ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2023, том 87, № 11, с. 1593–1599

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

ВЫСОКОЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ КАК ФАКТОРЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ТВЕРДОСЕМЯННОСТИ У СОЛОДКИ

© 2023 г. Н. А. Кругликов[1], *, А. Ю. Беляев[2], М. Г. Минин[3], Г. А. Яковлев[3]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

[3]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 22.05.2023 г.
После доработки 19.06.2023 г.
Принята к публикации 28.07.2023 г.

В экспериментах по оценке последствий воздействия на твердые семена солодки уральской высокого гидростатического давления и одноосного сжатия этих семян установлен эффект преодоления твердосемянности: получены высокие значения доли нормально проросших семян от общего их количества твердых семян в исследуемом образце. Прочность семенной кожуры определяет максимальное усилие до разрушения семени при одноосном сжатии.

DOI: 10.31857/S0367676523702769, **EDN:** GFCOWO

ВВЕДЕНИЕ

В связи с изменением глобальной структуры хозяйственных отношений и ограничением перемещений сырьевых ресурсов насущными стали вопросы воспроизводства биоресурсов на своей территории, поиска технологий получения новых материалов, в том числе и природного происхождения, обладающих интересными комбинациями физических свойств. Методики испытаний и обработки новых объектов также представляют интерес как для материаловедения, биологии, так и для нужд легкой промышленности, сельского хозяйства [1–3].

Экспериментальные исследования последствий воздействия различных физических факторов (в том числе экстремальных) на растения, включая их семена, в последние два десятилетия значительно расширились [4–6]. Это обусловлено не только расширением фундаментальных исследований в области биофизики растений, но и возрастанием интереса к поисковым прикладным исследованиям на “стыках” наук для разработки новых технологических решений актуальных вопросов в агропромышленном комплексе, связанных, в частности, с предпосевной подготовкой семян новых культур. При этом современное техническое обеспечение этих исследований позволяет получить разностороннюю информацию об изучаемых образцах (выборках) семян для последующего выявления их индикаторных характеристик (свойств). Это позволит определить оптимальные параметры воздействия физических факторов на семена для улучшения их посевных качеств.

Солодка уральская (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) вместе с другими видами солодки, содержащими в подземных органах глицирризин, является источником особо ценного лекарственно-технического сырья (корней и корневищ), имеющего широкое применение во всем мире. Потребности мирового рынка в этом сырье составляют десятки тысяч тонн ежегодно, природные запасы солодкового корня истощаются [7]. На территории России в настоящее время воспроизводство солодки в условиях культуры невелико, а закупка сырья в странах Средней Азии затруднена.

В связи с этим актуальна разработка технологий семенного размножения солодки в промышленных масштабах. Серьезной агротехнической проблемой при этом является твердосемянность: до 90% семян солодки (как и у многих других дикорастущих бобовых растений) не прорастает даже при благоприятных условиях в связи с особым строением очень прочной и непроницаемой для воды семенной кожуры. Это так называемые твердые семена, для прорастания им требуется

скарификация – повреждение семенной кожуры при сохранении целостности зародыша. Известны разнообразные методы скарификации, включающие, в частности, воздействия различных физических факторов на семена [8–11]. Достижение положительного эффекта при этом нередко сопровождается трудоемкими техническими процедурами, часть семян теряет жизнеспособность. Важен дальнейший поиск эффективных способов преодоления твердосемянности.

Авторы работы [2] выявили связь твердосемянности и твердости семян у разных сортов вигны, испытывая группы семян при помощи анализатора текстуры. В работе [12] приводятся сведения о результатах исследований, в которых показана положительная связь твердосемянности и твердости семян у сои. В целом решение проблемы твердосемянности для эффективного воспроизводства многих хозяйственно ценных бобовых растений связано с исследованиями структуры и механических свойств семян, в особенности их наружной оболочки [9, 10]. Для различных видов и сортов бобовых растений проводились прямые оценки микротвердости семян (и семенной кожуры) по Виккерсу [1]. С нашей точки зрения перспективным подходом в поиске эффективных способов преодоления твердосемянности может стать совместное использование ряда методов: измерение микротвердости и предельных значений одноосного сжатия семян, гидростатическое (всестороннее) сжатие и наноиндентирование. Кроме того, для оценки последствий указанных воздействий важная информация может быть получена с использованием растровой электронной микроскопии.

Еще в 1920-х годах Дэйвис [13, 14] впервые привел данные о существенном повышении всхожести семян люцерны и донника (с долей фракции твердых семян около 44 и 75%, соответственно) после воздействия на них высоким гидростатическим давлением (до 200 МПа). В наше время также сохраняется интерес к использованию высоких уровней гидростатического давления для улучшения прорастания семян и параметров развития проростков бобовых растений. Но эти исследования связаны, в основном, с решением вопросов производства пищевой продукции [15, 16]. В нашей предыдущей работе приведены данные, свидетельствующие о перспективности применения высокого гидростатического давления для преодоления твердосемянности у солодки [17]. Мы предположили, что расширение диапазона применяемых уровней давления и изменение режимов барообработки приведет к выявлению оптимальных вариантов воздействия гидростатическим давлением на твердые семена солодки для преодоления непроницаемости семенной кожуры (возникновения способности семян впитывать воду). Кроме того, испытание механической прочности исследуемых семян при одноосном сжатии может дать ценную информацию для сравнительной оценки прочности семян солодки разных образцов, различающихся по видовой принадлежности, географическому происхождению или годам сбора. Одноосное сжатие может использоваться как метод нарушения целостности семенной кожуры для преодоления твердосемянности и последующего проращивания семян. При этом точная оценка механической прочности семян солодки будет важна для селекционной работы с этим растением, разработки и применения эффективных методов очистки и предпосевной подготовки семян [3].

Цель данной работы: определить область оптимальных уровней и режимов воздействия высокого гидростатического давления и одноосного сжатия на семена солодки уральской для преодоления твердосемянности, а также оценить возможности использования методов современного материаловедения для изучения механических свойств семян солодки, связанных с твердосемянностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные эксперименты проведены с семенами солодки уральской, собранными в 2012 г. в Республике Казахстан в одной из местных популяций. Семена хранились в лабораторных условиях при комнатной температуре и низкой относительной влажности воздуха. Для опытов использовали очищенные от механических примесей и вполне зрелые по внешним признакам (с оливковой окраской семенной кожуры) неповрежденные семена [18]. В нашей предыдущей статье [17], где приведено подробное описание оборудования и методик работы, использованных и в данном исследовании, сообщалось, что доля твердых семян в исследуемой выборке высокая (около 90%). Это дало возможность четко оценить эффект преодоления твердосемянности, обусловленный обработкой семян гидростатическим давлением. На семена солодки воздействовали гидростатическим давлением в диапазоне от 100 до 250 МПа в различных режимах с использованием лабораторного гидростата [19]. Благодаря жидкой передающей среде (дистиллированная вода) в гидростате обеспечивалась изотропность и однородность передачи давления на поверхность семян. Это исключало грубые механические повреждения семенной кожуры, характерные для большинства методов механической скарификации.

Использованы следующие варианты барообработки: однократно 100 МПа, трехкратно 100 МПа, двукратно 150 МПа, однократно 200 МПа, двукратно 250 МПа с добавочным воздействием 200 МПа. Барообработка семян проводилась также, как в нашей предыдущей работе: однократное или двутрехкратное повышение давления до нужного

уровня, удержание его в течение 5 минут и последующий сброс в течение 1 с. Использован также один контрольный вариант (без барообработки). После барообработки семена просушивали, чтобы не допустить преждевременного впитывания влаги. Каждый вариант опыта включал три повторности по 50 семян в каждой. Семена опытных и контрольного вариантов проращивались в чашках Петри на влажной фильтровальной бумаге под люминесцентными лампами (12 ч освещение, 12 ч темнота) при 23°С в течение 17 сут. По ранее апробированной методике исследовали динамику набухания и прорастания семян. Долю набухших и проросших семян учитывали через 1, 3 и 10 сут после посева в чашки Петри. Окончательный подсчет количества набухших, загнивших и проросших семян проводили через 17 сут, оценивали долю проросших и твердых семян.

Изучение индивидуальной и групповой (пробы по 20 семян) механической прочности твердых семян солодки при одноосном сжатии проводили на машине для механических испытаний Shimadzu AGS-X. После сжатия семена проращивали в чашках Петри в тех же условиях. Измерения микротвердости семенной оболочки по Виккерсу проводили при помощи микротвердомера Shimadzu HVM-G31DT CE. При этом нагрузку выбирали таким образом, чтобы в деформировании участвовала только сама семенная оболочка. Подходящий уровень нагрузки составил 10–50 мН. Наноиндентирование проводили при помощи наноиндентора Hysitron Ti 750 UBI в 75 точках (массив 5 × 15 точек с шагом 10 мкм). Для наноиндентирования семенной оболочки использовали поперечное сечение семени, полученное шлифовкой на абразивной бумаге с номиналом 1000 зерен на квадратный дюйм с предварительной заливкой образца в сплав Вуда. Шлифовку осуществляли на автоматическом шлифовально-полировальном станке MODUL MP-1SZ при скорости вращения планшайбы 100 оборотов в минуту и скорости вращения держателя 50 оборотов в минуту при минимальном усилии (давление в пневматической системе 50 кПа). Шлифовку осуществляли в несколько приемов с контролем качества поверхности шлифа при помощи микроскопа Альтами МЕТ 1Д оборудованного камерой U3ISPM18000KPA. Для записи данных и измерения расстояний использовали пакет Altami Studio 4.0. Для калибровки системы измерений расстояний использовали объект-микрометр “Альтами ОМ-У” с ценой деления 5 мкм. Исследования микро- и нанотвердости таких объектов сопряжены с определенными трудностями (кривизна и шероховатость поверхности). Поэтому для контроля поверхности после индентирования исследовали место испытания при помощи сканирующего электронного микроскопа FE-SEM Zeiss ∑IGMA VP.

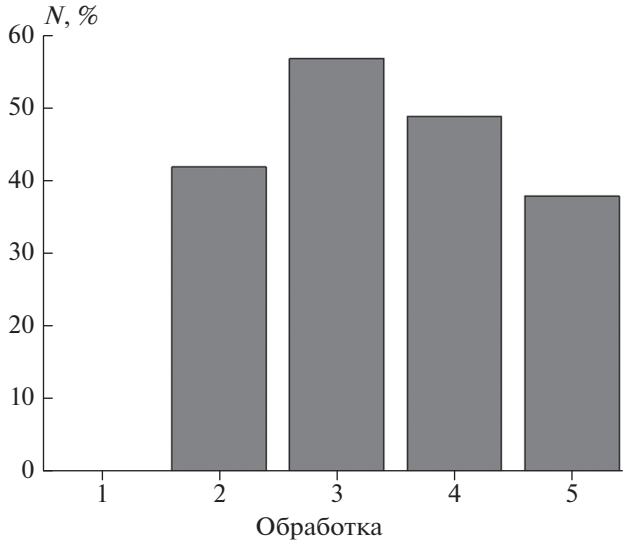

Рис. 1. Доля проросших семян солодки от общего количества твердых семян в исследованной выборке (N, %). По горизонтальной оси указан код обработки: 1 – Контроль (без обработки), 2 – 100 МПа; 3 – 100 МПа 3 раза; 4 – 150 МПа 2 раза; 5 – 200 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте по обработке семян солодки высоким гидростатическим давлением получены следующие результаты. Набухание семян началось в первый день после начала проращивания и продолжалось в течение трех суток. Через 10 сут основная часть набухших семян (кроме загнивших) проросла. На 17 сут был достигнут максимум прорастания в каждом варианте опыта. Не набухшие и не проросшие за 17 сут семена рассматривали как твердые. Проращивание семян в контрольном варианте опыта показало отсутствие в исследуемом образце семян, способных к прорастанию без скарификации. Набухших семян в контрольном варианте оказалось немного, но они не проросли и загнили. В итоге доля твердых семян в контроле составила в среднем около 86%. После скарификации наждачной бумагой все твердые семена контрольного варианта нормально проросли, что подтвердило их жизнеспособность [18]. На рис. 1 представлены данные о прорастании семян солодки уральской после обработки давлением от 100 до 200 МПа в различных режимах. Однократное воздействие на твердые семена гидростатическим давлением 100 МПа обеспечило прорастание в среднем 42% таких семян. После трехкратного воздействия таким уровнем давления 57% твердых семян приобрели способность к прорастанию. При этом аномалий в развитии проростков не наблюдалось. То есть, повторные последовательные воздействия давлением 100 МПа привели к существенному увеличению (на 15%) доли проросших семян. Возрастание гидро-

Таблица 1. Результаты проращивания семян солодки уральской после индивидуального одноосного сжатия

Дата, время (2022 г.)	Состояние семян в двух чашках Петри (О1 и О2), поставленных на проращивание 08.02.2022			
	О1 (5 шт. семян)		О2 (5 шт. семян)	
	набухшие	проросшие	набухшие	проросшие
09.02, 15 ч	3	0	1	0
10.02, 15 ч	5	0	4	0
11.02, 15 ч	2	3	2	3
12.02, 16 ч	0	(2)* + 3	0	5
14.02, 16 ч	0	(2)* + 3	0	5
15.02, 16 ч, проращивание завершено	0	(2)* + 3	0	5

(*n*)* – аномальные проростки с поврежденным первичным корнем.

статического давления (дважды по 150 МПа и однократно 200 МПа) не привело к увеличению доли проросших семян. Более того, такие нагрузки вызвали появление значительного количества аномальных проростков с деформированным и в дальнейшем отмирающим первичным корнем. Двукратная обработка давлением 250 МПа с добавочным воздействием 200 МПа оказалась избыточной: более 90% семян погибло, немногочисленные проростки имели поврежденный первичный корень. Полученные данные свидетельствуют о том, что в исследованном диапазоне уровней гидростатического давления имеется область оптимальных значений и режимов воздействия этого фактора для преодоления твердосемянности у солодки. В отношении исследованного образца (выборки) семян солодки уральской среди испытанных вариантов барообработки наилучший результат был получен при последовательном трехкратном воздействии давлением 100 МПа. Вполне возможно, что следующие одно за другим повторные воздействия на твердые семена солодки умеренно высоким гидростатическим давлением нарушают водонепроницаемость семенной кожуры в наиболее уязвимых местах (в частности, в области рубчика), не вызывая при этом повреждений зародыша [10, 20]. При дальнейших исследованиях важным дополнительным фактором оптимизации воздействия гидростатическим давлением на твердые семена может оказаться температура [16].

Изменение состояния семян солодки уральской, подвергшихся индивидуальному одноосному сжатию и поставленных на проращивание, демонстрируют данные табл. 1. Для проращивания после сжатия семена были размещены случайным образом в двух чашках Петри (О1 и О2) по 5 шт. для удобства наблюдения за их индивидуальным состоянием. При ежесуточном наблюдении за состоянием семян и проростков установлено, что набухание и прорастание семян в данном эксперименте происходило достаточно быстро (сходно с динамикой прорастания после гидростатического сжатия). Это обусловлено, по всей видимости, появлением крупных трещин в семенной кожуре и быстрым поступлением через них воды к зародышу. У набухших семян были хорошо видны места разрыва семенной кожуры (расширившиеся трещины) поперек продольной оси семян. Они возникли при одноосном сжатии семени, лежащего на боковой поверхности, к которой прилегала наружная сторона одной из двух семядолей. На противоположную боковую поверхность и прилегающую к ней вторую семядолю также действовала нагрузка. У многих проростков в местах приложения нагрузки были видны участки повреждения семядолей, но это в большинстве случаев не отразилось на дальнейшем развитии проростков. Итоговая оценка состояния проростков в группах О1 и О2 (исходно составлявших одну группу семян) показала, что индивидуальное одноосное сжатие обеспечивает хорошую сохранность зародышей и нормальное развитие проростков 80% обработанных семян. Такая методика преодоления твердосемянности у солодки может найти применение при селекционных исследованиях, при отборе образцов (групп семян) от отдельных растений для сравнительной оценки их механической прочности [3].

Деформационные кривые для 10 семян, испытанных индивидуально, приведены на рис. 2. Необходимую нагрузку для первого семени подбирали ступенчато, постепенно увеличивая усилие с тем, чтобы не пропустить момент начала пластического деформирования, поэтому начало первой кривой не приведено на рисунке. Видно, что максимальное усилие до разрушения составляет от 85 до 130 Н. Используя методику из [3] при нормировании на миделевое сечение исследуемых семян в направлении сжатия (5 мм^2) можно получить значение в единицах напряжения: 17–26 МПа. С уче-

том того, что основной вклад на начальном этапе деформирования вносит семенная оболочка и именно она обеспечивает прочность, имеет смысл в качестве делителя использовать площадь ее поперечного сечения. При этом участвует другое сечение (параллельное оси сжатия с минимальным диаметром) и разрушение происходит в условиях растягивающих напряжений. Толщина семенной оболочки меняется в разных частях семени, поэтому, возьмем минимальное значение, полученное в результате исследования в оптическом микроскопе – 74 мкм. Минимальный диаметр 1.8 мм. Таким образом, получаем площадь поперечного сечения оболочки 0.49 мм^2, а разрывающее напряжение 173–256 МПа. Такой уровень разрушающего напряжения сопоставим с прочностью малоуглеродистых сталей и некоторых цветных металлов, но вполне согласуется с прочностными свойствами природных волокон на основе целлюлозы [21].

В случае испытаний на групповую прочность максимальное усилие определялось прочностью семян, участвующих в деформировании на начальном этапе. Поэтому такой метод менее информативен, но позволяет быстрее провести испытания или скарификацию для большей группы семян. При этом семена, подвергнутые индивидуальным испытаниям со снятием нагрузки сразу после разрушения семенной оболочки, прорастали более успешно. В то же время микротвердость семенной оболочки оказалась 85.6 *HV* при нагрузке 245 мН и времени измерения 10 с. Результаты наноиндентирования семенной оболочки приведены на рис. 3. Усредненная по 75 точкам нанотвердость составила 295 МПа, что существенно превышает значение микротвердости, но коррелирует со значение прочности оболочки. При этом минимальное значение составляет 19.5 МПа, а максимальное достигло 669 МПа. Заметно, что при измерении во внешней области семенной оболочки наблюдается резкое понижение нанотвердости, что, по всей видимости, связано с наличием большого количества микротрещин. Во внутренней части оболочки нанотвердость существенно выше. Если отбросить результаты измерений в области с явным отклонением за счет неоднородности структуры – то получим усредненную нанотвердость – 334.6 МПа. Таким образом, становится понятно, что отличие между значениями микро- и нанотвердости вызвано как особенностями структуры семенной оболочки, так и направлением в которых проводились измерения (нанотвердость измеряли в поперечном сечении оболочки, в то время как микротвердость в соответствии с методикой [1] оценивали, вдавливая индентор перпендикулярно поверхности семени). При этом прочность оболочки будет определяться именно внутренним, так называемым палисадным слоем [9, 10].

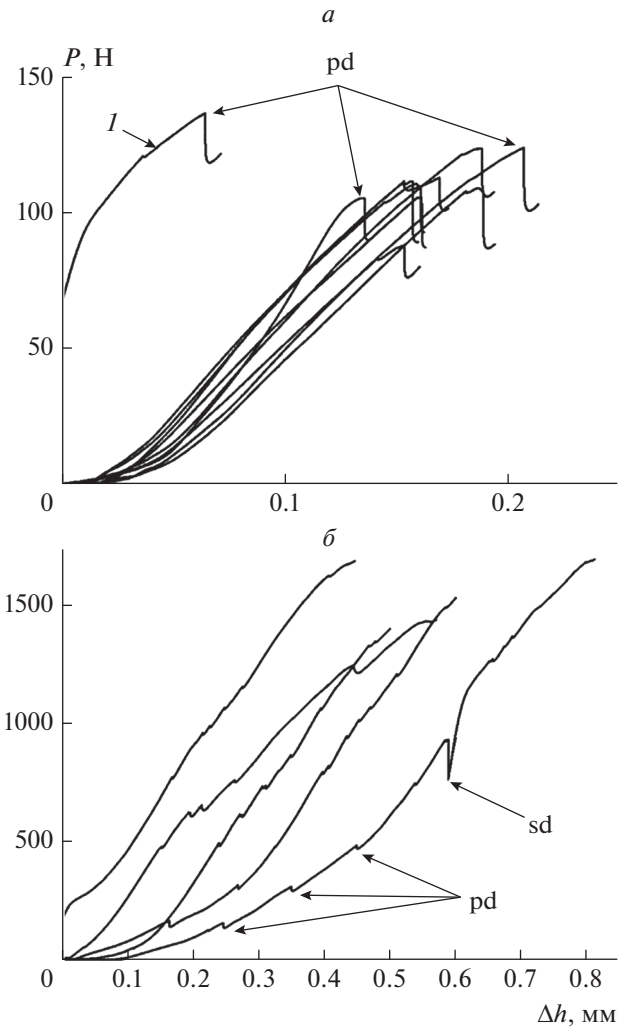

Рис. 2. Деформационные кривые в координатах нагрузка (P) от изменения высоты (Δh), полученные для семян солодки уральской при индивидуальных (*а*) и групповых (*б*) испытаниях на сжатие. pd – Момент разрушения семенной оболочки, sd – момент разрушение семядолей. Цифрой *1* на рис. 2*а* обозначен конечный участок первой кривой, полученной при подборе разрушающего усилия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований установлено, что среди пяти вариантов обработки твердых семян солодки уральской (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) высоким гидростатическим давлением (в диапазоне от 100 до 250 МПа) после трехкратного воздействия давлением 100 МПа получено наибольшее количество нормально развитых проростков (57%) от общего количества обработанных твердых семян. По всей видимости, оптимальные уровни и режимы воздействия высокого гидростатического давления для преодоления твердосемянности у солодки уральской должны быть близки к этому варианту барообработки.

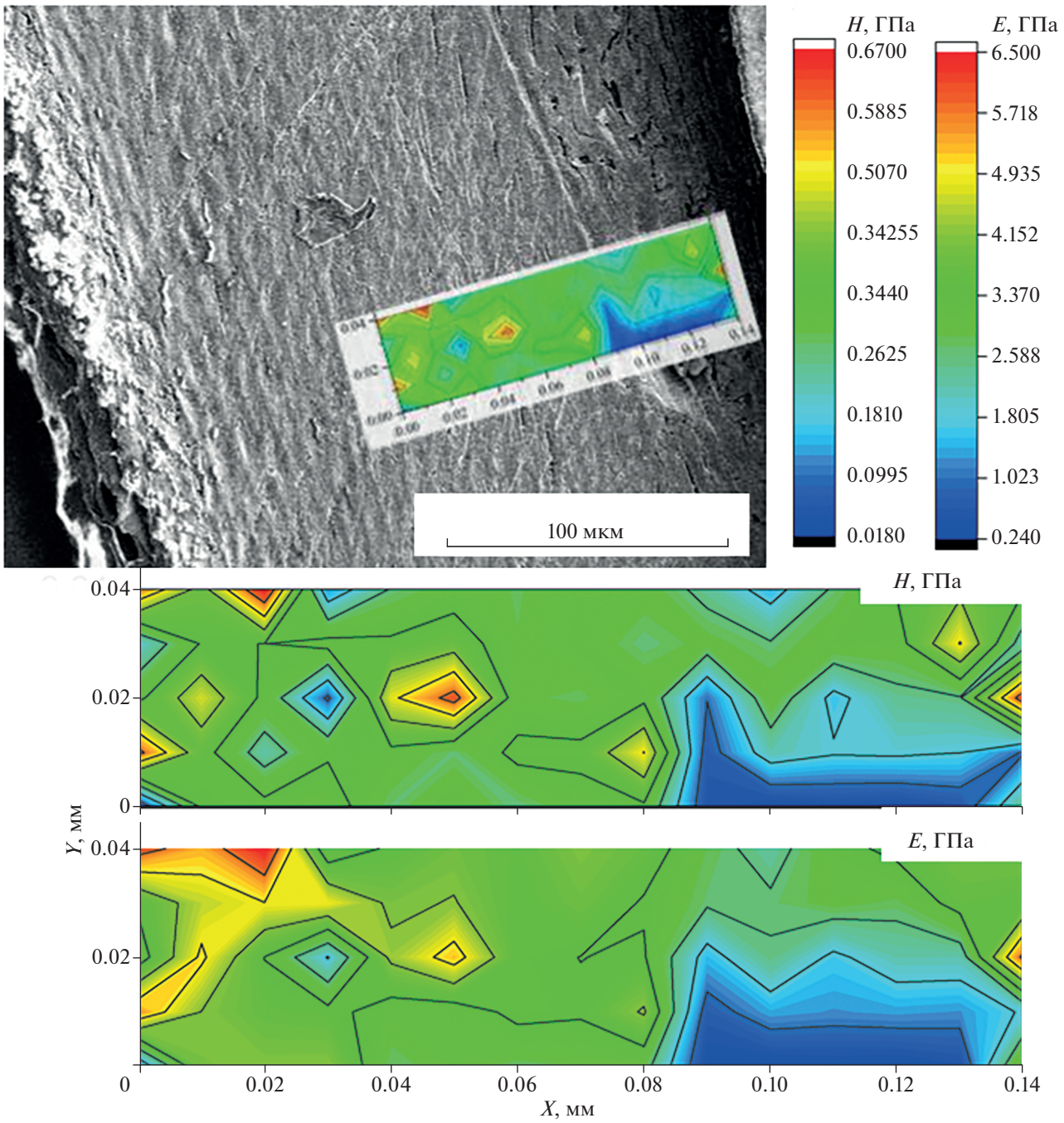

Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение семенной оболочки солодки уральской с наложением распределения нанотвердости по ее сечению. На вставках карты распределения нанотвердости (H) и модуля Юнга (E) с более высоким разрешением и шкалы цветовой маркировки этих величин.

Индивидуальное одноосное сжатие твердых семян солодки уральской при максимальном усилии от 85 до 130 Н позволило разрушить семенную кожуру до образования первой трещины и обеспечило хорошую сохранность зародышей. В результате применения такого сжатия при проращивании семян наблюдалось нормальное развитие проростков 80% обработанных семян. То есть, такой способ одноосного сжатия можно использовать как метод преодоления твердосемянности у солодки при исследовании небольших выборок семян с получением данных о механической прочности семян исследуемой группы.

Предложена методика исследования микроструктуры и механических свойств семенной кожуры у твердых семян солодки. Показано, что

именно эта часть семени определяет прочность. Выдвинуто предположение, что высокий предел прочности семенной оболочки (173–256 МПа) определяется содержанием волокон целлюлозы в стенках клеток палисадного слоя и для его приближенной оценки может быть использовано усредненное значение нанотвердости. В то же время продемонстрировано, что методики, предложенные в работах [1, 3], не могут быть использованы для оценивания прочностных свойств семян со значительной разницей прочности зародыша и семенной оболочки.

Результаты исследования можно использовать для разработки методик применения высокого гидростатического давления и одноосного сжатия для предпосевной подготовки семян солодки с высоким содержанием фракции твердых семян.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-26-00346).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fraczek J., Hebda T., Slipek Z., Kurpaska S.* // Can. Biosyst. Eng. / Genie biosyst. au Can. 2005. V. 47. P. 4.1.
2. *Paul D., Chakrabarty S.K., Dikshit H.K., Jha S.K.* // Seed Sci. Technol. 2019. V. 47. No. 2. P. 155.
3. *Крылов О.Н., Дородов П.В., Мохов А.А.* // Дост. науки и техн. АПК. 2013. № 8. С. 61.
4. *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.
5. *Чуликова Н.С., Малюга А.А., Близнюк У.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 12. С. 1817; *Chulikova N.S., Malyuga A.A., Bliznyuk U.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 12. P. 1549.
6. *Rifna E.J., Ratish Ramanan K., Mahendran R.* // Trends Food Sci. Technol. 2019. V. 86. P. 95.
7. *Толстиков Г.А., Балтина Л.А., Гранкина В.П. и др.* Солодка: биоразнообразие, химия, применение в медицине. Новосибирск: Гео, 2007. 311 с.
8. *Худайбергенов Э.Б., Михайлова В.П.* // Растит. рес. 1972. Т. 8. № 2. С. 225.
9. *Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н.* Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука, 1985. 348 с.
10. *Baskin J.M., Baskin C.C., Li X.* // Plant Spec. Biology. 2000. V. 15. No. 2. P. 139.
11. *Гранкина В.П., Надежина Т.П.* Солодка уральская. Новосибирск: Наука. Сибирское отд., 1991. 152 с.
12. *Zhang X., Zhao J., Bu Y. et al.* // Plant Mol. Biol. Report. 2018. V. 36. P. 605.
13. *Davies P.A.* // J. Gen. Physiol. 1926. V. 9. No. 6. P. 805.
14. *Davies P.A.* // Amer. J. Botany. 1928. V. 15. No. 2. P. 149.
15. *Alexandre E.M.C., Carvalho A.M., Saraiva J.A.* // High Press. Res. 2014. V. 34. No. 1. P. 133.
16. *Penas E., Gomez R., Frias J., Vidal-Valverde C.* // Food Control. 2008. V. 19. P. 698.
17. *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.
18. Международные правила анализа семян. М.: Колос, 1984. 310 с.
19. *Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Булычёв Д.К.* Гидростат. Пат. СССР. № 95992. 1982.
20. *Sun Q., Zhu L., Zhang W. et al.* // Legume Res. 2018. V. 41. No. 3. P. 441.
21. *Bledzki A.K., Gassan J.* // Prog. Polym. Sci. 1999. V. 24. P. 221.

High hydrostatic pressure and uniaxial compression as factors of overcoming hardseededness in licorice

N. A. Kruglikov[a], *, A. Yu. Belyaev[b], M. G. Minin[c], G. A. Yakovlev[c]

[a] *Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia*
[b] *Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620144 Russia*
[c] *Ural Federal University, Yekaterinburg, 620202 Russia*
**e-mail: nick@imp.uran.ru*

In laboratory experiments, when assessing the effects of exposure to licorice seeds of high hydrostatic pressure and uniaxial compression of these seeds, the effect of overcoming hardseededness was established, which was confirmed by high values of the proportion of normally germinated seeds from the total number of hard seeds in the sample under study. The strength of the seed coat determines the maximum force before the destruction of the seed under uniaxial compression.