



ТЕХНИЧЕСКИЕ КУЛЬТУРЫ

НАУЧНЫЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр лубяных культур»

НАУЧНЫЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

ISSN 2782-2915

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой
по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
(РОСКОМНАДЗОР)

Свидетельство
ПИ № ФС77-82351
от 23 ноября 2021 г.

Журнал включен
в Российский индекс научного
цитирования (РИНЦ)

Результаты статей размещены
на сайте электронной научной
библиотеки: <https://elibrary.ru>
Сайт: <https://fncl.ru/nauchnaya-deyatelnost/journal/>

Охраняется законом РФ
№ 5351-1 «Об авторском праве
и смежных правах»
от 9 июля 1993 года.

Над номером работали:
И.А. Флиманкова
М.В. Алейник
М.В. Красильникова

Адрес редакции:
214025, Российская Федерация,
г. Смоленск, ул. Нахимова, д. 21
телефоны:
8(4812)41-61-10 (доб. 112),
8(4812)65-55-03
e-mail: tcpaper@mail.ru

© ФГБНУ «Федеральный
научный центр лубяных культур»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ростовцев Р.А.

доктор технических наук, член-корреспондент РАН

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Ущатовский И.В.

кандидат биологических наук, доцент

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Кольцов Д.Н.

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Гаврилова А.Ю.

кандидат биологических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Голуб И.А.

доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
академик НАН Беларуси

Лачуга Ю.Ф.

доктор технических наук, профессор, академик РАН

Лобачевский Я.П.

доктор технических наук, профессор, академик РАН

Никифоров А.Г.

доктор технических наук

Осепчук Д.В.

доктор сельскохозяйственных наук

Прахова Т.Я.

доктор сельскохозяйственных наук

Ратошный А.Н.

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Рожмина Т.А.

доктор биологических наук

Романова И.Н.

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Самсонова Н.Е.

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Серков В.А.

доктор сельскохозяйственных наук

Сорокина О.Ю.

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Тимошкин О.А.

доктор сельскохозяйственных наук, доцент

Черников В.Г.

доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Шардан С.К.

доктор экономических наук, доцент



СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОР

3

В.С. Ерофеева, Н.В. Пролётова

**БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В СЕЛЕКЦИИ
ЛЬНА-ДОЛГУНЦА НА УСТОЙЧИВОСТЬ
К НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ФАКТОРАМ СРЕДЫ**

14

И. В. Кабунина

**К ОБЗОРУ РЫНКА СЕМЯН ЛЬНА МАСЛИЧНОГО
В РОССИИ**

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И АГРОНОМИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И СЕВООБОРОТНЫХ КУЛЬТУР

22

О. Ю. Сорокина, Н. Н. Кузьменко, В. И. Ильина

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЖИДКОГО ХЕЛАТНОГО
УДОБРЕНИЯ ФОРРИС НА ПОСЕВАХ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА
В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА
НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ**

28

А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева,

С. В. Уткина, Н. В. Романова

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СЕЛЕКЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА ЛЬНА-ДОЛГУНЦА ПО УРОЖАЙНОСТИ
ЛЬНОВОЛОКНА И ПАРАМЕТРАМ АДАПТИВНОСТИ
В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

37

А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева,

С. В. Уткина, Н. В. Романова

**ВЛИЯНИЕ АРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
НА УРОЖАЙНОСТЬ И ИЗМЕНИМОСТЬ ОСНОВНЫХ
ХОЗЯЙСТВЕННО-ПОЛЕЗНЫХ ПРИЗНАКОВ
ЛЬНА-ДОЛГУНЦА СОРТА ВОСХОД**

47

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫБОРОВ НОВЫХ ЧЛЕНОВ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

48

**КОНФЕРЕНЦИЯ «РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ»**

ОБЗОР

DOI 10.54016/SVITOK.2022.80.68.001

УДК 633.521:631.52:632.4

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В СЕЛЕКЦИИ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ФАКТОРАМ СРЕДЫ

© 2022. В. С. Ерофеева, Н. В. Пролётова

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»,
г. Тверь, Российская Федерация

Цель исследования – анализ литературных источников по теме «Биотехнологические методы в селекции льна-долгунца на устойчивость к неблагоприятным факторам среды». Рассмотрены применяемые в исследованиях российскими и зарубежными учёными методы клеточной селекции in vitro льна-долгунца на устойчивость к антракнозу и повышенной кислотности почвы. Проанализированы преимущества и недостатки данных методов для использования в исследованиях по льну-долгунцу. Описан процесс получения культуры клеток и тканей. Приведены примеры успешной селекции in vitro на различных культурах: томаты и морковь, картофель, огурец, лен-долгунец и другие. Сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития исследовательской деятельности по данной тематике.

Ключевые слова: лен-долгунец, антракноз, кислотность, биотехнологические методы, клеточная селекция, фитопатоген, устойчивость, селективный фактор.

Благодарности: Коновой А.М. (к. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекционных технологий ОП Смоленский НИИСХ), Сорокиной О.Ю. (доктор с.-х. наук, зав. лабораторией агротехнологий ОП НИИЛ), Гавриловой А.Ю. (к.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории агротехнологий ОП Смоленский НИИСХ), Виноградовой Е.Г. (к.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории селекционных технологий ОП НИИЛ).

Для цитирования: Ерофеева В.С., Пролётова Н.В. Биотехнологические методы в селекции льна-долгунца на устойчивость к неблагоприятным факторам среды. Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2022; 3(2): (3-13). DOI: 10.54016/SVITOK.2022.80.68.001

Поступила: 15.08.2022 Принята к публикации: 09.09.2022 Опубликована: 30.09.2022

BIOTECHNOLOGICAL METHODS IN THE SELECTION OF FLAX FOR RESISTANCE TO ADVERSE ENVIRONMENTAL FACTORS

© 2022. V. S. Erofeeva, N. V. Proletova,

Federal Research Center for Bast Fiber Crops
Tver, Russian Federation

The purpose of the study is to analyze literary sources on the topic "Bio-technological methods in the selection of flax for resistance to unfavorable environmental factors". The methods of in vitro cell selection of flax for resistance to anthracnose and increased soil acidity used in research by Russian and foreign scientists are considered. The advantages and disadvantages of these methods for use in research on flax are analyzed. The process of obtaining cell and tissue culture is described. Examples of successful in vitro breeding on various crops are given: tomatoes and carrots, potatoes, cucumber, flax, etc. Conclusions are drawn about the prospects for further development of research activities on this topic.

Keywords: flax, anthracnose, acidity, biotechnological methods, cell selection, phytopathogen, resistance, selective factor.

Acknowledgements: Konova A.M. (PhD in Agricultural Sciences, leading researcher at the laboratory of breeding technologies of the Separate Subdivision Smolensk Research Institute of Agriculture, Sorokina O.Yu. (DSc in Agricultural Sciences, head. laboratory of agricultural technologies of Separate Subdivision of the Scientific Research Institute of Flax), GavriloVA A.Yu. (PhD in Biological Sciences, leading researcher of the laboratory of agricultural technologies of the Separate Subdivision Smolensk Research Institute of Agriculture, Vinogradova E.G. (PhD in Biological Sciences, leading researcher of the laboratory of breeding technologies of Separate Subdivision of the Scientific Research Institute of Flax).

For citation: Erofeeva V.S., Proletova N.V. Biotechnological methods in the selection of flax for resistance to adverse environmental factors: Technical crops. Scientific Agricultural Journal. 2022; 3(2): (3-13). DOI: 10.54016/SVITOK.2022.80.68.001

Received: 15.08.2022 Accepted for publication: 09.09.2022 Published: 30.09.2022

Лен-долгунец — одна из древнейших сельскохозяйственных культур. Возделывание льна-долгунца имеет стратегическое значение для многих отраслей народного хозяйства России. В военно-промышленном комплексе его используют для получения ракетного и торпедного топлива, изготовления взрывоопасных веществ. Данная культура используется практически безотходно: из зеленой части льна, которая содержит около 30% волокон, изготавливают нити, из семечек отжимают масло, растительное сырье служит источником для получения лекарственных средств и компонентов технических смесей. В семенах льна-долгунца содержание жира доходит до 38%. Масло, полученное из данной культуры, занимает лидирующую позицию на мировой арене среди других технических масел. Жмых и шрот, оставшиеся после переработки растений, используют в качестве корма для животных [3, 7, 33, 37, 44, 51].

Отечественным сырьем льна-долгунца возможно полностью заменить хлопок, а также обеспечить финансовую, стратегическую независимость России в текстильной и химической промышленности. Лен-долгунец находит широкое применение в ландшафтном дизайне, с его помощью украшают альпийские горки и газоны [10, 51, 52].

В Российской Федерации насчитывается более 1000 сельскохозяйственных предприятий, 225 заводов по переработке льна, более 70 опытно-конструкторских, а также научно-исследовательских предприятий, занимающихся производством льна, и 37 предприятий, предлагающих льняную про-

дукцию. На сегодняшний день лен-долгунец в сельскохозяйственном производстве страны, в частности в Сибири, Алтайском крае и Нечерноземной зоне, занимает выдающееся место: он приносит до 70 процентов доходов и служит основой для создания рабочих мест в АПК [31, 47].

Для успешного развития отрасли льноводства необходимо наличие в производстве следующих факторов: использование высокоурожайных сортов льна-долгунца, устойчивых к болезням, вредителям, полеганию и ряду неблагоприятных факторов, высокий уровень агротехники и наличие в хозяйстве высокопроизводительной современной сельскохозяйственной техники. В настоящее время производственный потенциал новых сортов льна-долгунца используется сельхозтоваропроизводителями не более чем на 35%, что вызвано несоблюдением технологии выращивания культуры, а также влиянием неблагоприятных факторов окружающей среды [36, 43, 45]. Новые сорта недостаточно приспособлены к абиотическим (высокая, либо низкая температура, повышенная кислотность почвы) и биотическим (антракноз, бактериоз и другие вредоносные болезни) факторам [35, 39, 41, 46]. Из-за высокой засоренности посевов льна также достаточно часто наблюдается недобор урожая. Вредность сорняков заключается в усилении распространения вредителей и болезней, в их значительном потреблении питательных веществ из почвы, что существенно влияет на выход и качество льноволокна [22, 33, 38].

Эффективность выращивания льна фактически снижается из-за нестабильности

фито-санитарной обстановки на полях. Из литературных источников известно, что только 20% всех пахотных земель Российской Федерации соответствуют всем нормативам и требованиям [34]. Это стало причиной того, что сельхозпредприятия вынуждены использовать в качестве защиты посевов ударные дозы гербицидов и их баковых смесей, которые, в свою очередь, также оказывают негативное влияние на урожайность и качество собранного льна-долгунца [7].

Вместе с тем снижение урожайности и продуктивности такой культуры как лен-долгунец является следствием фузариоза. Данное распространенное заболевание поражает до 30% посевов [19, 26, 52]. Кроме фузариоза одной из опаснейших и вредоносных болезней, которые поражают лен-долгунец, является антракноз. Это грибковое заболевание вызвано грибом рода *Colletotrichum* [21, 31, 44]. В России на льне впервые проявление этой опасной болезни обнаружил А. А. Ячевский в 1915 году. В настоящее время проявление данного заболевания ежегодно выявляется на всех территориях льносеяния [3, 41]. Распространению болезни способствуют ветер, капли дождя, насекомые. В основную группу риска попадают растения, которые являются поврежденными и ослабленными, пострадавшими от механического воздействия. Антракноз активно развивается при повышенной влажности (около 90%) и высокой температуре воздуха (24-27°C) на почвах с высоким уровнем кислотности и низким содержанием фосфора и калия. Особая опасность болезни в том, что она может продолжительное время оставаться на семенах, собранных с пораженных антракнозом растений [20].

Болезнь проявляется на всех этапах роста и развития растения. На корешках проростков льна-долгунца появляются стекловидные оранжевые или серые пятна, которые очень скоро превращаются в язвы и перетяжки. Подсемядольное колено и семядоли покрываются резко ограниченными желтыми (светло-желтыми) пятнами, которые постепенно расплываются, меняя окраску на бурую [26]. Также антракноз поражает все надземные части культуры: постепенно темно-коричневые пятна с бурой каймой разрастаются по листьям растения, препятствуя поступлению питательных веществ.

Со временем пятна на пораженных участках становятся темно-фиолетовыми, появляются трещины и при повышенной влажности растение начинает загнивать. Если не предпринять соответствующие меры, то культура гибнет. У менее пораженных растений развиваются дополнительные корни. Однако растения отстают в росте, из-за чего наблюдается разнорусность. Листья льна-долгунца, пораженные антракнозом, засыхают и опадают [17, 25].

На стадии ранней желтой спелости льна-долгунца антракноз поражает нижние участки стебля, на которых появляются мелкие или продолговатые бурые пятна, постепенно распространяющиеся по всему стеблю, соцветиям и коробочкам льна. В пораженных коробочках, которые приобретают бурый оттенок, образуются нежизнеспособные семена [16, 40]. Урожайность льна-долгунца при поражении антракнозом снижается на 40%, а полученные от таких растений семена могут быть заражены вредоносным грибом на 80% и более. Солома льна, пораженного антракнозом, легко ломается, полученное волокно является низкокачественным и непрочным [10].

Одним из неблагоприятных факторов, влияющих на развитие льна-долгунца, является повышенная кислотность почвы. Несмотря на то, что лён, как культура, способна произрастать на кислых почвах, повышенная кислотность отрицательно сказывается на получении высококачественной льнопродукции [35]. Прекращение известкования, из-за нехватки средств и уменьшения объемов работ, привело к вторичному подкислению почвы, а также обеднению магнием и кальцием сельскохозяйственных угодий в большинстве регионов России. В настоящее время процесс закисления почвы значительно усилился в результате двух основных причин: частого выпадения «кислотных» дождей и использования кислых минеральных удобрений, преимущественно азотных [1]. В ходе изучения результатов многолетнего анализа показателей уровня рН в корнеобитаемом слое почвы было установлено, что подкисление среды происходит со среднегодовым снижением величины рН на 0,02-0,03 ед. [7]. В результате в земледелии России сформировался отрицательный баланс кальция. На данный момент уста-

новлено значительное подкисление почв во многих регионах России; общая площадь их в сельскохозяйственных угодьях составляет более 35 млн гектаров [47]. Остро стоит проблема повышенной кислотности почвы в таких экономических районах страны, как Поволжский, Восточно-Сибирский, Северо-Кавказский, Центрально-Черноземный, Дальневосточный и др. Так, выщелоченные черноземы Пензенской области имеют показатель рН 5,0, а, например, подзолистые почвы Псковщины около 5,5 [31, 34, 48]. Опыт Республики Татарстан показывает, что при проведении известкования происходит снижение площади кислых почв, а в черноземной зоне, где не проводят, растут. Повышение кислотности черноземов обусловлено быстрым обеднением почвенного поглощающего комплекса кальцием [54].

Наличие в почве большого количества подвижного алюминия отрицательно влияет на полезную микрофлору и оказывает угнетающее воздействие на растения уже при содержании 3-4 мг на 100 г почвы, а более высокие показатели — 7-8 мг/100 г, приводят к гибели растений. Закисление почвы и избыток подвижного алюминия нарушают обменные процессы в растениях, при которых теряются такие их свойства, как морозо- и засухоустойчивость, жаровыносливость, стойкость к вредителям и болезням. Кроме того, происходят сбои в развитии и задержка отдельных фаз роста [31]. Повышенная кислотность почвы также нарушает ферментативные реакции, ослабляя синтез и повышая гидролиз растений, фотосинтез замедляется, нарушая процесс сокодвижения в растительном органе, за счет активизации дыхания [34].

Большинство сельскохозяйственных культур, развиваясь на закисленных почвах, обнаруживают дефицит полезных микроорганизмов; сниженная микробиологическая активность кислых почв способствует недостатку в растениях питательных элементов, так как снижена минерализация почвы, а подвижный алюминий и железо, связывая фосфаты, образуют нерастворимые соли [14].

Современные российские сорта льна-долгунца имеют потенциальную урожайность волокон 20-25 ц/га. Тем не менее, фактический сбор в Российской Федерации составляет лишь 9,2 ц/га. Одна из причин снижен-

ной урожайности — закисление почв и их неоднородный состав по уровню кислотности [5]. При возделывании культуры на дерново-подзолистых и средне- и легкосуглинистых почвах оптимальной для льна-долгунца является слабокислая среда, имеющая рН_{КС1} 5,3-5,6 [49]. При этом в нашей стране посевные площади, соответствующие данному показателю, занимают лишь 20-30% всей пашни. Остальные же 70% имеют рН менее 5,0, что обусловлено высоким содержанием подвижного алюминия, соответственно и урожайность на этих почвах значительно ниже потенциально ожидаемой. Подвижные ионы алюминия являются фитотоксичными для сельскохозяйственных культур, что проявляется в образовании активных форм кислорода (АФК) и окислении липидов [53, 54]. Ответной реакцией растений на эти процессы является включение антиоксидантной защиты, то есть способности к активации транскрипции генов, выработке ферментов антиоксидантного действия, повышающих устойчивость клеток к окислению [13].

Создание новых высокопродуктивных, конкурентоспособных сортов льна-долгунца, устойчивых к полеганию, болезням, повышенной кислотности почв и ряду других абиотических факторов — актуальная задача современных селекционеров. Селекция льна на устойчивость к неблагоприятным факторам среды проводится с применением традиционных методик [34]. В то же время получение устойчивых форм с использованием методов классической селекции — очень длительный и трудоемкий процесс, требующий более 20 лет на создание одного сорта. Поэтому необходим поиск новых решений в данном направлении, среди которых особого внимания заслуживают биотехнологические методы, являющиеся в настоящее время наиболее перспективными и эффективными [35].

Современную селекцию уже невозможно представить без применения самых различных биотехнологий. Именно биотехнологические методы позволяют сегодня создавать самый разнообразный спектр генетически устойчивых материалов, которые позволяют сокращать объемы и продолжительность селекционных схем [2, 19, 31]. Основываясь на том, что адаптация культур к неблагоприятным условиям носит генетически обусловленный характер, а компоненты формирова-

ния устойчивости носят разноуровневый характер, совершенствование адаптивного аппарата возможно в условиях *in vitro* [20, 25].

В этой связи широкое распространение в практике селекции получил биотехнологический метод клеточной селекции *in vitro*, суть которого сводится к выделению мутантных клеток и соматональной вариабельности как способа получения новых форм растений-регенератов. Такой метод селективной работы относится к направлению мутагенеза, в процессе которого создаются различные вариации растений с улучшенными или желаемыми характеристиками путем индуцирования мутаций физическим, химическим или радиационным воздействием [39, 41]. *In vitro* подразумевает воздействие на уровне единичных клеток, и с одной стороны, это расширяет возможности метода, с другой – усложняет процесс в том случае, когда необходимо из нескольких клеток регенерировать полноценное растение [39]. Метод клеточной селекции заметно выигрывает по сравнению с традиционными селекционными методиками благодаря следующим преимуществам: возможность одновременно работать с большими выборками генотипов, доступный контроль окружающей среды, экономия места и материальных затрат, быстрый скрининг материала [41]. Существенным плюсом является возможность тестировать единичные клетки или небольшие участки тканей вне растительного организма; безусловно это заметно упрощает процесс, поскольку отсутствуют неудобства, связанные с контролем поступления и выведения различных веществ, и можно оценивать реакцию клеток, находящихся в сходной среде [38]. Метод клеточной селекции позволяет также создавать массу генетических комбинаций, усиливая или уменьшая тот или иной признак, и затем осуществлять их отбор и передачу регенерантам; также этот метод позволяет формировать устойчивость культур одновременно к нескольким стресс-факторам [1, 5, 21, 33, 34].

Многие авторы отмечают, что методы *in vitro* обладают и некоторыми существенными недостатками. Основные из них следующие: трудности в нахождении приемлемого для отбора маркера, ввиду сложности механизмов генетической детерминации селективных признаков; сложность селекции тех

признаков, которые проявляются на уровне клеточных связей и полноценного растения; низкий уровень получения регенерантов из клеточных культур; у большинства клеточных линий способность к регенерации снижается и полностью исчезает со временем; часто нарушена корреляция селективного признака между культурой и интактным растением; нестабильность проявления эпигенетических изменений в культивируемых клетках; часто признаки, выгодные в хозяйственно-экономическом отношении, сцеплены с нежелательными; влияние селективных агентов тесно зависит от фазы развития клеточной популяции; возможность генетической нестабильности и нежелательные мутации генома в культуре; отсутствие естественной среды провоцирует риски, связанные с непредвиденным проявлением культуры в полевых условиях [33, 34].

Тем не менее, селекция *in vitro* на сегодняшний день является неотъемлемой частью селекционной деятельности в большинстве развитых стран мира [28, 40, 41].

Основной целью клеточной селекции является получение культур, устойчивых к различным абиотическим воздействиям: экстремальным температурным, водным и осмотическим режимам, засолению, токсичности тяжелых металлов, облучению, действию гербицидов [8, 17, 25].

В основе всех методов *in vitro*, например, для злаковых культур лежат механизмы устойчивости для единичных клеток и полноценных растений [5, 22, 25, 32, 39, 40, 41]. *In vitro*-технологии успешно применяются для селекции тех признаков, которые проявляются на уровне клетки, например, методы, направленные на экспрессию тех генов, которые обеспечивают стабильную толерантность к стрессорам внешней среды [22, 32].

Культуру клеток и тканей получают чаще всего через каллусную культуру – неорганизованную пролиферирующую ткань, которая состоит из недифференцированных клеток. Эксплант помещается в искусственно организованную питательную среду. Состав питательной среды также может быть разнообразным: основанным на использовании сахаров, как основных источников питания, либо минеральных солей, фитогормонов и витаминов как базы для получения макро- и микроэлементов, необходимых для развития

экспланта [16, 19]. Также в питательную среду добавляют сок или экстракты растений, или эндосперм кокосового ореха с целью насыщения среды физиологически активными веществами [40].

Следующим этапом является размещение экспланта на питательной среде, имеющей желеобразную структуру. Таким образом получают каллусную ткань, которая возникает на поверхности экспланта или в его толще [15, 39, 40].

Структура клеток каллуса неоднородна, а их рост происходит беспорядочно, из-за того, что клетки экспланта, полученного из материнского организма, утрачивают свою специализацию [39].

После того как получена каллусная ткань, ее переносят в жидкую питательную среду и перемешивают для того, чтобы выделить суспензионную культуру клеток льна-долгунца, вследствие распада каллуса на отдельные клетки и агрегаты клеток. Когда селекционеру необходимо получить клоны отдельных клеток растения, необходимо отфильтровать агрегированные клетки при помощи фильтров с уменьшающимися порами. В результате получают генетически идентичные клетки – клон, готовый к пересадке в агаризованную питательную среду [41].

Отдельные клетки получают непосредственно через мацерацию тканей льна. С помощью таких ферментов, как целлюлаза и пектиназа, из тканей растения (либо из культуры клеток) могут быть получены культуры изолированных протопластов. Используемые ферменты разделяют клетки и разрушают их оболочку [5].

Полученные культуры каллусной ткани, суспензионные культуры клеток и агрегатов клеток, а также культуры протопластов – это селекционный материал, необходимый для дальнейшей работы [37].

Следующий этап – это отбор различных генетических вариантов, который производится посредством переноса полученных клеток-клонов в новую среду для их деления и получения новых сортов сельскохозяйственной культуры. Поскольку пассируются клеточные клоны, полученные не половым путем, в биотехнологии их называют соматическими клонами или соматическими вариантами, произведенными из клеток одного и того же растения [2, 27, 50].

Для того чтобы выделить наиболее жизнеспособные клетки, в культуральную среду вводят селективный фактор (к примеру, токсин, который выделяется фитопатогеном). Клоны клеток, которые продолжают деление, несмотря на воздействие селективного фактора, подвергают разнообразным испытаниям вне среды с его присутствием, после чего вновь возвращают в первоначальную среду для того, чтобы выявить клоны с эпигенетической устойчивостью, при которой изменение экспрессии генов имеет характер длительной модификации [2].

Первый признак регенерации – это организованный рост, который возникает в виде меристем (очагов), из которых постепенно развиваются органы растения, либо зародышеобразные структуры (эмбриоиды), из которых формируется проросток растения. Клеточные клоны, либо каллусные культуры, которые подвергаются многочисленным пассированиям, утрачивают способность к регенерации [4, 42]. Установлено, что во многом эту способность определяет вид растения. К примеру, многочисленные сельскохозяйственные культуры, такие как картофель, томат, морковь и капуста, имеют высокий процент регенерантов, в то время как зерновые злаки – очень низкий. Лен-долгунец является культурой с низкой регенерационной активностью. Лишь одна из 4000 клеток способна к регенерации. Именно данный фактор сдерживает активное применение культуры клеток и тканей в селекционной работе. Низкий процент регенерации сдерживает исследователей от применения данного способа и заставляет искать новые пути и подходы для выведения новых сортов растений, обладающих повышенной регенерационной активностью [4].

Создание эффективных биотехнологических систем обусловлено многими факторами: это и подбор селективного маркера, и условия культивирования, и учет последовательности результатов на всех этапах отбора, с целью максимального проявления желаемого признака [42]. Схема всегда индивидуальна и обусловлена целым рядом факторов: видом растения, отобранного признака, каллусогенеза, морфогенеза, особенностей механизмов стрессора, методики проведения селекции и т.д. [11].

Доказанная эффективность селекции *in vitro* подтверждается ее многочисленными

достижениями, при которых появилась возможность получать регенеранты с измененными признаками, в числе которых можно отбирать формы, толерантные к болезням, но при этом сохранившие положительные признаки исходника [4].

Примерами успешной селекционной работы методом *in vitro* являются полученные устойчивые линии сельскохозяйственных культур как в нашей стране, так и в странах Запада: толерантные к фузариозу – люцерны и льна; устойчивые к алтернариозу – томаты и моркови; к фитофторозу – картофеля и др. [9, 11, 29, 30, 36, 42]. Успешно разработана система селективных условий для культивирования в условиях *in vitro* регенерантов огурца с высокой устойчивостью к воздействию фильтрата культуральной жидкости гриба *F. oxysporum* и фузариевой кислоте [29].

В России и США получены положительные результаты в отношении некоторых болезней картофеля. В частности, выведен сорт картофеля, нечувствительный к фитофторозу, кольцевой гнили и черной ножке [8]. На Гавайях получен сорт сахарного тростника, который устойчив к вирусным болезням и ложной мучнистой росе [8, 10, 35]. Также выявлены самоклоны ячменя, люцерны, пшеницы и томатов, которые устойчивы к грибам рода *Fusarium*; риса и ячменя – к грибам *Helminthosporium* и перикоулярии [12, 17, 20, 26, 28, 35].

Селекционным путем получены сорта моркови с повышенным содержанием полезных аминокислот, токсичные аналоги которых были добавлены в питательную среду в процессе селекционных испытаний [25].

Создание новых сортов льна-долгунца методами клеточной селекции будет успешным при соблюдении ряда условий, одно из которых – наличие устойчивости к патогену самого селекционного материала.

Для повышения устойчивости льна к антракнозу в культуре *in vitro* в качестве селективного фактора используют культуральный фильтрат штаммов патогена [41]. Токсичность данного фильтрата вызывается веществами, которые содержатся в нем и подавляют рост и развитие клеток льна-долгунца. С использованием культуры незрелых зародышей и селективной среды, содержащей культуральный фильтрат возбудителя антракноза, получают растения-регенеранты

льна, устойчивые к данному патогену. Для регенерации клеток льна в селективных условиях культуральный фильтрат добавляют на стадии культивирования изолированных незрелых зародышей, а затем сформированный морфогенный каллус переносят в селективные условия с более высокой концентрацией культурального фильтрата. Морфогенные клеточные колонии пассируют на селективной среде в течение 3–4 пассажей. После этого регенерационная активность клеток льна-долгунца снижается и вероятность получения устойчивых к антракнозу растений-регенерантов сводится к нулю. Отбор устойчивых к культуральному фильтрату клеток льна возможен при совокупном использовании 4 штаммов возбудителя антракноза, на основе которых получают культуральный фильтрат, который затем вносят в питательную среду. Оптимальными концентрациями для отбора в селективных условиях являются 36 мл/л культурального фильтрата, 40 и 44 мл/л культурального фильтрата [39].

Для определения устойчивости к повышенной кислотности почвы культуральная среда подкисляется либо подвергается воздействию ионов алюминия. При получении устойчивого к ионам алюминия материала наиболее эффективно зарекомендовал себя $AlCl_3$ и $Al_2(SO_4)_3$ (Al - 47,7 мг/л), как селективный агент при культивировании незрелых зародышей *in vitro*. Анализ образцов потомств льна-долгунца, полученных на основе из незрелых зародышей, в условиях естественной среды на кислых и оптимальных почвах, показал высокую толерантность регенерантов к эдафическому фактору среды – закислению почвы. Растения частично превосходили исходный генотип по устойчивости к повышенной кислотности [5, 6].

Таким образом, биотехнологические методы селекции на современном этапе развития науки – довольно трудоемки и требуют сложной, последовательной работы. Однако следует отметить определенные положительные результаты в данном направлении, которые затронули селекцию не только ценных сельскохозяйственных культур, но и льна-долгунца. Перспективными являются разработки и дальнейшее развитие исследовательской деятельности в клеточной селекции [18, 24].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова Т.А., Павлова Л.Н. Создание высоковолокнистых, устойчивых к полеганию болезням сортов льна-долгунца // Итоги и перспективы развития селекции, семеноводства, совершенствования технологии возделывания и первичной переработки льна-долгунца: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию Всероссийского научно-исследовательского института льна (Торжок, 16 ноября 2000 г.). – Торжок: ВНИИЛ, 2000. – С. 19-21.
2. Бабилова А.В., Горпенченко Т.Ю., Журавлев Ю.Н. Растение как объект биотехнологии // Комаровские чтения. – 2007. – Вып. LV. – С. 184-211.
3. Болезни льна // Agromage URL: https://agromage.com/stat_id.php?id=145 (дата обращения 02.07.2022).
4. Бутенко Р.Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнологии на их основе: Учеб. пособие. – М.: ФБК-ПРЕСС, 1999. – 160 с.
5. Виноградова Е.Г. К разработке методики клеточной селекции получения устойчивых эксплантов льна к абиотическим факторам среды // Вестник ТвГУ. Серия «Биология и экология». – 2019. – № 2 (54). – С. 289-296.
6. Виноградова Е.Г. Получение регенерантов льна, устойчивых к ионам алюминия // Научные разработки селекцентра – льноводству. – Тверь: ТвГУ, 2013. – С. 51-52.
7. Доронин С.В., Тихвинский С.Ф. Лён-долгунец. Технология возделывания и селекция. – Киров: ВГСХА, 2003. – 112 с.
8. Иммуитет растений / Под ред. В.А. Шкаликова. – М.: КолосС, 2013. – 190 с.
9. Ипатова Н.В. Оценка исходного материала столовой моркови на устойчивость к фузариозу и альтернариозу с использованием методов традиционной и клеточной селекции: автореф. дис. канд. с.-х. наук: 06.01.05. – М., 2004. – 21 с.
10. Использование биотехнологии и генной инженерии в селекции овощных растений // Селекция и семеноводство овощных культур URL: https://ozlib.com/1010118/agro/ispolzovanie_biotehnologii_gennoy_inzhenerii_selektcii_ovoschnyh_rasteniy (дата обращения 27.06.2022).
11. Калашникова Е.А. Клеточная селекция растений на устойчивость к грибным болезням: дис. д-р. биол. наук: 03.00.23. – М.: ТСХА, 2003. – 279 с.
12. Карпунин Б.Ф. Антракноз льна: селекция на устойчивость. – Lap Lambert Academic Publishing, 2016. – 113 с.
13. Кишлян Н.В., Мельникова Н.В., Рожмина Т.А. Механизмы адаптации льна-долгунца к повышенной кислотности почвы (обзор) // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2020. – №4. – С. 205-212.
14. Климашевский Э.Л. Генетический аспект минерального питания растений. – М.: Агропромиздат, 1991. – 414 с.
15. Коваленко Н.Н., Поливара Н.В. Оптимизация питательных сред для культивирования *in vitro* зародышей из гибридов рода *Cerasus* Mill // Плодоводство и ягодоводство России. – 2017. – Т. 49. – С. 18-21.
16. Коновалов Ю.Б., Пыльнев В.В., Хупацария Т.И., Рубец В.С. Общая селекция растений: учебник. – СПб.: Лань, 2013. – 480 с.
17. Коновалов Ю.Б. Селекция растений на устойчивость к болезням и вредителям. – М.: «Колос», 1999. – 135 с.
18. Корзун О.С., Бруйло А.С. Адаптивные особенности селекции и семеноводства сельскохозяйственных растений. – Гродно: ГГАУ, 2011. – 140 с.
19. Крепков А.П. Проблемы и направления селекции льна-долгунца // Итоги и перспективы развития селекции, семеноводства, совершенствования технологии возделывания и первичной переработки льна-долгунца: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию Всероссийского научно-исследовательского института льна (Торжок, 16 ноября 2000 г.). – Торжок: ВНИИЛ, 2000. – С. 10-11.
20. Крылова Т.В., Лошакова Н.И., Кудрявцева Л.П. Селекция льна-долгунца на групповую устойчивость к болезням. – Торжок, 2002. – С. 35-39.
21. Кудрявцева А.П. Селекция льна-долгунца на устойчивость к пасмо и антракнозу // Защита и карантин растений. – 2005. – № 12. – С. 19-20.

22. Кудрявцева Л. П., Пролётова Н. В. Методологическое обеспечение селекции льна на устойчивость к антракнозу // *Фундаментальные и прикладные исследования в биологическом сельском хозяйстве России, СНГ и ЕС: материалы докладов, сообщений Международ. науч.-практ. конф. (9–12 августа 2016 г.)*. – М., 2016. – Т. 2. – С. 149-158.
23. Лошакова Н. И. Устойчивые сорта - эффективный путь борьбы с болезнями льна // *Защита и карантин растений*. – 2011. – № 9. – С. 43-44.
24. Лошакова Н. И., Крылова Т. В., Кудрявцева Л. П. Методические указания по фитопатологической оценке устойчивости льна-долгунца к болезням. – Торжок, 2000. – 51 с.
25. Лошакова Н. И., Крылова Т. В., Кудрявцева Л. П. Приоритетные исследования иммунитета льна к грибным болезням // *Инновационные разработки – льноводству*. – Тверь, 2011. – С. 20.
26. Лошакова Н. И., Крылова Т. В., Кудрявцева Л. П. Роль устойчивых сортов льна-долгунца к болезням с позиции экологии и повышения качества льнопродукции. – Торжок, 2005. – С. 69-75.
27. Лошакова Н. И., Павлова Л. Н. Состояние и перспективы исследований по иммунитету льна-долгунца к болезням // *Основные результаты и направления развития научных исследований по льну-долгунцу: Материалы науч.-практ. конф., посвященной 80-летию образования ВНИИ льна*. – Торжок, 2010. – С. 110-117.
28. Матюхин А. П., Лошакова Н. И., Кудрявцева Л. П. Система защиты льна-долгунца от болезней, вредителей и сорняков. Рекомендации. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 56 с.
29. Мезенцева О. Н. Создание исходного селективного материала люцерны и пшеницы, устойчивых к фузариозу, методом биотехнологии: автореф. дис. канд. биол. наук. – М.: ТСХА, 1992. – 15 с.
30. Нгуен Х. М. Селекция *in vitro* на устойчивость к *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici* у томатов: автореф. дис. канд. биол. наук: 03.00.15. – Минск, 1991. – 21 с.
31. Павлова Л. Н. Этапы развития селекционной работы по льну-долгунцу: достижения и основные направления // *Основные результаты и направления развития научных исследований по льну-долгунцу: Материалы науч.-практ. конф. – Торжок: ГНУ ВНИИЛ Россельхозакадемии*. – 2010. – С. 40-47.
32. Павлова Л. Н., Александрова Т. А., Лошакова Н. И., Герасимова Е. Г. Новые сорта льна-долгунца – производству // *Научные разработки селекционного центра – льноводству*. – Тверь: ТвГУ, 2013. – С. 7-9.
33. Павлова Л. Н., Герасимова Е. Г., Румянцева В. Н. Инновации в селекции льна-долгунца. Инновационные разработки производства и переработки лубяных культур: материалы Международ. науч.-практ. конф. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. – С. 46-49.
34. Павлова Л. Н., Рожмина Т. А., Герасимова Е. Г., Румянцева В. Н., Киселева Т. С. Новые сорта льна-долгунца – важный фактор повышения эффективности производства льнопродукции // *Инновационные разработки для производства и переработки лубяных культур: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (18 мая 2017 г.)*. – Тверь: ТвГУ, 2017. – С. 78-81.
35. Плотникова Л. Я. Иммунитет растений и селекция на устойчивость к болезням и вредителям. – М.: Колос, 2007. – С. 236.
36. Поляков А. В. Биотехнология в селекции льна. – Тверь: Формат, 2000. – 180 с.
37. Понажев В. П., Павлова Л. Н., Рожмина Т. А. Селекция и первичное семеноводство льна-долгунца: Методические указания. – Тверь: Тверской госуниверситет, 2014. – С. 92-94.
38. Пролётова Н. В. Биотехнологические методы – инструмент для создания новых генотипов льна, устойчивых к антракнозу // *Аграрный вестник Верхневолжья*. – 2020. – № 3. – С. 31-36.
39. Пролётова Н. В. Повышение устойчивости льна-долгунца к антракнозу (*Colletotrichum lini* Mannset Volley) методами *in vitro*. Масличные культуры // *Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур*. – 2018. – № 3 (175). – С. 128-131.
40. Пролётова Н. В., Виноградова Е. Г. Методика создания *in vitro* растений-регенерантов льна-долгунца, устойчивых к антракнозу (*Colletotrichum lini* Mannset Volley) и токсичным ионам алюминия // *Синерге-*

тика в общественных и естественных науках. – Тверь: Тверской государственный университет, 2015. – С. 67-70.

41. Пролётова Н.В., Кудрявцева Л.П. Создание *in vitro* новых, устойчивых к болезням сортов льна – один из способов повышения биоразнообразия культуры // Биотехнология как инструмент сохранения биоразнообразия растительного мира (физиолого-биохимические, эмбриологические, генетические и правовые аспекты): Материалы VII Международ. науч.-практич. конф., посвящ. 30-летию отдела биотехнологии растений Никитского ботанического сада. – Ялта, Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – С. 50-51.

42. Пролётова Н.В., Поляков А.В. Реакция льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) в культуре пыльников на концентрацию в питательной среде регуляторов роста и аминокислот // Современные проблемы льноводства на Северо-Западе России: Материалы научно-практической конференции. – Псков: РАСХН, 2000. – С. 32-33.

43. Рогова Е.А. Методы отбора в первичном семеноводстве льна-долгунца и направления их совершенствования // Научные разработки селекционера – льноводству. – Тверь: ТвГУ, 2013. – С. 57-59.

44. Рожмина Т. А., Кишлян Н. В., Голубева Л. М., Киселева Т. С. Основные направления и результаты изучения генофонда льна во ВНИИЛ // Научные достижения – льноводству. Материалы научно-практической конференции: «Основные результаты и направления развития научных исследований по льну-долгунцу», посвященной 80-летию образования ВНИИ льна. – Тверь, 2010. – С. 21–29.

45. Рожмина Т.А., Лошакова Н.И. Новая технология создания сортов льна-долгунца, устойчивых к фузариозному увяданию // Научные разработки селекционера - льноводству. – Тверь, 2013. – С. 43-44.

46. Рожмина Т.А., Мельникова Н.В., Головлев М.Г., Смирнова М.И., Куземин И.А. Скрининг образцов генофонда льна на

устойчивость к неблагоприятным факторам // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – Т. 32. – № 10. – С. 11-14.

47. Рожмина Т.А., Понажев В.П. Состояние и перспективы развития льняного сектора России // Вестник РАЕН. – 2015. – № 15(1). – С. 59-63.

48. Сорокина О.Ю. Научное обоснование оптимальных параметров плодородия дерново-подзолистых почв и применение агрохимических средств при возделывании льна-долгунца в Центральном Нечерноземье // Автореф. дис. ... доктора с.-х. наук: 06.01.04. – Москва, 2007. – 42 с.

49. Сорокина О.Ю., Нечушкин С.М. Роль катионов кальция, магния и кислотности почвы в продуктивности льна-долгунца // Агрохимия. – 2005. – №10. – С. 13-17.

50. Тихвинский С.Ф., Доронин С.В., Дудина А.Н., Лыбенко Е.С., Леконцева Т.А. О селекции сортов льна с маркерными морфологическими признаками // Селекция и семеноводство. – 2006. – №1. – С. 16-19.

51. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю., Кузьменко Н.Н. Агрохимические аспекты проблемы повышения качества льнопродукции // Проблемы повышения технологического качества льна-долгунца: Материалы Международной научно-практической конференции (2-3 ноября 2004 г.). – Торжок, 2005. – С. 133-136.

52. Шиндин А.П. Лен. Технологии возделывания и защиты от вредных организмов. – М.: ООО НПО «РосАгроХим», 2012. – 144 с.

53. Nahar K., Hasanuzzaman M., Suzuki T., Fujita M. Polyamines induced aluminum tolerance in mung bean: A study on antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems // Ecotoxicology. – 2017. – No. 26(1). – P. 58-73.

54. Zhao X., Chen Q., Wang Y., Shen Z., Shen W., Xu X. Hydrogen rich water induces aluminum tolerance in maize seed-lings by enhancing antioxidant capacities and nutrient homeostasis // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2017. – No. 144. – P. 369-379.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ерофеева Вероника Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» – обособленное подразделение Смоленский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, д. 21, ул. Нахимова, г. Смоленск, Российская Федерация, 214025, e-mail: v.erofeeva.sml@fncl.ru.

Пролётова Наталья Викторовна, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» – обособленное подразделение Научно-исследовательский институт льна, д. 35, ул. Луначарского, г. Торжок, Тверская область, Российская Федерация, 172002, e-mail: n.proletova.trk@fncl.ru

Veronika S. Erofeeva, junior researcher, Federal Research Center for Bast Crops – Separate Suidivision Smolensk Research Institute of Agriculture, 21, Nakhimov st., Smolensk, Russian Federation, 214025, e-mail: v.erofeeva.sml@fncl.ru.

Natalya V. Proletova, PhD in Biological Sciences, leading researcher, Federal Research Center for Bast Crops - Separate Subdivision of the Scientific Research Institute of Flax, 35, Lunacharsky st., Torzhok, Tver region, Russian Federation, 172002, e-mail: n.proletova.trk@fncl.ru