

УДК 58.084.1:58.039/.036.5:631.53.011.2/.3:582.736

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН САЛАТА ЛАТУКА ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ И КРИОЖИДКОСТЯМИ НА ПРОРАСТАНИЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕЕ РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

© 2024 г. Н. А. Кругликов<sup>1, 3, \*</sup>, А. Г. Быструшкин<sup>2</sup>, И. В. Кочев<sup>1</sup>,  
С. Д. Процев<sup>1, 3</sup>, Д. А. Крылова<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений», Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

\*E-mail: nick@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 02.05.2024

После доработки 13.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Показано, что обработка гидростатическим давлением 10 МПа в течение 5 мин стимулирует ускоренное прорастание семян салата латука. Обработка жидким кислородом в течение суток оказывает угнетающее воздействие на семена. Обработка в жидком аргоне той же длительности напротив стимулирует прорастание семян. Временная задержка между обработкой семян и началом проращивания оказывает негативное воздействие на их посевные качества. Повышение температуры хранения семян усиливает этот эффект.

**Ключевые слова:** салат латук, семена, предпосевная обработка, барообработка, криообработка, гидростатическое давление, сжиженные газы, криостат, гидростат

DOI: 10.31857/S0367676524090123, EDN: ODGCXE

### ВВЕДЕНИЕ

Предпосевная подготовка семян проводится с целью улучшения их посевных качеств. Для этого семена подвергают различным физико-химическим воздействиям. Устройства и методики, используемые в таких случаях, часто технологически сложны и основаны на самых передовых достижениях физики и техники [1–3]. Таким образом, для подбора методики и режима обработки семян требуются специальные исследования. Это связано как с объектом исследования – живыми организмами, обладающими большим количеством биологических особенностей, индивидуальной и групповой изменчивостью различных признаков и свойств, так и с минимизацией побочных последствий физических воздействий, что требует специальной отладки методик их применения.

Так, для преодоления твердосемянности у бобовых растений используют обработку семян в жидком азоте [4, 5]. Аналогичную методику применяют и для криохранения семян, что необходимо для

предотвращения их старения, сохранения генофонда и поддержания высоких посевных качеств. Для этого используют сосуды Дьюара, внутри которых семена погружаются в жидкий азот, контактирующий с атмосферным воздухом. Продолжительность обработки может достигать многих месяцев. При таких условиях в емкостях с жидким азотом будут конденсироваться из атмосферы газы с температурой кипения выше, чем у жидкого азота до тех пор, пока не будет достигнута равновесная концентрация. Наиболее активным из атмосферных газов по отношению к живым тканям растений является кислород. Нейтрален в этом отношении аргон. Таким образом, при обработках семян в жидком азоте наличие в нем кислорода может стать существенным дополнительным фактором воздействия на семена. Использование других криожидкостей в открытой таре для обработок может приводить к подобным комбинированным эффектам. Таким образом, целесообразно провести эксперимент, позволяющий разделить вклад

от охлаждения и от химического взаимодействия с кислородом. Хорошим объектом для этого являются семена масличных культур.

Основным компонентом семян масличных растений, наиболее склонным к деградации, являются липиды. Они играют роль запасных веществ (жиры), материала клеточных мембран (фосфолипиды) и склонны к деградации (прогорканию) в результате гидролиза и окисления [7]. Наиболее подвержены такому влиянию моно- и полиненасыщенные жирные кислоты (МНЖК, ПНЖК) имеющие двойные или тройные связи в структуре молекулы [7]. Содержание антиоксидантов в семенах растения конкретного сорта определяет его возможности к сопротивлению деградации за счет поглощения антиоксидантами активных форм кислорода [6, 8]. Содержание антиоксидантов может существенно отличаться от сорта к сорту. Поэтому варьирование параметров развития растений между сортами может оказаться больше, чем между видами. Таким образом, баланс между содержанием ПНЖК и содержанием антиоксидантов будет определять скорость окисления липидов семян, их старение и потерю посевных качеств при взаимодействии с кислородом.

Необходимо отметить, что деградации за счет нарушения структуры, окислению и гидратации подвержены также белковые соединения, входящие в состав семян и выполняющие роль ферментов, запасных веществ, вместилищ генетической информации и т.п. [6, 7]. Этот эффект так же может быть существенным во время хранения семян. Сроки хранения семян бобовых растений, где белок выполняет роль запасного вещества, значительно больше, чем у масличных. Следовательно, взаимодействие белка с кислородом происходит медленнее, чем в случае ненасыщенных жирных кислот.

Углеводы (в основном крахмал) склонны к кристаллизации и преждевременной термодинамически разрешенной гидратации, что в основном отмечается в случае злаковых культур [9] и в меньшей степени относится к масличным, в том числе к латуку за счет малого содержания углеводов в его семенах.

Одним из направлений деятельности нашего коллектива является предпосевная обработка семян высоким давлением [3, 5]. При таком способе обработки семена помещают в передающую среду. Чаще всего это вода или водный раствор биологически активного вещества или их комбинации. Такая обработка может оказать воздействие на продуктивность растений, скорость их развития, оказать влияние на обсемененность патогенными микроорганизмами, устранить твердосемянность [1, 3, 5]. Однако возможны варианты угнетения развития растений при условии неадекватного выбора уровня давления и режима обработки [10]. В частности, известно, что высокий уровень гидростатического давления способен приводить к денатурации

белковых соединений [11]. При этом существует возможность ренатурации белка с при использовании более низкого уровня давления. В случае ренатурации ферментов (липазы, пероксидазы, амилазы и т.п.), отвечающих за дыхание или разложение запасных веществ на нутриенты, наблюдается повышение их активности, даже если денатурация была вызвана другими причинами, например окислением [11]. Подобный эффект, выражающийся в ускоренном развитии растений редиса после барообработки семян, мы уже наблюдали ранее [12]. Представляет интерес наблюдения таких эффектов на других культурах.

Данные [10], полученные на семенах кресс-салата, редиса и горчицы сарептской после обработки их давлениями от 50 до 400 МПа при различных температурах с последующим проращиванием обработанных семян при комнатной температуре, демонстрируют высокую устойчивость семян кресс-салата к обработкам с использованием высоких уровней давления (вплоть до 400 МПа). Такие уровни давления чаще всего приводят к угнетению растений. Тем не менее, было показано, что всхожесть семян кресс-салата лишь несколько уменьшается одновременно с убыванием скорости прорастания семян. В то же время семена редиса и листовой горчицы обладали меньшей устойчивостью к таким воздействиям. Таким образом, получилось, что семена растений одного семейства (крестоцветных) могут проявлять различный уровень устойчивости к обработке давлением. При этом обработка давлением около 400 МПа может подавлять развитие многих грибов, что ценно для культивации хозяйственно ценных растений. Необходимо отметить, что авторов [10] не интересовало качество развития проростков и исследовалась лишь лабораторная всхожесть. Такой подход возможен при получении микрозелени, но не эффективен при получении зеленой массы, семян или корнеплодов.

В настоящей работе были реализованы эксперименты, позволяющие определить степень влияния обсуждаемых факторов на семена растений определенного сорта конкретного вида. В качестве модельного растения был выбран салат латук – распространенная зеленная культура. Удобными особенностями этой культуры являются большая скорость вегетации и неприхотливость, что позволяет получать максимальное количество пищевой фитомассы при минимальных затратах. С другой стороны, особенностями некоторых сортов салата латука является неравномерность всходов в посевах и зависимость всхожести от температуры (выше 25 °C семена не прорастают). Срок хранения семян латука не превышает 5 лет. Все это приводит к дополнительным издержкам производства [17].

Семена салата латука со времен древнего Египта используют для получения масла [13]. Оно очень ценно, поскольку содержит биологически

активные вещества (БАВ), в частности около 40% довольно редкой  $\omega$ -6 линолевой ПНЖК, около 18%  $\omega$ -9 олеиновой МНЖК, относящихся к незаменимым (человеческий организм нуждается в них, но не может синтезировать) [14]. Такое высокое содержание ненасыщенных кислот может быть интересно с точки зрения устойчивости семян латука к взаимодействию с кислородом. Растительные масла с высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот при окислении густеют. Это свойство используется для получения масел технического назначения, олиф и прочих технических жидкостей [15]. В нашем случае окисление ПНЖК в семенах латука может привести к ухудшению посевных качеств, старению и гибели семян.

Таким образом, семена салата латука содержат ценные для фармацевтического и пищевого применения БАВ и являются удобным модельным объектом для тестирования методик предпосевной обработки семян и оценки их результативности.

Существуют бобовые растения, семена которых совмещают в себе свойство твердосемянности со значительным содержанием ненасыщенных жирных кислот, что существенно усложняет выбор режима предпосевной обработки. Примером такого растения является пажитник [16]. Предпосевная обработка подобных семян после некоторого срока хранения может оказаться весьма непростой задачей, как за счет большого количества твердых семян, так и за счет химической активности ПНЖК и МНЖК в составе семян. Поэтому разделение вкладов высокого давления и окисления ненасыщенных жирных кислот в изменение их посевных качеств может оказать помощь в подборе оптимальных режимов обработки семян такого типа.

С точки зрения практического использования методики предпосевной обработки важен эффект последствия. Важно знать, как долго может сохраняться положительный эффект от обработки семян до их посева. Стандартная предпосевная обработка семян салата латука заключается в замачивании с последующим просушиванием, что приводит к ускорению прорастания семян и улучшает однородность проростков. При этом срок хранения обработанных семян сокращается по сравнению с необработанными, особенно в условиях повышенной влажности и температуры [17]. Таким образом, интерес представляет как моделирование разных условий хранения семян салата латука, так и поиск вариантов обработок, позволяющих получить наиболее выгодный с точки зрения урожайности и качества семенной материал.

В настоящей работе для того, чтобы разделить вклады от воздействия атмосферных газов (аргон, кислород) и, собственно, от резкого понижения температуры при криообработке, было предложено использовать специальное устройство (криостат) для обработки семян в замкнутом объеме

(без связи с атмосферой) в чистых сжиженных газах [18]. В то же время проведены эксперименты по обработке семян салата латука высоким давлением и более простыми методами с тем, чтобы адекватно оценить, как эффект от барообработки, так и последствие.

Цель данного исследования – изучение влияния экстремальных физических воздействий (барообработка, криообработка) на прорастание семян и последующее развитие проростков салата латука сорта «Успех».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были использованы семена салата латука сорта «Успех». Барообработку давлениями до 40 МПа проводили в гидроцилиндре в среде дистиллированной воды. Для создания механического усилия использовали машину для механических испытаний Shimadzu AGS-X с максимальным усилием 20 кН. Скорость набора давления составляла 80 кПа/с. Время удержания давления после набора усилия – 5 мин. Сброс давления – в течение 1 с. Для обработки давлениями выше 40 МПа задействовали гидростат с внутренним объемом 5 л, в качестве передающей жидкости использующий воду с максимальным давлением 600 МПа [5]. Для физического отделения семян от гидравлической системы гидростата семена помещали в упругую оболочку, заполненную дистиллированной водой, затем запаивали в вакуумированный пищевой пакет.

Проведены две серии экспериментов по проращиванию семян после барообработки. Первая серия экспериментов (I) в грунтовых условиях теплицы, вторая серия экспериментов (II) в лабораторных условиях.

(I) Полевые испытания (посевы в закрытом грунте теплицы) проводили в ботаническом саду Курганского государственного университета (БС КГУ). Было испытано несколько групп семян. Первая группа после барообработки давлениями 5, 10, 15 и 20 МПа вместе с контрольной после подсушивания была отправлена в БС КГУ и хранилась там в течение шести месяцев в помещении со включенным отоплением и пониженной влажностью в бумажных конвертах (температура +27 °С). Кроме того, для оценки влияния условий хранения на качество семян за месяц до посева в ИФМ УрО РАН была проведена барообработка еще одной партии семян в тех же режимах и вновь отправлена в БС КГУ после подсушивания.

Перед проведением посевов для части семян контрольной группы был проведен дополнительный опыт по барботированию атмосферным воздухом. Барботирование семян проводилось в 0.2 л дистиллированной воды в емкости 0.5 л в течение 1 сут при +20 °С пропусканием через воду воздуха

в количестве 1 л/мин с помощью электромеханического мембранно-вибрационного компрессора.

Посевы исследуемых выборок семян в условиях закрытого грунта проводили для всех вариантов опыта одновременно.

(II) Результаты проращивания семян в лабораторных условиях сильно зависят от методики проращивания. При этом важно оценить не только посевные качества семян (энергия прорастания, всхожесть), но и качество проростков. Для количественной оценки этого параметра можно использовать длины гипокотила и корня проростка, которые вместе составят длину проростка. Освещение, температура, метод и время проращивания также играют важную роль. Развитие органов проростка на свету замедляется, что понижает точность измерений длины, но позволяет оценить качество развития проростка. Увеличенный срок проращивания позволяет растению продемонстрировать максимум своих возможностей. Поэтому лабораторные эксперименты проводили, используя разные варианты проращивания. Все эксперименты проводили при температуре +20 °С.

Лабораторные исследования всхожести семян и оценивание длины проростков и их частей после завершения проращивания проводили в ИЭРиЖ УрО РАН, в специально оборудованной люминесцентными лампами комнате со стабилизированной температурой воздуха в режиме: 12 ч темнота / 12 ч свет. Всего было использовано 4 схемы проращивания.

В первой схеме (1) семена проращивали в герметичных контейнерах в темноте, в течение 4 сут, что позволяет оценить скорость развития проростков на начальном этапе, когда запасные вещества семени израсходованы не полностью.

Вторая схема (2) весьма трудозатратна, обычно используется для оценивания качества развития растений и позволяет оценить состояние проростков в наиболее физиологичном положении, но без использования грунта. Семена помещали на расстоянии 1–1.5 см друг от друга на лентах из фильтровальной бумаги шириной 5 см и длиной 60 см. После укладки семян поверх накладывали кальку совмещая ее края с краями фильтровальной бумаги и аккуратно сворачивали в рулон. Полученные рулоны помещали в стерильный контейнер высотой в два раза меньшей чем рулон и заливали треть объема контейнера дистиллированной водой. Для уменьшения издержек и проведения измерений в течение одного дня использовали только обработки, которые обеспечили высокую скорость развития проростков и достаточную всхожесть при использовании первой схемы проращивания.

Третья схема (3) позволяет в тех же условиях переменной освещенности оценить максимальное количество семян в течение дня. Семена высевали

в чашки Петри через 2 месяца после обработок в тех же режимах, что и в первой схеме. В каждом варианте было испытано по 100 семян. Учет всхожести и измерение длин проростков проводили на 18 сут проращивания.

Четвертая схема (4) учитывает результаты испытаний по первым трем схемам и напоминает первую. Испытания проводили в темноте в течение недели в специальных контейнерах увеличенной высоты (увеличенные объем и высота позволяют свободно развиваться этиолированным растениям) с уплотненной крышкой. Учитывая данные, полученные в предыдущих лабораторных экспериментах, использовали давления 5 и 20 МПа, именно после обработок этими уровнями давления наблюдалась максимальная всхожесть, а также достаточная скорость и качество развития проростков. Две группы семян были обработаны этими уровнями давления с разницей в 4 месяца. При этом семена первой группы хранили в сухом помещении без отопления в летний период в бумажных конвертах (температура 20–22 °С), а вторую испытывали сразу после обработки и подсушивания. По той же схеме, но без задержки между обработкой и посевом, проращивали семена после обработок давлениями 100 и 200 МПа с соответствующей контрольной группой.

(III) Третья серия экспериментов была проведена для разделения вкладов от охлаждения до криогенных температур и взаимодействия с кислородом в лабораторных условиях после криообработки семян латука сжиженными газами. Для обработки семян использовали чистые аргон (99.993%) и кислород (99.97%), поставляемые в баллонах под давлением. В качестве хладагента и для обработки контрольных групп – жидкий азот в сосуде Дьюара. Обработку проводили в криостате оригинальной конструкции [18]. Семена для обработки упаковывали в проницаемые для криожидкостей тканевые мешочки, которые помещали в корпус криостата. Далее криостат продували 10 объемами газа и помещали в сосуд Дьюара с жидким азотом. Газы, подаваемые в криостат, переходили в жидкое состояние за счет понижения температуры, поскольку температуры кипения аргона и кислорода выше, чем у азота. После оживления необходимого для обработки количества газа закрывали редуктор и оставляли семена в жидком газе на время, необходимое для обработки семян. По окончании обработки криостат извлекали из жидкого азота и оставляли для нагрева до комнатной температуры. Испаряющийся газ стравливали через предохранительный клапан. Такая схема эксперимента позволила исключить влияние атмосферных газов на семена во время обработки. Проращивание семян проводили по четвертой (4) схеме.

Для оценки статистической значимости различий полученных данных использовали критерий

Краскелла–Уоллиса [21]. Обозначения общепринятые:  $H$  – критерий Краскелла–Уоллиса,  $df$  – число степеней свободы,  $p$  – уровень статистической значимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные таблицы 1, демонстрирующей результаты I серии экспериментов (полевые испытания), свидетельствуют о негативном влиянии хранения барообработанных семян в условиях пониженной влажности и повышенной температуры на их способность к прорастанию, что можно объяснить преждевременной активацией ферментов и их последующей ускоренной деградацией. Причем давление оказывает заметный стимулирующий эффект на развитие семян, по крайней мере, после первого месяца хранения. Это не может быть связано с насыщением семян жидкостью во время обработки, поскольку влажность семян за время хранения понизилась до начальной. Максимальная энергия прорастания (всхожесть на 3 и 4 сут) и всхожесть (14 сут) семян латука наблюдается при барообработке давлением 10 МПа и посеве через месяц после обработки.

Барботация семян также положительно сказывается на их энергии прорастания, что можно объяснить как эффектом замачивания, наблюдаемым другими авторами [17], так и снабжением семян необходимым количеством воздуха во время замачивания. Таким образом, на этапе активации ферментов растения не испытывают дефицита кислорода, поэтому прорастание происходит с максимальной скоростью и без задержки на набухание. Высаженные сразу после барботации семена

получили максимальные возможности для быстрого прорастания.

Семена контрольной группы, как и семена после обработок и последующего сухого хранения, при прорастании испытывают дефицит влаги, что приводит к более медленному развитию и последующей гибели части растений. При этом они не подвергались дополнительному стрессу ни от предварительного замачивания, ни от гидростатического давления.

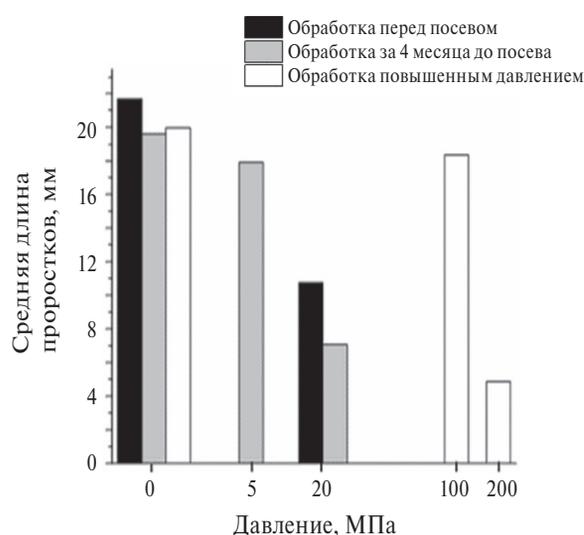
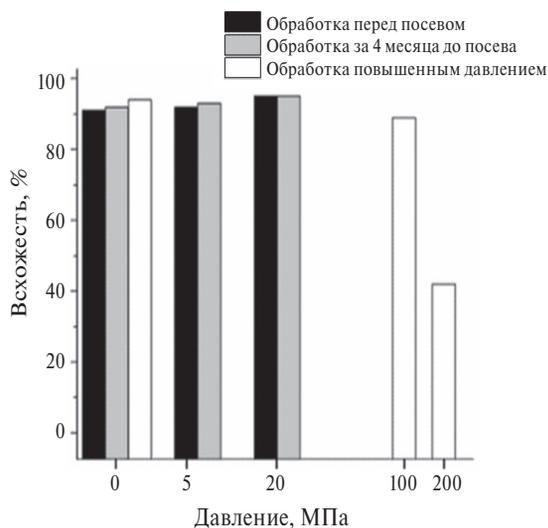
С увеличением давления обработки наблюдается увеличение количества растений, погибших после 14 сут проращивания. Можно также заметить, что растения всех групп, обработанных высоким давлением, демонстрируют как большую энергию прорастания, так и большую всхожесть относительно контроля даже после месяца сухого хранения.

Опираясь на полученные данные, следует отметить, что посев семян латука имеет смысл проводить сразу после обработки, или с минимальным периодом хранения в щадящих условиях. Вероятно, стимулирующий эффект барообработки приводит к выведению большинства семян салата из состояния покоя и последующее их хранение в сухих условиях приводит к фатальному падению жизнеспособности, как и предварительное намачивание. Хранение в летний период в условиях нормальной влажности при более низкой температуре не приводит к столь существенному ухудшению посевных качеств семян салата.

Анализ данных, представленных в табл. 2, а также на рис. 1 и 2 (II и III серия экспериментов) показывает, что более щадящий режим хранения после обработки давлением и подсушивания не оказывает существенного влияния на всхожесть,

**Таблица 1.** Доля проросших семян салата «Успех» в процентах, в зависимости от уровня давления барообработки в водной среде, барботации и периода хранения семян между обработкой и посевом (I)

Но- мер	Уровень давления барообработки, МПа	Период между обработкой и посевом, мес.	Продолжительность проращивания, сут.		
			3	4	14
1	20	1	29.5	33.0	19.5
2		6	3.0	3.5	8.5
3		1	27.0	32.0	19.0
4	15	6	2.5	2.5	7.5
5		1	31.5	39.0	30.0
6	10	6	4.0	5.5	8.5
7		1	20.0	23.0	19.0
8	5	6	6.0	9.0	13.0
9		0	29.5	33.5	34.5
10	0.1 (барботация)	0	16.0	19.5	15.0
	0.1 (контроль)	0			



**Рис. 1.** Лабораторная всхожесть семян салата после барообработки (II) при проращивании в темноте, выборка – 100 шт. Уровень давления 0 МПа соответствует контрольной группе каждого варианта обработки.

**Рис. 2.** Усредненная длина проростков салата при проращивании в темноте после барообработки (II), выборка – 100 шт. Погрешность измерения длины – 0.5 мм. Уровень давления 0 МПа соответствует контрольной группе каждого варианта обработки.

**Таблица 2.** Длина корня, гипокотыля и проростков, салата «Успех», в зависимости от уровня давления барообработки семян и всхожесть в этих режимах (II). Приводятся усредненные значения по выборке, для второго второй схемы проращивания, приведены также средние значения по каждой повторности

Но- мер	Схема проращи- вания	Номер повторно- сти	Давление, МПа	Средняя длина кор- ня, мм		Средняя длина ги- покотыля, мм		Средняя дли- на проростка, мм		Всхожесть, %		
				1	2	1	2	1	2	1	2	
1	4 дня, в темноте, в контейнерах, посев в день обра- ботки, 20 °С	100 шт. для каждого режима	Контроль	5.7		7.9		13.7		93		
			5	6.6		7.3		13.9		93		
			10	7.8		9.1		16.9		83		
			15	9.9		8.6		18.5		87		
			20	7.4		9.9		17.3		94		
2	14 дней, рулонный метод, 12 ч свет/ темнота, 20 °С, 20 шт. на повтор- ность, посев через 26 суток после обработки	1	Контроль	17	15	4	5.3	20.9	20.2	90	83	
				12.9		6.5		19.4		76		
		2	15 МПа	1	8.3	11.3	2.7	2.8	11	14.2	82	91
				2	13.1		2.3		15.5		98	
				3	12.6		3.5		16.2		92	
		3	20 МПа	1	23.2	18.6	3.5	3.5	26.8	22.1	98	95
				2	19.3		3.9		23.2		96	
				3	13.3		3		16.3		92	
		3	18 дней, чашки Петри, 12 ч свет/ темнота, 20 °С, посев на 52 сут. после обработки	100 шт. для каждого режима	Контроль	12.5		5.5		18		67
5	15.4				3.5		18.9		90			
10	8.5				3.1		11.6		77			
15	13.1				3.2		16.3		75			
20	20.4				4.3		24.7		91			

но в последующем влияет на усредненную длину проростков, что может быть связано с усиленной химической деградацией вещества семени при хранении после обработки.

Информация о средней длине проростков в группе, обработанной при давлении 5 МПа, отсутствует (рис. 2) из-за пересыхания одного из контейнеров вследствие дефекта крышки. При этом всхожесть можно было оценить, поэтому на рис. 1 данные о всхожести присутствуют.

С учетом особенностей объекта исследований мы провели статистический анализ результатов, представленных в табл. 2. Статистический критерий (тест) Краскелла–Уоллиса ( $H$  при соответствующих значениях степени свободы ( $df$ ) и уровне значимости  $p$ ) показал наличие значимых отличий длин проростков из барообработанных семян от контроля (табл. 2, 1 схема проращивания), как по длине корня ( $H = 43.6$ ,  $df = 4$ ,  $p < 0.001$ ), так и по длине гипокотыля ( $H = 26.9$ ,  $df = 4$ ,  $p < 0.001$ ). Таким образом, проростки семян, обработанных давлением, развиваются быстрее. Это вполне согласуется с результатами, ранее полученными на семенах редиса [12].

Что касается данных полученных с использованием схем проращивания 2 и 3, статистически значимых отличий в длинах проростков установить не удалось. По всей видимости, это связано с тем, что растения на начальном этапе в основном развиваются за счет запасенных веществ и, реализовав запас полностью, выглядят примерно одинаково. При этом нет данных о существенных отклонениях в развитии растений после обработки давлением. Таким образом, если обобщить интерпретацию табл. 2, растения после обработки давлением не только развивались нормально, но и обгоняли своих сородичей из контрольной группы, как и в случае с полевыми опытами.

В то же время, данные, полученные с использованием 4-й схемы проращивания, демонстрируют уменьшение размеров проростков после барообработки (рис. 2) при подобном уровне всхожести (рис. 1). В условиях проращивания в замкнутом объеме на начальном этапе (1 схема проращивания, 4 сут учета) этот режим способствует ускоренному развитию растений. Но на более поздних этапах (4 схема, 7 сут учета) приводит к замедлению развития. Такой эффект обычно связывают с выделением этилена, являющегося гормоном, синтезируемым растениями в ответ на механические воздействия [22]. При проращивании семян в чашках Петри (3 схема) и в открытых емкостях (2 схема) он не наблюдается за счет отсутствия возможности накопления этилена.

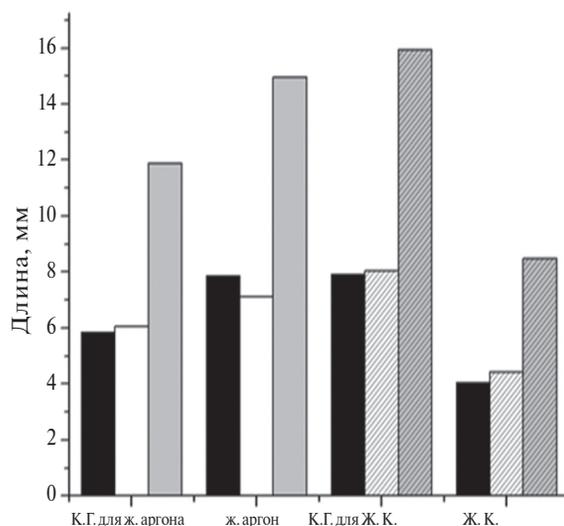
Для проверки возможности использования более высоких уровней давления, с учетом данных, полученных на кресс-салате авторами работы [10], было решено провести обработку при 100 и 200 МПа. Как выяснилось, обработка давлением 200 МПа приводит к существенному снижению всхожести

(рис. 1), а также к уменьшению средних длин гипокотыля и корня (рис. 2). Таким образом, уровень давления обработки 100 МПа для семян салата латука является предельным, но еще возможным. Кресс-салат, несмотря на название, относится к другому порядку с точки зрения биологии. Большая устойчивость его семян к уровням давления до 400 МПа, вероятно, связана с существенными физиологическими отличиями.

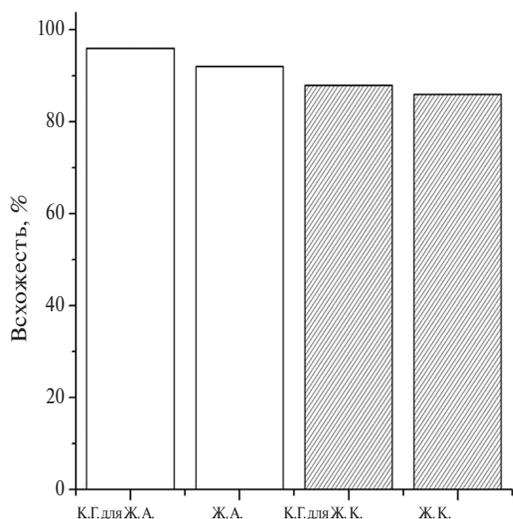
Для того, чтобы ответить на вопрос о влиянии кислорода на криохранение семян, была проведена серия (III) экспериментов по обработке семян сниженными аргоном и кислородом. Данные на рис. 3 и 4 демонстрируют, что хранение в обоих газах не влияет на всхожесть семян, но хранение в кислороде приводит к угнетению проростков, что, по всей видимости, свидетельствует о повреждении семян за счет взаимодействия кислорода с их веществом. При этом обработка в жидком аргоне наоборот – стимулирует развитие проростков, что, как и в случае с обработкой давлением, связано с абиотическим стрессом, вызванным охлаждением семян до криогенных температур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что уровень гидростатического давления 10 МПа является оптимальным для стимулирования прорастания семян салата латука в условиях закрытого грунта и переменной освещенности, что обусловлено достаточным уровнем абиотического стресса при минимальных повреждениях. Более того, семена латука, обработанные давлениями от 5 до 20



**Рис. 3.** Усредненная длина проростков, корешков и гипокотилей салата при проращивании в темноте (выборка – 100 шт.) после обработки криогенными жидкостями (III). По горизонтальной оси указана обработка. Погрешность измерения длины – 0.5 мм. (К.Г. – контрольная группа, ж.аргон – жидкий аргон, Ж.К. – жидкий кислород).



**Рис. 4.** Всхожесть семян салата после обработки криогенными жидкостями (III), выборка 100 шт. (К.Г. – контрольная группа, Ж.А. – жидкий аргон, Ж.К. – жидкий кислород).

МПа, демонстрируют полевую всхожесть и энергию прорастания лучшую чем в контроле даже после месяца сухого хранения в неблагоприятных условиях.

Статистическая обработка данных лабораторных исследований подтверждает ускоренное развитие проростков салата латука после обработки семян давлением от 5 до 20 МПа относительно контроля.

В отличие от кресс-салата, салат латук менее устойчив к повышенным давлениям и при обработке давлением 200 МПа посевные качества его семян существенно ухудшаются. Тем не менее, обработка давлением 100 МПа не оказывает существенного угнетающего воздействия на семена.

Показано, что при криохранении семян салата латука существенным фактором может оказаться влияние конденсирующегося кислорода на сохранность семян. В то же время обработка жидким аргонem стимулирует семена к прорастанию без ухудшения посевных качеств.

Хранение барообработанных семян салата в течение 6 месяцев в комнатных условиях при включенном отоплении и повышенной температуре приводит к резкому падению их способности к прорастанию.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Минобрнауки России «Давление», № 122021000032-5, в соответствии с темой государственного задания ФГБНУ ВИЛАР FGUU-2022-0014 «Изучение влияния экзогенных факторов на биологические структуры, решение вопросов их репаративной регенерации и консервации». Эксперименты по обработке семян в чистых сжиженных газах были выполнены на базе

отдела криогенных технологий центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Авторы благодарят сотрудников лаборатории молекулярной экологии растений и лаборатории популяционной радиобиологии ИЭРиЖ УрО РАН за предоставленную возможность использования помещений и оборудования для выполнения экспериментов по проращиванию семян салата латука и обсуждение полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rifna E.J., Ratish Ramanan K., Mahendran R.* // Trends Food Sci. Technol. 2019. V. 86. P. 95.
2. *Лебедев В.М., Платова Н.Г., Спасский А.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 487; *Lebedev V.M., Platova N.G., Spassky A.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 373.
3. *Кругликов Н.А., Беляев А.Ю., Минин М.Г., Яковлев Г.А.* // Изв. РАН. Сер. физ., 2023. Т. 87. № 11. С. 1593; *Kruglikov N.A., Belyaev A.Yu., Minin M.G., Yakovlev G.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 11. P. 1625.
4. *Молодкин В.Ю.* // Научн.-технн. бюлл. пробл. семеноведения. ВНИИ растениеводства им. Н.И. Вавилова. 1985. Т. 152. С. 60.
5. *Кругликов Н.А., Быструшкин А.Г., Беляев А.Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 228; *Kruglikov N.A., Bystrushkin A.G., Belyaev A.Yu.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 170.
6. *Швачко Н.А., Хлесткина Е.К.* // Вавиловский журн. генетики и селекции. 2020. Т. 24. № 5. С. 451.
7. *Кретович Л.К.* // Биохимия растений. М.: Высшая школа, 1980. 445 с.
8. *Шарова Е.И.* // Антиоксиданты растений. СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2016.
9. *Nagel M., Richter J., Börner A. et al.* // Free Radical Research. 2019. V. 53. No. 6. P. 641.
10. *Shimizu A., Kumakura J.* // Amer. J. Plant Sci. 2011. V. 2. P. 438.
11. *Кресс А.Е.* Жизненные процессы и гидростатическое давление. М: Наука, 1973. 272 с.
12. *Кругликов Н.А., Быструшкин А.Г., Лесных И.Н., Кругликова Л.Н.* // Зеленый журнал – Бюлл. бот. сада ТГУ. 2018. № 5. С. 14.
13. *Afsharypuor S., Ranjbar M., Mazaheri M. et al.* // Res. J. Pharmacogn. 2018. V. 5. No.3. P. 1.
14. *Титов В.Н., Дыгай А.М., Котловский М.Ю. и др.* // Бюлл. сибир. медицины. 2014. Т. 13. № 5. С. 149.
15. *Pecherskaya M., Mamatkulov Sh., Ruzimuradov O., Butanov K.* // Chem. Chem. Eng. 2020. No. 3. Art. No. 12.
16. *Магомедова З.М.* // Изв. ДГПУ. Естеств. и точные науки. 2021. Т. 15. № 2. С. 9.
17. *Schwember A.R., Bradford K.J.* // J. Exp. Botany. 2010. V. 61. No. 15. P. 4423.

18. *Кругликов Н.А., Кочев И.В., Беляев А.Ю., Соколов А.Л.* // Тез. докладов XXIII Всеросс. школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества. Екатеринбург, 2023. С. 238.
19. *Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н.* Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука, 1985. 348 с.
20. *Международные правила анализа семян.* М.: Колос, 1984. 310 с.
21. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
22. *Лутова Л.А., Проворов Н.А., Тиходеев О.Н. и др.* Генетика развития растений. СПб: Наука, 2000. 539 с.

## Hydrostatic pressure and cryofluidics pretreatment effect on seed germination and lettuce plant development

N. A. Kruglikov<sup>1, 3, \*</sup>, A. G. Bystrushkin<sup>2</sup>, I. V. Kochev<sup>1</sup>,  
S. D. Protsiv<sup>1, 3</sup>, D. A. Krylova<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>*Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108, Russia*

<sup>2</sup>*All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, 117216, Russia*

<sup>3</sup>*Ural Federal University, Yekaterinburg, 620202, Russia*

\*e-mail: [nick@imp.uran.ru](mailto:nick@imp.uran.ru)

It has been shown that treatment with hydrostatic pressure of 10 MPa for 5 min stimulates accelerated germination of lettuce seeds. Treatment with liquid oxygen has a depressing effect on the seeds. In this case, treatment in liquid argon, on the contrary, stimulates seed germination. The time delay between seed treatment and the start of germination can have a negative impact on plant development.

**Keywords:** lettuce, seeds, pre-sowing processing, high pressure processing, cryofluidics pretreatment, hydrostatic pressure, liquefied gases, cryostat, hydrostat