроль	78 $\pm$ 15	10.7 $\pm$ 4.0	10.7 $\pm$ 2.5	100
Условия водного дефицита (проращивание в растворе ПЭГ6000)				
Контроль	78 $\pm$ 8	12.1 $\pm$ 3.8	7.2 $\pm$ 2.2	97
ГП	82 $\pm$ 16	14.9 $\pm$ 6.2	8.1 $\pm$ 2.5	136
ГВ0.5	84 $\pm$ 9	14.1 $\pm$ 3.8	8.8 $\pm$ 0.8	135
ГВ1.0	82 $\pm$ 13	17.1 $\pm$ 6.8	10.1 $\pm$ 1.5	141
ГВ1.5	80 $\pm$ 7	16.5 $\pm$ 2.4	10.7 $\pm$ 0.8	166
ГВ2.0	84 $\pm$ 15	17.2 $\pm$ 5.2	11.2 $\pm$ 1.8	179
ГВ2.5	80 $\pm$ 12	19.3 $\pm$ 9.7	11.3 $\pm$ 3.0	145
НСР0.05	нз	нз	2.7	нз

Таблица Б12 – Влияние ГВ как праймирующих агентов на параметры прорастания редиса в условиях водного дефицита ($\pm$ – стандартное отклонение, $n = 5$; нз – различия не значимы)

Вариант	Энергия прорастания, %	Длина корней, мм	Длина побегов, мм	ИЖ, % от контроля
Оптимальные условия (проращивание в дистиллированной воде)				
Контроль	95 $\pm$ 5	8.7 $\pm$ 3.4	6.2 $\pm$ 0.9	100
Условия водного дефицита (проращивание в растворе ПЭГ6000)				
Контроль	100 $\pm$ 0	8.4 $\pm$ 0.9	5.6 $\pm$ 0.7	101
ГП	98 $\pm$ 5	7.4 $\pm$ 2.4	5.3 $\pm$ 0.8	89
ГВ0.5	88 $\pm$ 10	6.2 $\pm$ 3.3	4.5 $\pm$ 1.2	60
НСР0.05	8	нз	1.2	нз

Таблица Б13 – Влияние праймирования AgНЧ на параметры прорастания семян пшеницы в условиях водного стресса ($\pm$ – стандартное отклонение, $n = 5$; нз – различия не значимы)

Вариант	Энергия прорастания, %	Длина корней, мм	Длина побегов, мм	ИЖ, % от контроля
Оптимальные условия				
Контроль	76 $\pm$ 5	8 $\pm$ 6	10 $\pm$ 4	100
Условия водного дефицита				
Контроль	80 $\pm$ 10	7 $\pm$ 2	4 $\pm$ 1	70
ГП	76 $\pm$ 18	11 $\pm$ 4	7 $\pm$ 2	112
AgНЧ-КМЦ	84 $\pm$ 11	13 $\pm$ 4	8 $\pm$ 1	146
AgНЧ-ОЛЕ	76 $\pm$ 18	11 $\pm$ 3	7 $\pm$ 2	103
AgНЧ-ПВП	82 $\pm$ 8	11 $\pm$ 3	7 $\pm$ 3	112
AgНЧ-ДДС	82 $\pm$ 18	6 $\pm$ 2	5 $\pm$ 1	65
AgНЧ-ТВИ	84 $\pm$ 9	8 $\pm$ 2	5 $\pm$ 1	93
НСР0.05	нз	4.6	2.7	нз

Таблица Б14 – Влияние праймирования AgНЧ на параметры прорастания семян редиса в условиях водного стресса ($\pm$ – стандартное отклонение, $n = 5$; нз – различия не значимы)

Вариант	Энергия прорастания, %	Длина корней, мм	Длина побегов, мм	ИЖ, % от контроля
Оптимальные условия				
Контроль	96 $\pm$ 5	25.4 $\pm$ 4.3	7.0 $\pm$ 1.6	100
Условия водного дефицита				
Контроль	86 $\pm$ 11	7.7 $\pm$ 2.5	3.0 $\pm$ 1.1	30
ГП	80 $\pm$ 10	14.3 $\pm$ 1.9	4.7 $\pm$ 0.5	49
AgНЧ-КМЦ	82 $\pm$ 11	13.1 $\pm$ 1.8	4.4 $\pm$ 1.4	47
НСР0.05	нз	4.8	1.6	16

Таблица Б15 – Влияние ГВ как праймирующих агентов на параметры появления всходов пшеницы при различных уровнях почвенной влажности ($\pm$ – стандартное отклонение, n = 5; * указан НСР0.10; нз – различия не значимы)

Тип обработки	Энергия прорастания, %	Итоговая всхожесть, %	СВП, сут.	Коэффициент вариации СВП, %
Избыточное увлажнение (100% НВ)				
Контроль	4 $\pm$ 8	20 $\pm$ 20	4.7 $\pm$ 2.1	44.6
ГП	44 $\pm$ 26	80 $\pm$ 14	4.0 $\pm$ 1.2	28.8
ГВ2.0	24 $\pm$ 8	64 $\pm$ 22	4.6 $\pm$ 0.9	20.4
НСР0.05	23	26	нз	нз
Оптимальное увлажнение (70% НВ)				
Контроль	40 $\pm$ 24	72 $\pm$ 10	4.6 $\pm$ 1.7	34.3
ГП	56 $\pm$ 16	92 $\pm$ 10	4.0 $\pm$ 0.4	16.0
ГВ2.0	56 $\pm$ 16	84 $\pm$ 16	3.6 $\pm$ 0.8	21.1
НСР0.05	нз	15*	нз	нз
Недостаточное увлажнение (40% НВ)				
Контроль	16 $\pm$ 26	96 $\pm$ 8	4.7 $\pm$ 0.9	20.0
ГП	24 $\pm$ 18	80 $\pm$ 20	5.0 $\pm$ 1.3	25.7
ГВ2.0	52 $\pm$ 30	100 $\pm$ 0	4.0 $\pm$ 0.7	18.3
НСР0.05	28*	14*	нз	нз

Таблица Б16 – Влияние ГВ как праймирующих агентов на максимальную относительную скорость электронного транспорта, коэффициент использования света в условиях ограниченной освещенности и содержание пигментов в листьях пшеницы при различных уровнях почвенной влажности ($\pm$ – стандартное отклонение, n = 5; нз – различия не значимы)

Вариант	rETRmax, %	α	Каротиноиды, мг/г	Хлорофилл a, мг/г	Хлорофилл b, мг/г
Избыточное увлажнение (100% НВ)					
Контроль	31.21 $\pm$ 3.46	0.25 $\pm$ 0.05	0.34 $\pm$ 0.06	0.64 $\pm$ 0.13	0.25 $\pm$ 0.05
ГП	29.18 $\pm$ 8.10	0.18 $\pm$ 0.03	0.57 $\pm$ 0.08	0.97 $\pm$ 0.13	0.36 $\pm$ 0.05
ГВ2.0	26.91 $\pm$ 3.15	0.15 $\pm$ 0.03	0.48 $\pm$ 0.08	0.83 $\pm$ 0.09	0.30 $\pm$ 0.02
НСР0.05	нз	0.05	0.11	0.16	0.06
Оптимальное увлажнение (70% НВ)					
Контроль	26.78 $\pm$ 6.70	0.16 $\pm$ 0.02	0.43 $\pm$ 0.16	0.74 $\pm$ 0.45	0.30 $\pm$ 0.17
ГП	30.01 $\pm$ 6.83	0.16 $\pm$ 0.04	0.49 $\pm$ 0.10	0.92 $\pm$ 0.06	0.35 $\pm$ 0.02
ГВ2.0	31.46 $\pm$ 4.63	0.15 $\pm$ 0.01	0.54 $\pm$ 0.04	0.97 $\pm$ 0.06	0.36 $\pm$ 0.02
НСР0.05	нз	нз	нз	нз	нз
Недостаточное увлажнение (40% НВ)					
Контроль	14.79 $\pm$ 3.57	0.28 $\pm$ 0.06	0.58 $\pm$ 0.13	1.07 $\pm$ 0.21	0.39 $\pm$ 0.08
ГП	25.44 $\pm$ 8.19	0.21 $\pm$ 0.06	0.75 $\pm$ 0.39	1.35 $\pm$ 0.70	0.50 $\pm$ 0.27
ГВ2.0	18.08 $\pm$ 3.66	0.25 $\pm$ 0.06	0.60 $\pm$ 0.13	1.12 $\pm$ 0.27	0.41 $\pm$ 0.10
НСР0.05	нз	нз	нз	нз	нз

Таблица Б17 – Влияние ГВ как праймирующих агентов на длину, массу и водный дефицит в листьях пшеницы при различных уровнях почвенной влажности ($\pm$ – стандартное отклонение, $n = 5$; * указан НСР0.10; нз – различия не значимы)

Вариант	Водный дефицит, %	Длина, см	Масса 1 растения, г	Масса надземной биомассы, г
Избыточное увлажнение (100 % НВ)				
Контроль	13 $\pm$ 7	28.0 $\pm$ 7.7	0.22 $\pm$ 0.05	0.36 $\pm$ 0.11
ГП	14 $\pm$ 3	24.3 $\pm$ 8.4	0.16 $\pm$ 0.05	0.67 $\pm$ 0.25
ГВ2.0	12 $\pm$ 5	22.4 $\pm$ 9.6	0.15 $\pm$ 0.05	0.49 $\pm$ 0.22
НСР0.05	нз	нз	нз	нз
Оптимальное увлажнение (70 % НВ)				
Контроль	14 $\pm$ 4	25.4 $\pm$ 5.2	0.18 $\pm$ 0.03	0.63 $\pm$ 0.13
ГП	15 $\pm$ 4	25.2 $\pm$ 7.2	0.17 $\pm$ 0.03	0.81 $\pm$ 0.20
ГВ2.0	20 $\pm$ 4	25.8 $\pm$ 6.0	0.17 $\pm$ 0.01	0.72 $\pm$ 0.11
НСР0.05	4.6	нз	нз	нз
Недостаточное увлажнение (40 % НВ)				
Контроль	30 $\pm$ 7	17.6 $\pm$ 4.3	0.10 $\pm$ 0.02	0.47 $\pm$ 0.15
ГП	17 $\pm$ 6	15.1 $\pm$ 7.3	0.09 $\pm$ 0.02	0.34 $\pm$ 0.10
ГВ2.0	21 $\pm$ 4	19.7 $\pm$ 3.9	0.11 $\pm$ 0.01	0.57 $\pm$ 0.07
НСР0.05	8.0*	нз	нз	0.15*

Таблица Б18 – Влияние праймирования семян пшеницы AgНЧ на содержание микроорганизмов в смывах с семян

Вариант	Содержание микроорганизмов в смывах с семян пшеницы, КОЕ/мл	
	Среда Лурия	Среда Чапека-Докса
Контроль	1.4 $\times$ 10 ⁴	1.1 $\times$ 10 ³
H ₂ O ₂	3.0 $\times$ 10 ²	45
AgНЧ-КМЦ	5.0 $\times$ 10 ³	3.3 $\times$ 10 ²
AgНЧ-ОЛЕ	4.8 $\times$ 10 ³	2.3 $\times$ 10 ²
AgНЧ-ПВП	3.1 $\times$ 10 ³	1.6 $\times$ 10 ²
AgНЧ-ДДС	1.1 $\times$ 10 ³	45
AgНЧ-ТВИ	2.5 $\times$ 10 ³	3.0 $\times$ 10 ²

Таблица Б19 – Влияние праймирования семян пшеницы AgНЧ на зараженность семян ($\pm$ – стандартное отклонение, n = 5; * – значимое отличие от контроля при $p < 0.05$)

Вариант	Количество зараженных семян, %	Длина побегов, мм	Длина корней, мм
Контроль	18	17 $\pm$ 3	41 $\pm$ 4
H ₂ O ₂	18	10* $\pm$ 2	24* $\pm$ 4
AgНЧ-КМЦ	10	19 $\pm$ 7	43 $\pm$ 15
AgНЧ-ОЛЕ	12	19 $\pm$ 3	42 $\pm$ 6
AgНЧ-ПВП	20	18 $\pm$ 4	40 $\pm$ 4
AgНЧ-ДДС	6	19 $\pm$ 7	43 $\pm$ 11
AgНЧ-ТВИ	10	23 $\pm$ 7	53 $\pm$ 9

Таблица Б20 – Влияние праймирования семян пшеницы AgНЧ-КМЦ на зараженность семян ($\pm$ – стандартное отклонение, n = 4; * – значимое отличие от контроля при $p < 0.05$)

Вариант	Количество зараженных семян, %	Длина побегов, мм	Длина корней, мм
Контроль	97	65 $\pm$ 8	99 $\pm$ 10
H ₂ O ₂	93	58* $\pm$ 3	93* $\pm$ 4
AgНЧ-КМЦ	90*	66 $\pm$ 2	105* $\pm$ 3

Таблица Б21 – Влияние праймирования семян редиса гуминовыми веществами на показатели величины и качества урожая в полевых условиях ($\pm$ – стандартное отклонение, n = 6)

Вариант	Полевая всхожесть, %	Средний вес одного корнеплода, г	Урожайность, кг/м ²	Сухое вещество, %	Сахара, %	Витамин С, %
Эксперимент 1						
Контроль	83 $\pm$ 1	7.6 $\pm$ 0.5	0.6 $\pm$ 0.1	5.26 $\pm$ 0.43	2.04 $\pm$ 0.36	0.035 $\pm$ 0.005
ГП	70 $\pm$ 8	8.0 $\pm$ 1.7	0.6 $\pm$ 0.2	5.31 $\pm$ 0.28	1.85 $\pm$ 0.38	0.030 $\pm$ 0.003
Сахалинский	69 $\pm$ 6	6.8 $\pm$ 1.0	0.4 $\pm$ 0.1	5.44 $\pm$ 0.23	2.04 $\pm$ 0.53	0.023 $\pm$ 0.004
НСР0.05	10	нз	нз	нз	нз	0.003
Эксперимент 2						
Контроль	83 $\pm$ 4	16.7 $\pm$ 1.3	1.5 $\pm$ 0.6	5.19 $\pm$ 0.47	1.92 $\pm$ 0.32	0.029 $\pm$ 0.002
ГП	73 $\pm$ 13	17.0 $\pm$ 1.9	1.3 $\pm$ 0.4	5.10 $\pm$ 0.41	1.94 $\pm$ 0.21	0.026 $\pm$ 0.003
Сахалинский	72 $\pm$ 2	15.9 $\pm$ 2.6	1.2 $\pm$ 0.2	5.0 $\pm$ 0.34	2.38 $\pm$ 0.30	0.032 $\pm$ 0.012
НСР0.05	нз	нз	нз	нз	0.24	0.003

Таблица Б22 – Влияние праймирования семян редиса AgНЧ-КМЦ на показатели величины и качества урожая в полевых условиях ($\pm$ – стандартное отклонение, n = 6)

Вариант	Полевая всхожесть, %	Средний вес одного корнеплода, г	Урожайность, кг/м ²	Сухое вещество, %	Сахара, %	Витамин С, %
Эксперимент 3						
Контроль	81 $\pm$ 8	9.7 $\pm$ 3.2	0.8 $\pm$ 0.4	4.65 $\pm$ 0.25	1.70 $\pm$ 0.25	0.098 $\pm$ 0.004
ГП	71 $\pm$ 9	10.2 $\pm$ 2.0	0.7 $\pm$ 0.3	4.62 $\pm$ 0.32	1.71 $\pm$ 0.37	0.101 $\pm$ 0.008
AgНЧ- КМЦ	78 $\pm$ 8	10.0 $\pm$ 2.7	0.8 $\pm$ 0.2	4.83 $\pm$ 0.29	1.13 $\pm$ 0.34	0.057 $\pm$ 0.028
НСР0.05	нз	нз	нз	нз	0.27	0.014
Эксперимент 4						
Контроль	32 $\pm$ 9	0.5 $\pm$ 0.4	0.02 $\pm$ 0.02	5.68 $\pm$ 0.31	2.71 $\pm$ 0.68	0.035 $\pm$ 0.001
ГП	27 $\pm$ 7	0.9 $\pm$ 0.9	0.03 $\pm$ 0.03	6.08 $\pm$ 0.13	3.01 $\pm$ 1.19	0.035 $\pm$ 0.001
AgНЧ- КМЦ	28 $\pm$ 5	0.8 $\pm$ 0.8	0.03 $\pm$ 0.04	5.43 $\pm$ 0.18	3.33 $\pm$ 0.44	0.033 $\pm$ 0.001
НСР0.05	нз	нз	нз	нз	нз	0.002

ПРИЛОЖЕНИЕ В

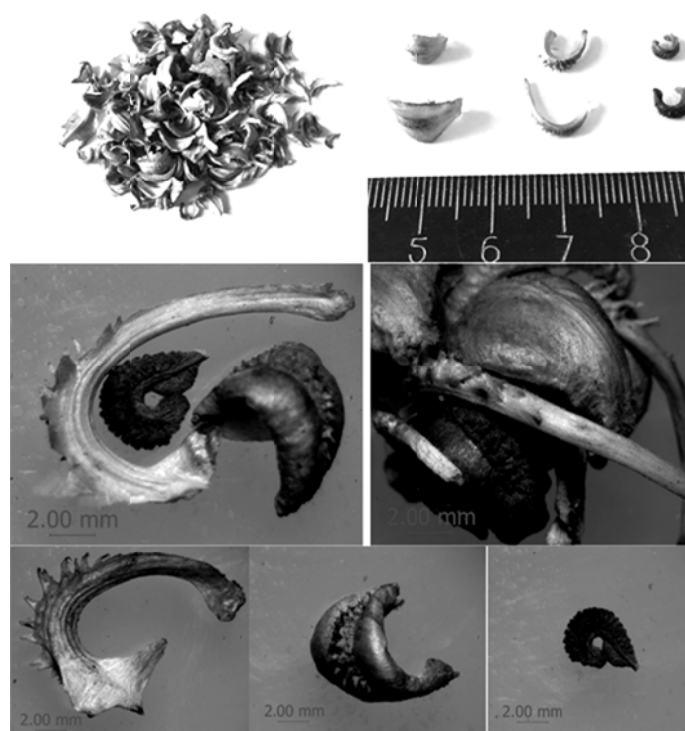


Рисунок В1 – Семена календулы сорта Кальта разных фракций (слева направо):
серповидные, лодьевидные, крючковидные

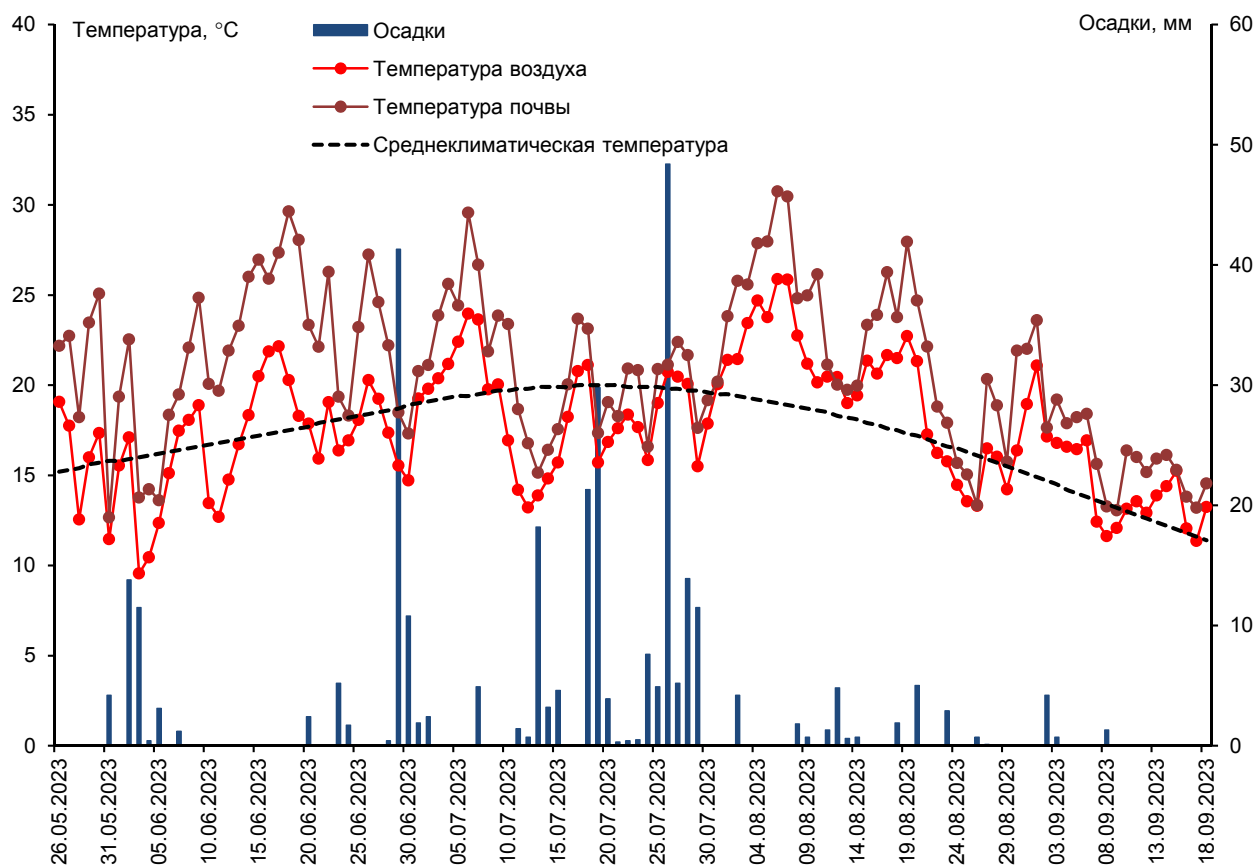


Рисунок В2 – Основные погодные условия проведения мелкодекадных экспериментов. Данные о температуре и осадках были любезно предоставлены сотрудниками метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. Среднеклиматическая температура рассчитана на основе данных с 1881 г. по 2023 г., предоставленных справочно-информационным порталом «Погода и климат» [29].

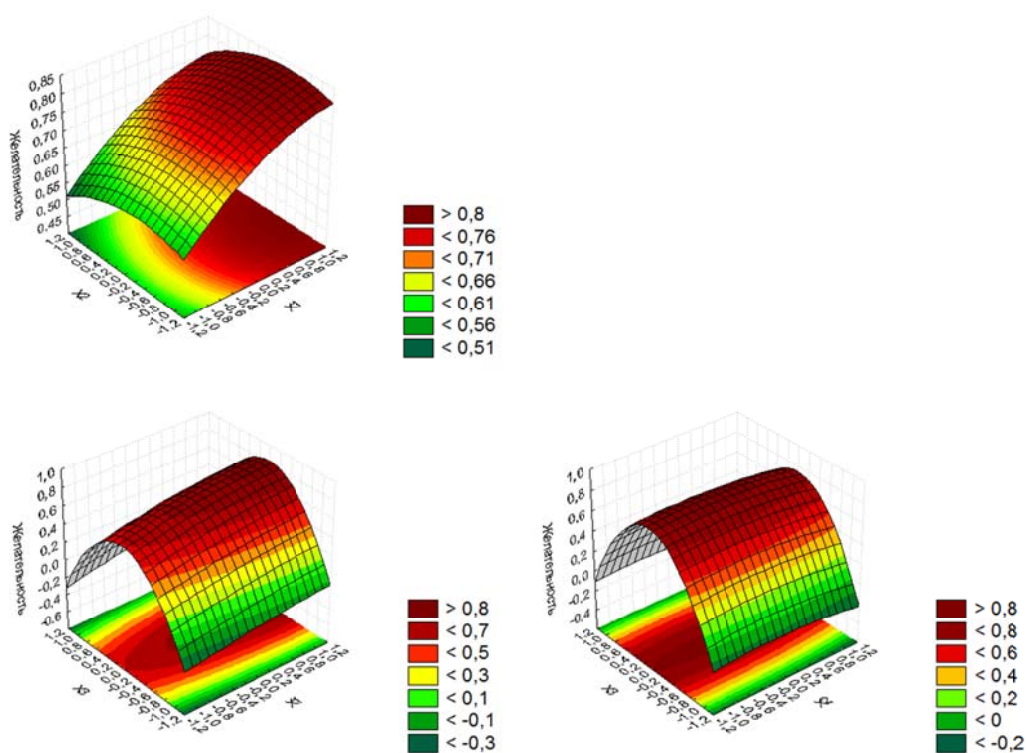


Рисунок В3 – Зависимость отклика ИЖ (желательность) от параметров праймирования: концентрации (параметр X1), продолжительности (параметр X2) и температуры (X3)

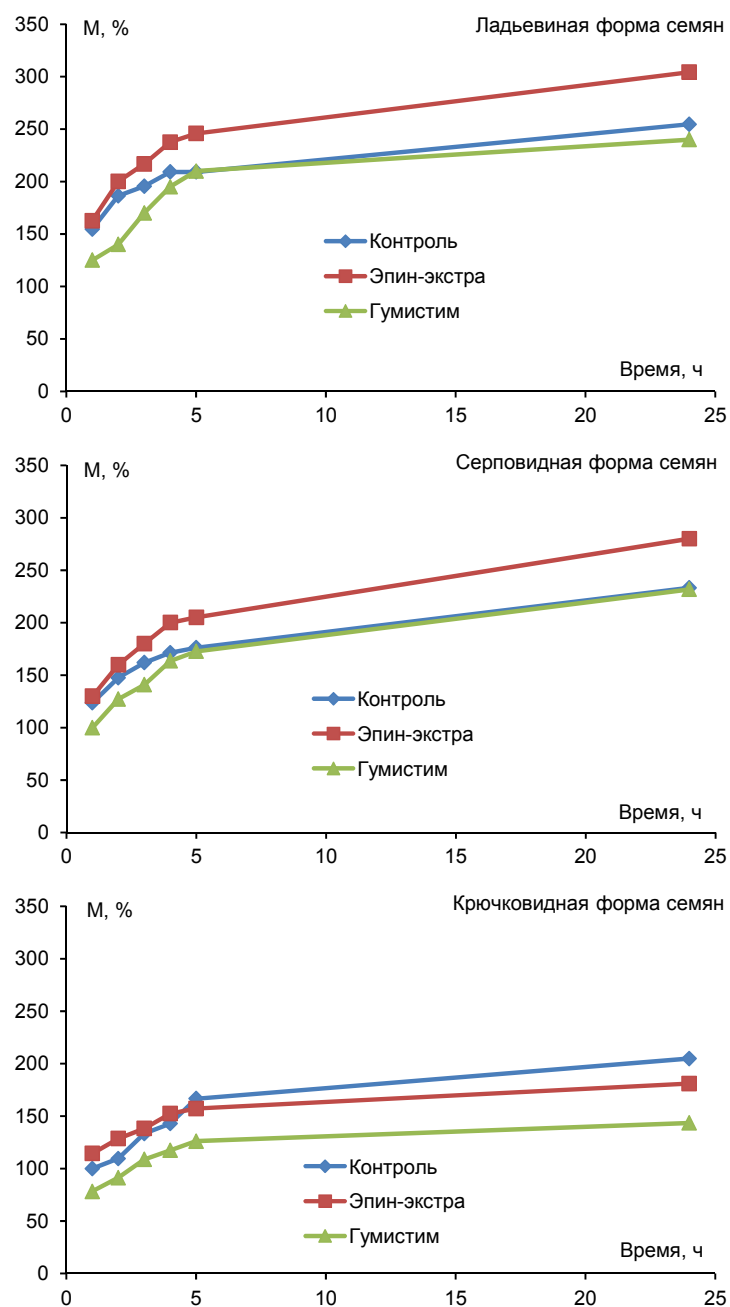


Рисунок В4 – Влияние препаратов Эпин-экстра и Гумистим на динамику набухания плодов разной формы ноготков лекарственных

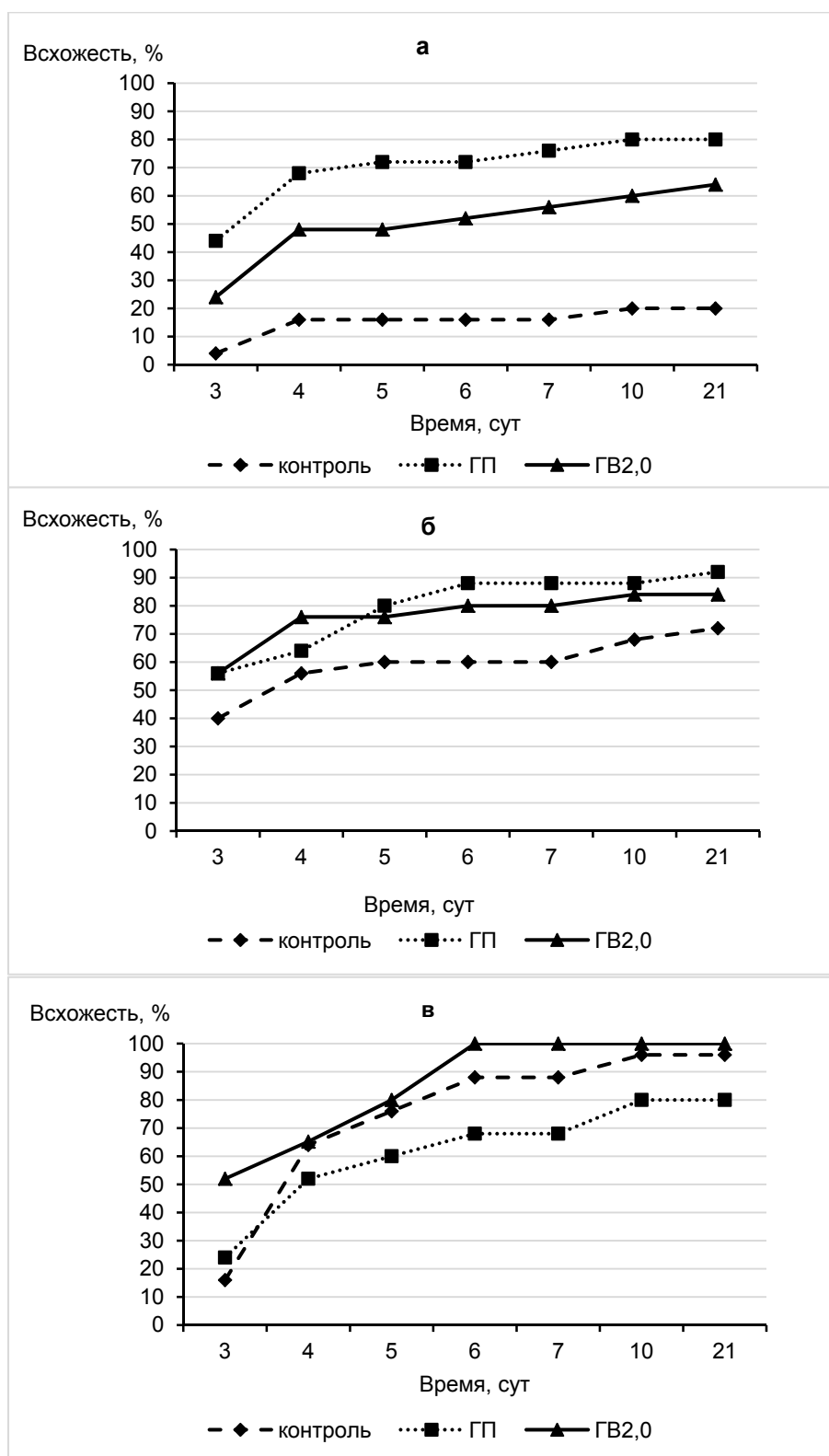


Рисунок В5 – Динамика появления всходов пшеницы при избыточном (а), оптимальном (б) и недостаточном (в) увлажнении



Рисунок В6 – Общий вид семян после 7-дневного проращивания в рулонах фильтровальной бумаги. Согласно [27] ярко-малиновый цвет является признаком фузариоза, темно-серый цвет – альтернариоза, желто-коричневые оттенки – корневых гнилей

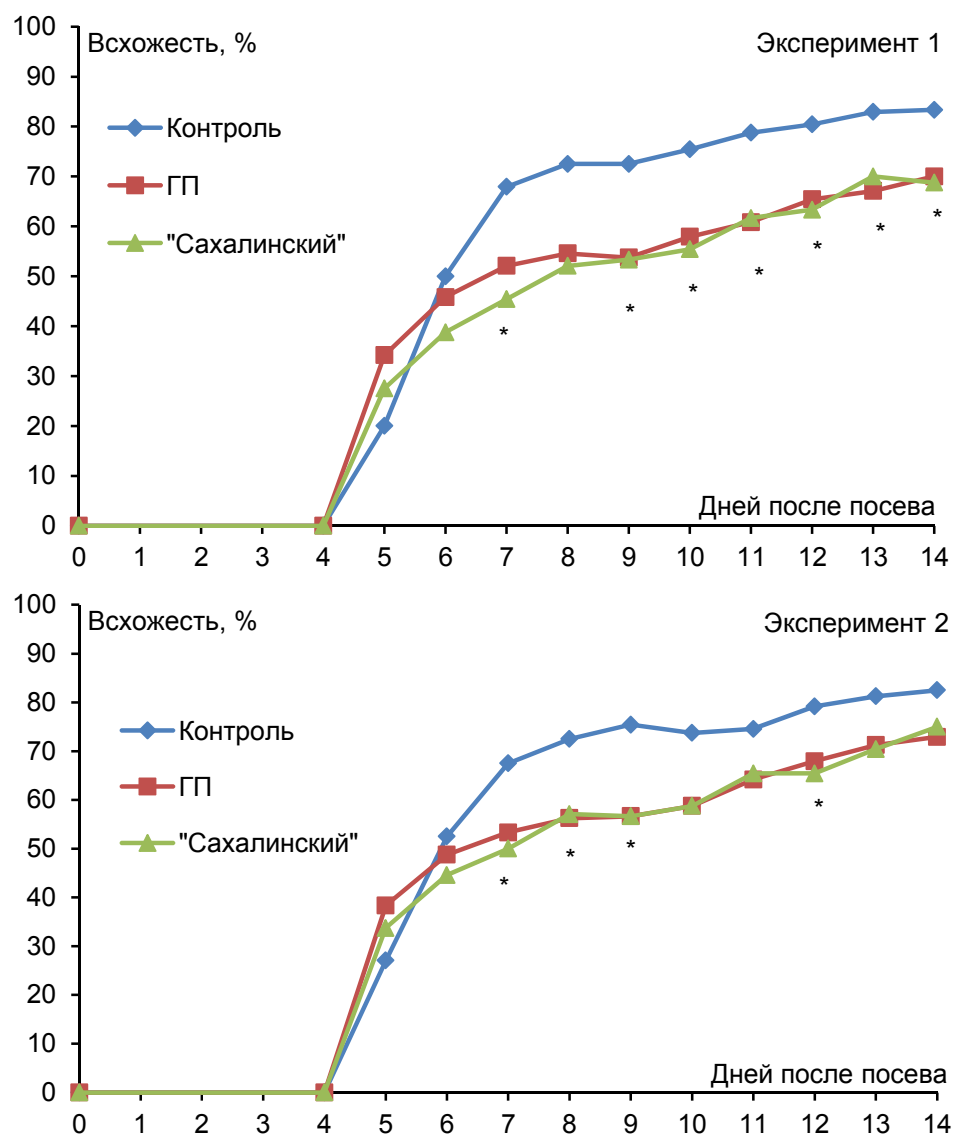


Рисунок В7 – Влияние праймирования семян редиса ГВ на появление всходов редиса в условиях мелкоделяночного эксперимента. * – значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

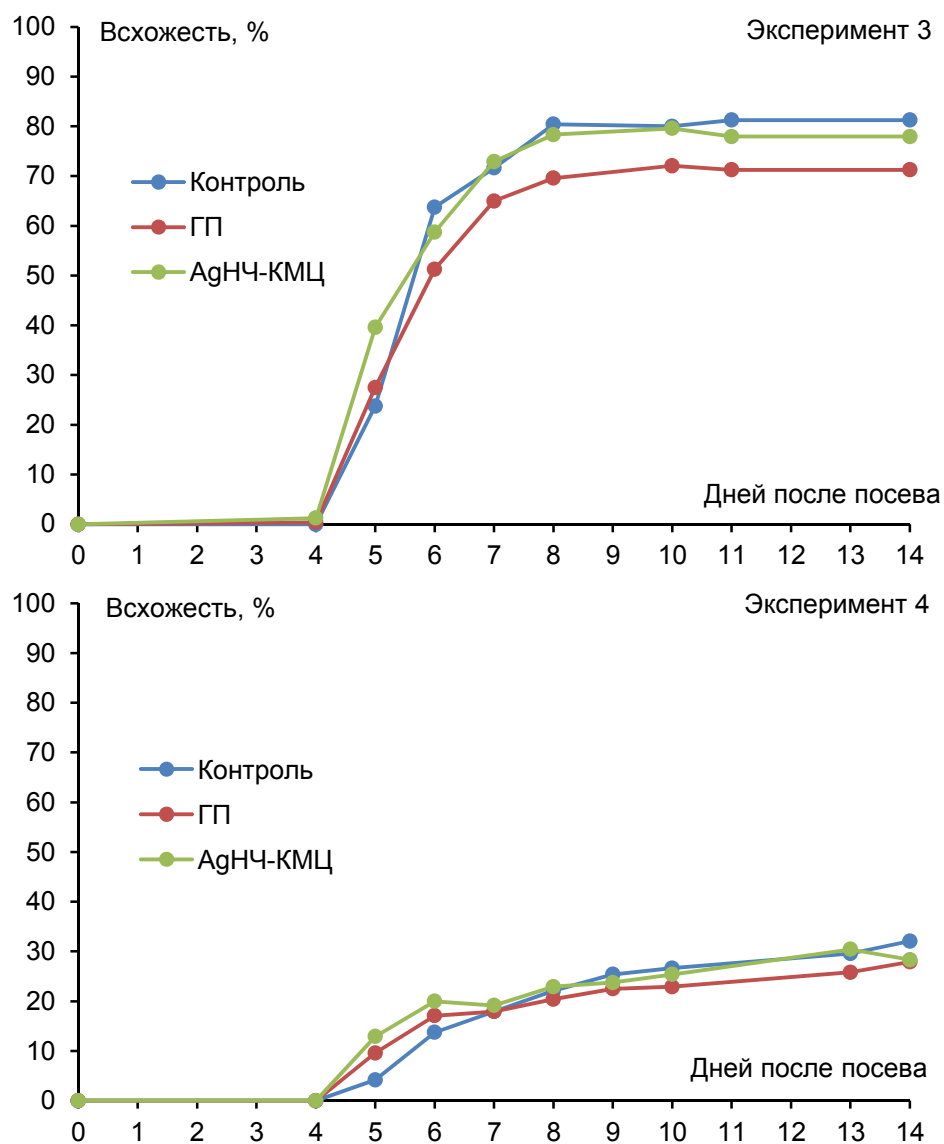


Рисунок В8 – Влияние праймирования семян редиса AgNCH-KMЦ на появление всходов редиса в условиях мелкоделяночного эксперимента