

EDN PVMNIB

DOI 10.5281/zenodo.17276545

УДК 582.635.3:57.085.2

Молканова О. И., Крахмалева И. Л.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ КЛОНАЛЬНОГО
МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СОРТОВ *FICUS*
ELASTICA ROXB. EX HORNEM.**

ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН»

Реферат. *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem. является ценным декоративным растением, используемым для озеленения в открытом грунте и комнатной культуре. Для ускоренного воспроизводства и сохранения ценных сортов данной культуры актуальным является применение биотехнологических методов размножения. Целью исследования была оптимизация некоторых этапов клонального микроразмножения перспективных сортов *F. elastica* Belize и *Schrijveriana*. Исследования проводили в 2024–2025 гг. в лаборатории биотехнологии растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН. На этапе введения в культуру *in vitro* установлен эффективный способ стерилизации эксплантов, состоящий из последовательного применения 7 % раствора «Фундазола» в течении 2–3 минут, 70 % раствора этанола – 30 секунд и 3 % раствора «Лизоформина 3000» – 5–7 минут. Число жизнеспособных эксплантов достигало 73–83 %. На этапе собственно микроразмножения определено влияние регуляторов роста (0,5 мг/л 6-бензиламинопурина (6-BAР), 0,5 мг/л метатополина (mT) и 0,25 мг/л mT с 0,25 мг/л тидиазурона (TDZ)) и гелеобразующих компонентов (6,8 г/л агар-агара и 3,0 г/л гельрайта) на регенерационный потенциал исследуемых сортов *F. elastica*. Установлено, что добавление mT в питательную среду Murashige and Skoog (MS, 1962) способствовало увеличению коэффициента размножения в 1,5–2,6 раза, который составил $8,9 \pm 0,7$ у сорта Belize и $11,1 \pm 1,5$ у сорта *Schrijveriana*. Выявлено, что культивирование на питательных средах с TDZ вызвало ряд морфологических изменений у эксплантов, что отрицательно влияло на их дальнейшее микроразмножение и укоренение. Установлена эффективность замены гелеобразующего компонента агар-агара на гельрайт в питательной среде MS на этапе собственно микроразмножения. На средах с гельрайтом высота микропобегов была больше в 1,6–2,0 раза, а наибольших значений этот показатель достигал при добавлении 0,5 мг/л mT ($1,9 \pm 0,4$ см у сорта Belize и $1,6 \pm 0,2$ см у сорта *Schrijveriana*).

Ключевые слова: *Ficus elastica*, клональное микроразмножение, гелеобразующие компоненты, регуляторы роста, коэффициент размножения.

Для цитирования: Молканова О. И., Крахмалева И. Л. Оптимизация основных этапов клонального микроразмножения перспективных сортов *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem. // Таврический вестник аграрной науки. 2025. № 3(43). С. 182–193. EDN: PVMNIB. DOI: 10.5281/zenodo.17276545.

For citation: Molkanova O. I., Krakhmaleva I. L. Optimisation of the main micropropagation stages for promising *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem. cultivars // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2025. No. 3 (43). P. 182–193. EDN: PVMNIB. DOI: 10.5281/zenodo.17276545.

Введение

Ficus elastica Roxb. ex Hornem. относится к роду *Ficus* Tourn. ex L. семейству Moraceae Gaudich. Род *Ficus* впервые выделен Карлом Линнеем в 1753 г. и в настоящее время род включает 881 вид [1]. *F. elastica* – декоративное растение,

происходящее из тропической Азии: Непала, Бутана, Бирмы, Явы и Индии. В природе фикус – вечнозеленое дерево высотой до 30 м, с коричневым шероховатым стволом, растет в основном во влажных тенистых и заболоченных лесах. Листья крупные (до 30 см длиной), кожистые, блестящие, разнообразной окраски, удлинённо-овальные, с четкой центральной жилкой [2]. Фикус каучуконосный (*F. elastica*) свое название получил из-за того, что в его млечном соке (латексе) содержится каучук [3]. Растение достаточно популярно благодаря всесезонной декоративности и неприхотливости – его широко используют для озеленения парков и улиц в районах с положительными зимними температурами. *F. elastica* считается одним из наиболее распространенных и старейших видов фикусов в комнатной культуре, который на протяжении многих десятилетий является неотъемлемым элементом интерьеров жилых помещений, офисов и зимних садов [4]. При выращивании *F. elastica* улучшается микроклимат помещения в связи с тем, что он обладает выраженной фитонцидной активностью, очищая воздух от патогенных микроорганизмов, и фармакологическим эффектом, выделяя такие летучие метаболиты как изопрен, альфа и бета пинен, сабинен, терпинен, терпинеол и оцимен [5, 6].

Основным способом размножения фикусов является черенкование, однако этот процесс достаточно трудоемок, что связано с высокими затратами на выращивание маточных растений, с которых берутся черенки, и малым выходом укорененных растений [7, 8]. Одним из эффективных путей устойчивого воспроизводства и сохранения ценных образцов растений разных таксономических групп является использование биотехнологических методов [9]. Первые исследования в области культуры органов и тканей представителей рода *Ficus* начаты в 70–80 гг. прошлого столетия [10, 11]. Митрофанова И.В. отмечает, что частота получения стерильной культуры представителей рода *Ficus* составляет 45–50 % [12]. Проблема получения асептической культуры *F. elastica* возможно связана с тем, что исходные растения содержат латекс, который повышает уровень контаминации эксплантов. Вместе с тем, в работе Mokshin E. V. с соавторами показано, что при введении в культуру *in vitro* *F. elastica* важным является правильный подбор концентрации стерилизующего раствора (хлорамина 2–6 %) и экспозиции (5–15 минут). Частота полученной стерильной культуры, по результатам Mokshin E. V., варьировала от 20 до 100 % [13]. В дальнейшем было проведено значительное число исследований по изучению влияния условий культивирования и составов питательных сред на всех этапах клонального микроразмножения для увеличения коэффициента размножения и получения здорового посадочного материала представителей рода *Ficus* [12–17]. Однако, работы, посвящённые особенностям размножения *F. elastica* в культуре *in vitro*, представлены в немногочисленных статьях [13, 14, 17]. Помимо этого, протокол клонального микроразмножения может отличаться в зависимости от сортовых особенностей растений, что отмечается во многих исследованиях [12, 18]. Поэтому **цель исследований** – оптимизация некоторых этапов клонального микроразмножения перспективных сортов *F. elastica*.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в лаборатории биотехнологии растений ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН» (ГБС РАН) в 2024–2025 гг. Объектами исследования были сорта *F. elastica* Belize и Schrijveriana.

Сорт Belize был получен в результате почковой мутации сорта Tineke в Нидерландах в 1999 г. Листья простые, эллиптической формы с заостренной верхушкой, гладкие, кожистые, длиной до 23 см, шириной – до 13 см, пестрые, в центре со светло- и темно-зелеными вкраплениями, по краю зелено-кремовые

с розовым оттенком. Жилки листа и черешок красного оттенка. В помещении вырастает до 6 м (рисунок 1А).

Сорт Schrijveriana был получен в Бельгии в 1959 г. Листья простые, эллиптической формы с заостренной верхушкой, гладкие, кожистые, длиной до 26 см, шириной – до 18 см, салатового цвета с зелеными и серыми мраморными вкраплениями, ближе к краю желтого оттенка. Центральная жилка с нижней стороны листа и черешок могут приобретать красноватый оттенок. При выращивании в помещении достигает 4 м (рисунок 1Б).

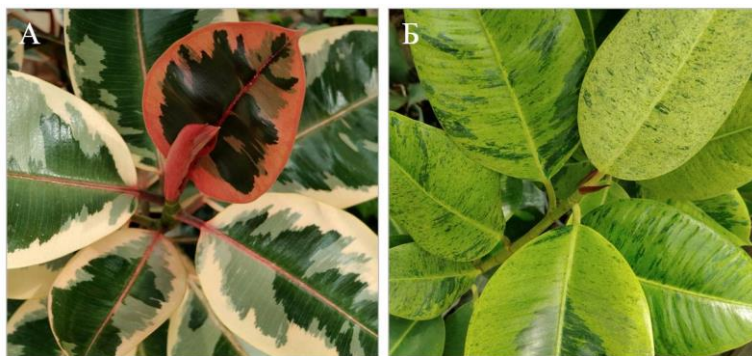


Рисунок 1 – Донорные растения *F. elastica*: А – сорт Belize, Б – сорт Schrijveriana

В процессе проведения биотехнологических исследований применяли общепринятые [19] и разработанные в лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН [9] приемы работы с культурами изолированных тканей и органов растений.

В качестве первичных эксплантов использовали меристемы с двумя примордиальными листьями, которые вычленили из вегетативных почек исходных растений, выращиваемых в условиях фитотрона. Для поверхностной стерилизации последовательно использовали 7 % раствор фунгицида «Фундазол» в экспозиции 2–3 минуты, 70 % раствор этанола (C_2H_6O) – 30 секунд. Исследовали разные стерилизующие агенты: 7 % раствор гипохлорита кальция ($Ca(ClO)_2$) в экспозиции 5–10 минут, 5 % раствор гипохлорита натрия ($NaClO$) – 5–10 минут или 3 % раствор «Лизоформин 3000» – 5–7 минут. Этап инициации проводили на питательной среде Murashige and Skoog (MS, 1962) [20] с добавлением 30 г/л сахарозы, 6,8 г/л агар-агара (Roeper, Германия) и 0,3 мг/л 6-бензиламинопурина (6-BAР) (Sigma, США). Для повышения эффективности стерилизации некоторые экспланты культивировали в течение 10 дней на питательной среде MS с добавлением 0,25 мг/л антибиотика «Gentamicin» (Gibco, США). Через 30 суток проводили учет жизнеспособных эксплантов.

На этапе собственно микроразмножения использовали питательную среду MS с добавлением регуляторов роста (0,5 мг/л 6-BAР, 0,5 мг/л метатополина (mT) (Duchefa, Нидерланды), 0,25 мг/л mT с 0,25 мг/л тидиазулона (TDZ) (Duchefa, Нидерланды)) и гелеобразующих компонентов (6,8 г/л агар-агара и 3,0 г/л гельрайта (Duchefa, Нидерланды)). Контролем служила питательная среда с добавлением 6,8 г/л агар-агара и 0,5 мг/л 6-BAР.

Условия культивирования эксплантов: освещение 3000–3500 лк, 16-часовой фотопериод и температура 23 ± 2 °С. Исследования проводили в трех повторностях, по 10 эксплантов в каждом варианте. Через 45 суток культивирования учитывали морфометрические показатели эксплантов (число и высоту микропобегов, число узлов на микропобеге) и на основе этого рассчитывали коэффициент размножения (как произведение числа микропобегов на эксплант на число узлов на микропобеге).

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета программ PAST 4.0, SPSS Statistics 23 и Microsoft Office Excel 2016. Достоверность различий между вариантами рассчитывали по дисперсионному анализу (ANOVA) и множественному ранговому критерию Дункана при $p < 0,05$. В таблицах представлены средние значения и их стандартные ошибки ($\pm$).

Результаты и их обсуждение

Получение стерильной культуры является сложным и ответственным этапом технологии клонального микроразмножения [21, 22]. В нашем исследовании установлено, что оптимальной была ступенчатая стерилизация эксплантов, состоящая из обработки 7 % раствором «Фундазола» в течение 2–3 минут, 70 % раствором этанола – 30 секунд, 3 % «Лизоформин 3000» – 5–7 минут. Экспланты начинали развиваться через 10–14 суток после помещения на питательную среду. Отмечено множественное побегообразование у 73–83 % эксплантов. При введении меристем у исследуемых сортов *F. elastica* на этапе индукции не выявлено достоверных различий по морфометрическим показателям их развития. Частота регенерации эксплантов достигала 80–83 % в зависимости от сорта. Добавление 0,25 мг/л антибиотика «Gentamicin» в питательную среду значительно уменьшало (на 30–45 %) количество инфицированных эксплантов.

Выявлено, что применение в качестве стерилизующих веществ гипохлорита натрия и гипохлорита кальция оказалось малоэффективным – уровень контаминации был достаточно высоким (50–65 %) и только 15–17 % стерильных эксплантов в дальнейшем образовывали микропобеги.

В культуре *in vitro* реализация морфогенетического потенциала растений зависит от многих факторов (генотип, строение экспланта, состав питательной среды, условия культивирования), которые могут быть взаимосвязаны между собой. Основной характеристикой регенерационных процессов развития эксплантов является число сформированных микропобегов. Увеличение регенерационного потенциала растений на этапе собственно микроразмножения является одной из основных задач биотехнологического цикла [9, 23].

Исследования были направлены на выявление действия 6-BAР, mT и TDZ, способных индуцировать процесс прямой регенерации микропобегов *F. elastica*. Выявлено, что регенерационный потенциал сортов Belize и Schrijveriana зависел от регуляторов роста и их комбинаций в питательной среде. При этом реакция на применяемые регуляторы роста у исследуемых сортов *F. elastica* не различалась (таблица 1, рисунок 2).

Установлено, что культивирование на питательных средах с добавлением 0,5 мг/л mT стимулировало образование адвентивных микропобегов у основания эксплантов и активизацию развития почек у микропобегов, что способствовало увеличению коэффициента размножения обоих сортов фикуса каучуконосного в 1,5–2,6 раза, по сравнению со средами с 0,5 мг/л 6-BAР и сочетанием 0,25 мг/л mT с 0,25 мг/л TDZ. Эффективность культивирования на питательных средах с добавлением mT была показана на представителях других родов, таких как *Actinidia* Lindl., *Malus* Mill., *Oxystelma* R. Br., *Zephyranthes* Herb. [24–28]. При культивировании на средах с добавлением mT происходит снижение появления морфологических и физиологических отклонений, увеличение регенерации растений и фитохимических показателей эксплантов, по сравнению с выращиванием на питательных средах с добавлением других регуляторов роста [24, 28].

Применение TDZ индуцировало прямой морфогенез с развитием адвентивных почек и структур, которые по морфологии были похожи на соматические эмбриониды. На питательной среде с добавлением 0,25 мг/л mT + 0,25 мг/л TDZ были получены

конгломераты сросшихся укороченных видоизмененных микропобегов (до 0,3 см), которые были перенесены на безгормональную питательную среду для удлинения микропобегов. Однако, это оказалось малорезультативным – только 30 % из посаженных эксплантов развивались в микропобеги (рисунок 3).

Таблица 1 – Морфометрические показатели сортов *F. elastica* на этапе собственно микроразмножения при применении регуляторов роста в питательной среде MS

Сорт	Регулятор роста	Число микропобегов, шт.	Высота микропобегов, см	Число междоузлий, шт.	Коэффициент размножения
Belize	0,5 мг/л 6-BAП (контроль)	4,0 ± 0,3 b*	0,9 ± 0,2 a	1,5 ± 0,1 a	6,1 ± 0,4 b
	0,5 мг/л mT	5,6 ± 0,4 a	0,9 ± 0,1 a	1,6 ± 0,1 a	8,9 ± 0,7 a
	0,25 мг/л mT + 0,25 мг/л TDZ	5,5 ± 0,3 a	0,1 ± 0,0 b	1,0 ± 0,0 b	5,5 ± 0,3 b
Schrijveriana	0,5 мг/л 6-BAП (контроль)	3,4 ± 0,3 b	0,7 ± 0,1 a	1,4 ± 0,1 a	4,7 ± 0,5 b
	0,5 мг/л mT	8,3 ± 1,3 a	0,8 ± 0,1 a	1,4 ± 0,1 a	11,1 ± 1,5 a
	0,25 мг/л mT + 0,25 мг/л TDZ	4,3 ± 0,8 b	0,2 ± 0,0 b	1,0 ± 0,0 b	4,3 ± 0,8 b

Примечание. * – Разные буквы указывают на значительные различия между используемыми регуляторами роста для каждого сорта по множественному ранговому критерию Дункана ($p < 0,05$).



Рисунок 2 – Развитие микропобегов сорта Schrijveriana на этапе собственно микроразмножения на питательных средах MS с добавлением: А – 0,5 мг/л 6-BAП (контроль), Б – 0,5 мг/л mT, В – 0,25 мг/л mT + 0,25 мг/л TDZ (масштаб 1,0 см)

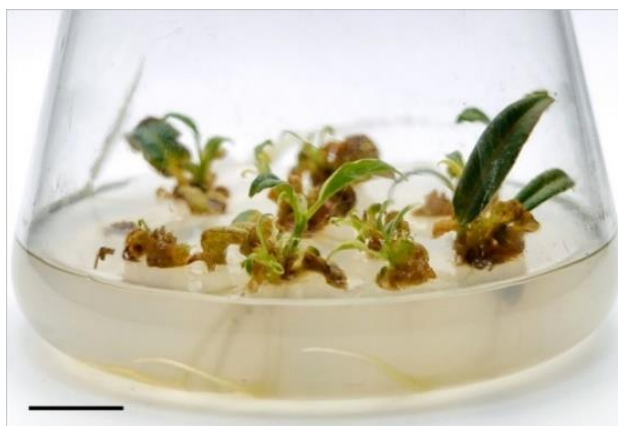


Рисунок 3 – Развитие эксплантов сорта Belize на безгормональной питательной среде MS после культивирования на средах MS с добавлением 0,25 мг/л mT и 0,25 мг/л TDZ (масштаб 1,0 см)

В научной литературе подтверждается, что культивирование на средах с TDZ является менее эффективным по сравнению со средами с добавлением других регуляторов роста, а у некоторых культур даже вызывает морфологические изменения [18, 29].

Выявлено, что исследуемые сорта *F. elastica* различались по интенсивности регенерации в зависимости от состава питательной среды. При культивировании на питательной среде с 0,5 мг/л mT сорт Schrijveriana характеризовался большим коэффициентом размножения (в 1,2 раза), по сравнению с Belize. В то время, как у сорта Belize больший коэффициент размножения (в 1,3 раза) отмечали на средах с 0,5 мг/л 6-ВАР и сочетанием 0,25 мг/л mT с 0,25 мг/л TDZ.

Свойства, качество и концентрация гелеобразующего компонента в питательной среде непосредственно влияют на интенсивность регенерации и морфологические особенности микропобегов, формирование корневой системы и дальнейшую адаптацию [30–32]. Питательные среды могут быть твердыми, полутвердыми и жидкими. Для приготовления питательной среды наиболее часто используют агар-агар, что связано с его высокой устойчивостью к метаболизму с компонентами среды и стабильностью в широком диапазоне температур. Агар-агар представляет собой смесь полисахаридов (агарозы и агаропектина) которые получают из красных водорослей *Gelidium amansii*. В качестве гелеобразующего компонента также используют гельрайт – очищенный полисахарид, содержащий минимальное количество примесей, который получают из бактерии *Sphingomonas elodea*. Гельрайт устойчив к нагреванию и широкому диапазону pH среды, характеризуется высоким уровнем прозрачности и добавляется в питательную среду в концентрации в 2–3 раза меньшей (2–3 г) по сравнению с агар-агаром (6–7 г), что может увеличить экономическую эффективность клонального микроразмножения [23, 33, 34].

В нашем исследовании установлено существенное влияние гелеобразующих компонентов в зависимости от применяемых регуляторов роста на морфометрические показатели сортов *F. elastica* (таблица 2, рисунок 4).

Таблица 2 – Морфометрические показатели сортов *F. elastica* на этапе собственно микроразмножения при применении разных гелеобразующих компонентов и регуляторов роста в питательной среде MS

Сорт	Гелеобразующий компонент	Регулятор роста	Число микропобегов, шт.	Высота микропобегов, см	Коэффициент размножения
Belize	6,8 г/л, агар-агар	0,5 мг/л 6-ВАР (контроль)	6,7 ± 0,4 а*	0,6 ± 0,1 с	8,3 ± 0,4 b
		0,5 мг/л mT	6,6 ± 0,5 а	0,9 ± 0,1 с	10,3 ± 0,7 а
	3,0 г/л, гельрайт	0,5 мг/л 6-ВАР	5,8 ± 0,3 а	1,2 ± 0,1 b	9,8 ± 0,4 а
		0,5 мг/л mT	3,5 ± 0,5 b	1,9 ± 0,4 а	6,9 ± 0,7 с
Schrijveriana	6,8 г/л, агар-агар	0,5 мг/л 6-ВАР (контроль)	4,3 ± 0,6 с	0,7 ± 0,1 с	6,1 ± 0,9 b
		0,5 мг/л mT	6,5 ± 0,8 а	1,0 ± 0,1 b	11,5 ± 2,3 а
	3,0 г/л, гельрайт	0,5 мг/л 6-ВАР	5,6 ± 0,6 b	1,2 ± 0,1 b	10,0 ± 0,9 а
		0,5 мг/л mT	5,4 ± 0,8 b	1,6 ± 0,2 а	11,7 ± 1,9 а

Примечание. * – Разные буквы указывают на значительные различия между используемыми гелеобразующими компонентами и регуляторами роста для каждого сорта по множественному ранговому критерию Дункана ($p < 0,05$).

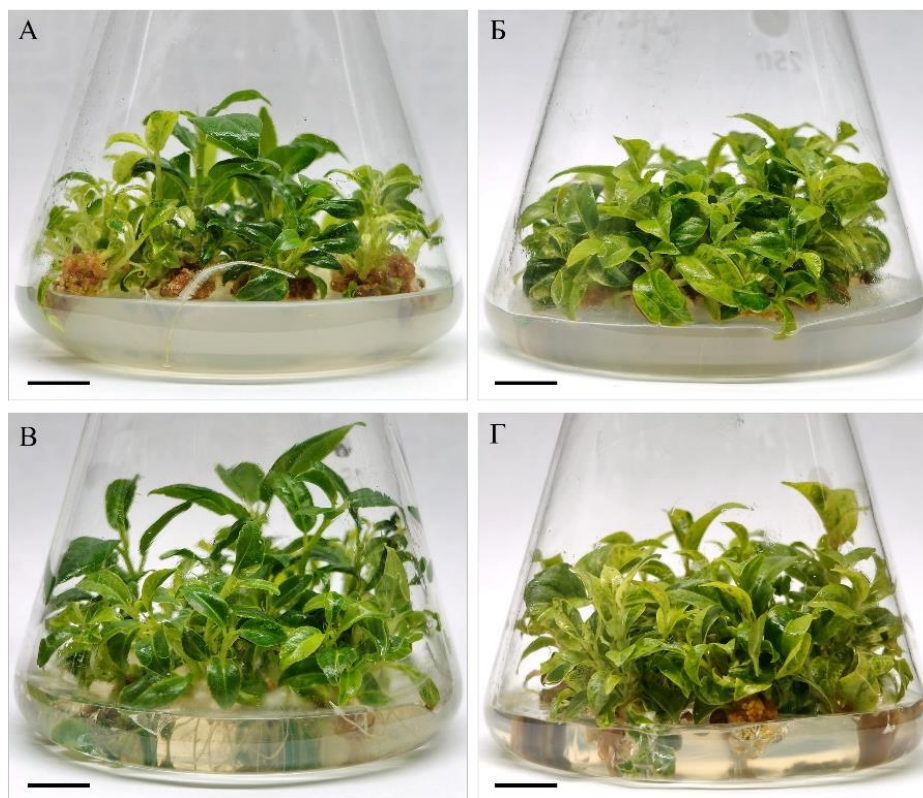


Рисунок 4 – Развитие микропобегов сорта Schrijveriana на этапе собственно микроразмножения на питательных средах MS с добавлением: А – 6,8 г/л агара с 0,5 мг/л 6-ВАР (контроль), Б – 6,8 г/л агара с 0,5 мг/л mT, В – 3,0 г/л гелльрайта с 0,5 мг/л 6-ВАР, Г – 3,0 г/л гелльрайта с 0,5 мг/л mT (масштаб 1,0 см)

Выявлено, что на питательной среде с добавлением гелльрайта микропобеги у исследуемых сортов *F. elastica* были выше в 1,6–2,0 раза по сравнению с культивированием на средах с добавлением агара-агара, независимо от используемых регуляторов роста. При этом наибольшие значения высоты ($1,9 \pm 0,4$ и $1,6 \pm 0,2$ см) отмечали на средах с гелльрайтом при добавлении mT. Анализ действия регуляторов роста на коэффициент размножения при использовании разных гелеобразующих компонентов показал, что на средах с агара-агаром коэффициент размножения был больше в 1,2–1,9 раза при добавлении mT, а на средах с гелльрайтом – с 6-ВАР (в 1,5 раза у сорта Belize) или не отличался ($10,0 \pm 0,9$ и $11,7 \pm 1,9$ у сорта Schrijveriana).

Исследования показали, что увеличение продолжительности культивирования эксплантов (до 45 суток) повышало частоту регенерации сортов *F. elastica* за счет развития адвентивных почек и удлинения междоузлий. Установлено, что исследуемые сорта *F. elastica* легко укоренились без применения ауксинов – через 25–40 суток при культивировании на средах с низкой концентрацией 6-ВАР (0,1–0,3 мг/л) у 90–100 % эксплантов отмечали спонтанный ризогенез. Наличие спонтанного корнеобразования делает технологический процесс клонального микроразмножения фикусов более эффективным. На этапе ризогенеза экспланты на питательных средах $\frac{1}{2}$ MS с 0,3–0,5 мг/л индолил-3-уксусной кислотой укоренялись уже через 10–14 суток. Процент укоренения составил в зависимости от генотипа от 90 до 100 %. Впоследствии регенеранты успешно адаптировались к условиям *ex vitro* (более 90 % адаптированных растений) на питательном субстрате, состоящем из торфа и перлита (в соотношении 3:1). Результаты демонстрируют высокий регенерационный потенциал изучаемых сортов *F. elastica* на всех этапах клонального микроразмножения.

Выводы

В ходе исследования были оптимизированы некоторые этапы культивирования *in vitro* перспективных сортов *F. elastica*. Выявлено, что на получение стерильной культуры *F. elastica* оказывает влияние тип стерилизующего агента, а на регенерацию эксплантов – регулятор роста и гелеобразующий компонент.

Для получения стерильной культуры *F. elastica* оптимальной была последовательная стерилизация эксплантов в 7 % растворе «Фундазола» с экспозицией 2–3 минуты, 70 % растворе этанола в течение 30 секунд и 3 % растворе «Лизоформина 3000» – 5–7 минут. Число жизнеспособных эксплантов при этом составило 73–83 %.

На этапе собственно микроразмножения установлено, что культивирование эксплантов на питательных средах содержащих 0,5 мг/л mT стимулировало образование адвентивных микропобегов у основания эксплантов и активизацию развития почек у микропобегов, что приводило к увеличению коэффициента размножения в 1,5–2,6 раза. Коэффициент размножения у сорта Belize составил $8,9 \pm 0,7$, у сорта Schrijveriana – $11,1 \pm 1,5$.

Выявлено, что использование питательных сред с 0,25 мг/л mT совместно с 0,25 мг/л TDZ для микроразмножения сортов *F. elastica* было не эффективным. На питательных средах с TDZ образовывались сросшиеся укороченные микропобеги с измененной морфологией, 30 % которых в дальнейшем развивались в нормально сформированные микропобеги.

Культивирование на питательных средах с добавлением 3,0 г/л гелларита способствовало увеличению высоты микропобегов в 1,6–2,0 раза. Отмечено, что наибольшей высоты микропобеги сортов *F. elastica* достигали на средах с гелларитом при добавлении 0,5 мг/л mT – $1,9 \pm 0,4$ см у сорта Belize и $1,6 \pm 0,2$ см – у сорта Schrijveriana.

Литература

1. POWO. Plants of the World Online. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:327905-2> (дата обращения 24.04.2025).
2. Ниссен Д. Комнатные растения, практическая энциклопедия. М.: Мир книги, 2006. 288 с.
3. Кулуев Б. Р., Гарафутдинов Р. Р., Максимов И. В., Сагитов А. М., Чемерис Д. А., Князев А. В., Вершинина З. Р., Баймиев Ан. Х., Мулдашев А. А., Баймиев Ал. Х., Чемерис А. В. Натуральный каучук, его источники и составные части // Биомика. 2015. Т. 7(4). С. 224–283.
4. Чекурова Г. В. Фикус. М: Из-во «Кладезь-Букс», 2004. 95 с.
5. Миронова Ю. В. Биологические основы использования фитонцидных растений в озеленении детских учреждений. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Белгород: НИУ БелГУ, 2011. 22 с.
6. Стрельников И. И., Глухов А. З., Николаева А. В. Потенциальное терапевтическое действие летучих выделений представителей рода *Ficus* L. // Промышленная ботаника. 2017. Вып. 17. С. 72–79.
7. Nazari F., Rahimi E. Rooting and shoot growth of soft-wood cutting of rubber fig (*Ficus elastica* Roxb. ex Hornem) in response to indole butyric acid and paclobutrazol // Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology). 2019. Vol. 31(4). P. 972–982.
8. Shamsuddin M. S., Shahari R., Amri C. N. A. C., Tajudin N. S., Mispan M. R., Salleh M. S. Early development of fig (*Ficus carica* L.) root and shoot using different propagation medium and cutting types // Tropical Life Sciences Research. 2021. Vol. 32(1). P. 83–90. DOI: 10.21315/tlsr2021.32.1.5.
9. Молканова О. И., Королева О. В., Стахеева Т. С., Крахмалева И. Л., Мелешук Е. А. Совершенствование технологии клонального микроразмножения ценных плодовых и ягодных культур для производственных условий // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32(9). С. 66–69. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10915.
10. Debergh P. De Wael J. Mass propagation of *Ficus lyrata* // Acta Horticulturae. 1977. Vol. 78. P. 361–364. DOI: 10.17660/ActaHortic.1977.78.45.
11. Muriithi L. M., Rangan T. S., Waite B. H. *In vitro* propagation of fig through shoot tip culture // HortScience. 1982. Vol. 17(1). P. 86–87. DOI: 10.21273/HORTSCI.17.1.86.

12. Митрофанова И. В. Соматический эмбриогенез и органогенез как основа биотехнологии получения и сохранения многолетних садовых культур. Киев: Аграрна наука, 2011. 344 с.
13. Mokshin E. V., Lukatkin A. S., da Silva J. T. Aseptic culture and simple, clonal micropropagation of *Ficus elastica* Roxb. // *Floriculture and Ornamental Biotechnology*. 2008. Vol. 2(2). P. 52–54.
14. Черевченко Т. М., Лаврентьева А. Н., Иванников Р. В. Биотехнология тропических и субтропических растений *in vitro*. Киев: Наукова думка, 2008. 560 с.
15. Li X., Li Q., Cui Y., Liu T., Zhang Y. Establishment of tissue culture regeneration system of *Ficus tikoua* // *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 2024. Vol. 60(2). P. 194–201. DOI: 10.1007/s11627-024-10414-3.
16. Bayoudh C., Haouala F., Mars M. Micropropagation and *in vitro* sanitation of fig (*Ficus carica* L.) – a review // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2024. Vol. 71. Art. No. 103. DOI: 10.1134/S1021443724605585.
17. Миронова Ю. В., Сорокопудова О. А. Биологические особенности размножения некоторых представителей рода *Ficus* L. в культуре *in vitro* // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2011. № 15–2(104). С. 16–20.
18. Хромова Т. М., Ташматова Л. В., Мацнева О. В. Применение различных регуляторов роста при клональном микроразмножении смородины черной (*Ribes nigrum* L.) // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 1. С. 30–34. DOI: 10.31857/S2500208224010071.
19. Бутенко Р. Г. Биология культивируемых клеток и биотехнология растений. М.: Наука, 1991. 279 с.
20. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures // *Physiologia Plantarum*. 1962. Vol. 15(3). P. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
21. Маркова М. Г., Сомова Е. Н. Регенерационная способность *Cerasus fruticosa* и *Prunus domestica* в культуре *in vitro* // Аграрный вестник Урала. 2021. № 6 (209). С. 43–52. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-209-06-43-52.
22. Кухат О., Нгуен Х. Т., Калашникова Е. А., Киракосян Р. Н. Экспериментальный морфогенез *Atomum tsao-ko* Crevost & Lemarie в культуре *in vitro* // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2022. Т. 25(7). С. 48–59. DOI: 10.29296/25877313-2022-07-08.
23. Şaşkın N., Ak B. E., Ekinci H. The usage of node culture *in vitro* conditions // 5th International Agriculture Congress, 2022. P. 90–99.
24. Jayaprakash K., Manokari M., Badhepuri M. K., Raj M. C., Dey A., Shekhawat M. S. Influence of meta-topolin on *in vitro* propagation and foliar micro-morpho-anatomical developments of *Oxystelma esculentum* (Lf) Sm. // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2021. Vol. 147. P. 325–337. DOI: 10.1007/s11240-021-02126-y.
25. Семенова Д. А., Крахмалева И. Л., Мишанова Е. В., Молканова О. И., Митрофанова И. В. Особенности регенерации перспективных сортов *Actinidia arguta* в культуре *in vitro* // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 1(33). С. 93–103. DOI: 10.5281/zenodo.7898485.
26. Krakhmaleva I. L., Molkanova O. I., Orlova N. D., Koroleva O. V., Mitrofanova I. V. *In vitro* morpho-anatomical and regeneration features of cultivars of *Actinidia kolomikta* (Maxim.) Maxim // *Horticulturae*. 2024. Vol. 10(12). Art. No. 1335. DOI: 10.3390/horticulturae10121335.
27. Abdalla N., Dobránszki J. Meta-topolin as an effective benzyladenine derivative to improve the multiplication rate and quality of *in vitro* axillary shoots of Húsvéti rozmaring apple scion // *Plants*. 2024. Vol. 13. Art. No. 1568. DOI: 10.3390/plants13111568.
28. Verma V., Thakur D., Bhargava B. Dual role of meta-topolin in mediating *in vitro* propagation and phytochemical elicitation in *Zephyranthes grandiflora* // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2025. DOI: 10.1007/s00344-025-11712-9.
29. Grzegorzczak-Karolak I., Hnatuszko-Konka K., Krzemińska M., Olszewska M. A., Owczarek A. Cytokinin-based tissue cultures for stable medicinal plant production: regeneration and phytochemical profiling of *Salvia bulleyana* shoots // *Biomolecules*. 2021. Vol. 11. Art. No. 1513. DOI: 10.3390/biom11101513.
30. Григолова Т. Р., Вишнякова А. В., Зубко О. Н., Монахос С. Г., Монахос Г. Ф. Влияние гелеобразователя питательной среды на эмбрио- и каллусогенез в культуре изолированных семязачатков свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.) // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2021. № 6. С. 32–41. DOI: 10.26897/0021-342X-2021-6-32-41.
31. Asayesh Z. M., Aliniaefard S., Vahdati K. Stomatal morphology and desiccation response of Persian walnut tissue culture plantlets influenced by the gelling agent of *in vitro* culture medium // *Journal of Nuts*. 2021. Vol. 12(1). P. 41–52. DOI: 10.22034/jon.2021.1922749.1105.

32. Choi M., Kim H. H., Seo H., Sathasivam R., Kim J. K., Park S. U. Influence of medium and gelling agents concentration on *in vitro* rooting of *Polygonum tinctorium* // Journal of Phytology. 2024. Vol. 16. P. 8–12. DOI: 10.25081/jp.2024.v16.8793.
33. Madzikane O., Gebashe F. C., Amoo S. O. Use of alternative components in cost-effective media for mass production of clonal plants // In book: Commercial scale tissue culture for horticulture and plantation crops / Ed. by Gupta S., Chaturvedi P. Singapore: Springer, 2022. P. 49–64. DOI: 10.1007/978-981-19-0055-6_3.
34. Ahamad S. Optimization of low-cost media for plant tissue culture: a step towards the formulation of economical culture medium // Journal of Plant Biology and Crop Research. 2024. Vol. 7(1). Art. No. 1097. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meddocsonline.org/journal-of-plant-biology-and-crop-research/optimization-of-low-cost-media-for-plant-tissue-culture-a-step-towards.pdf> (дата обращения 24.04.2025).

References

1. POWO. Plants of the World Online. [Electronic resource]. Access point: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:327905-2> (reference's date 24.04.2025).
2. Nissen D. Houseplants, practical encyclopedia. Moscow: Mir Kinigi, 2006. 228 p.
3. Kuluev B. R., Garafutdinov R. R., Maksimov I. V., Sagitov A. M., Chemeris D. A., Knyazev A. V., Vershinina Z. R., Baymiev An. K., Muldashev A. A., Baymiev Al. K., Chemeris A. V. Natural rubber, its sources and components // Biomix. 2015. Vol. 7(4). P. 224–283.
4. Chekurova G. V. Ficus. Moscow: Publishing House 'Kladez-Books', 2004. 95 p.
5. Mironova Yu. V. Biological bases of the use of phytoncidal plants in the landscaping of children's institutions. Author's abstract of diss. ... Cand. Sc. (Biol.). Belgorod: National Research University "Belgorod State University" (BelSU), 2011. 22 p.
6. Strelnikov I. I., Glukhov A. Z., Nikolaeva A. V. Potential therapeutic effects of volatile compounds of genus *Ficus* L. representatives // Industrial botany. 2017. Iss. 17. P. 72–79.
7. Nazari F., Rahimi E. Rooting and shoot growth of soft-wood cutting of rubber fig (*Ficus elastica* Roxb. ex Hornem) in response to indole butyric acid and paclobutrazol // Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology). 2019. Vol. 31(4). P. 972–982.
8. Shamsuddin M. S., Shahari R., Amri C. N. A. C., Tajudin N. S., Mispan M. R., Salleh M. S. Early development of fig (*Ficus carica* L.) root and shoot using different propagation medium and cutting types // Tropical Life Sciences Research. 2021. Vol. 32(1). P. 83–90. DOI: 10.21315/tlsr2021.32.1.5.
9. Molkanova O. I., Koroleva O. V., Stacheeva T. S., Krakhmaleva I. L., Meleshchuk E. A. Improvement of clonal micropropagation technology of valuable fruit and berry crops varieties for commercial conditions // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2018. Vol. 32(9). P. 66–69. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10915.
10. Debergh P., De Wael J. Mass propagation of *Ficus lyrata* // Acta Horticulturae. 1977. Vol. 78. P. 361–364. DOI: 10.17660/ActaHortic.1977.78.45.
11. Muriithi L. M., Rangan T. S., Waite B. H. *In vitro* propagation of fig through shoot tip culture // HortScience. 1982. Vol. 17(1). P. 86–87. DOI: 10.21273/HORTSCI.17.1.86.
12. Mitrofanova I. V. Somatic embryogenesis and organogenesis as a basis for biotechnology of obtaining and preserving perennial horticultural crops. Kiev: Agrarna nauka, 2011. 344 p.
13. Mokshin E. V., Lukatkin A. S., da Silva J. T. Aseptic culture and simple, clonal micropropagation of *Ficus elastica* Roxb. // Floriculture and Ornamental Biotechnology. 2008. Vol. 2(2). P. 52–54.
14. Cherevchenko T. M., Lavrentyeva A. N., Ivannikov. R. V. Biotechnology of tropical and subtropical plants *in vitro*. Kiev: Naukova Dumka, 2008. 560 p.
15. Li X., Li Q., Cui Y., Liu T., Zhang Y. Establishment of tissue culture regeneration system of *Ficus tikoua* // In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant. 2024. Vol. 60(2). P. 194–201. DOI: 10.1007/s11627-024-10414-3.
16. Bayoudh C., Haouala F., Mars M. Micropropagation and *in vitro* sanitation of fig (*Ficus carica* L.) – a review // Russian Journal of Plant Physiology. 2024. Vol. 71. Art. No. 103. DOI: 10.1134/S1021443724605585.
17. Mironova Yu. V., Sorokopudova O. A. Biological features of reproduction of some representatives of sort *Ficus* L. in culture *in vitro* // Belgorod state university scientific bulletin. Natural sciences. 2011. No. 15–2(104). P. 16–20.
18. Khromova T. M., Tashmatova L. V., Matsneva O. V. Application of various growth regulators in clonal micropropagation of black currant (*Ribes nigrum* L.) // Vestnik of the Russian agricultural science. 2024. No. 1. P. 30–34. DOI: 10.31857/S2500208224010071.
19. Butenko R. G. Cultured cell biology and plant biotechnology. Moscow: Nauka, 1991. 279 p.

20. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures // *Physiologia Plantarum*. 1962. Vol. 15(3). P. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
21. Markova M. G., Somova E. N. Regeneration capacity of *Cerasus fruticosa* and *Prunus domestica* into the *in vitro* culture // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021. No. 6 (209). P. 43–52. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-209-06-43-52.
22. Quyet K. V., Nguyen H. T., Kalashnikova E. A., Kirakosyan R. N. Experimental morphogenesis of *Amomum tsao-ko* Crevost & Lemarie. *in vitro* culture // *Problems of biological, medical and pharmaceutical chemistry*. 2022. Vol. 25(7). P. 48–59. DOI: 10.29296/25877313-2022-07-08.
23. Şaşkın N., Ak B. E., Ekinçi H. The usage of node culture *in vitro* conditions // 5th International Agriculture Congress, 2022. P. 90–99.
24. Jayaprakash K., Manokari M., Badhepuri M. K., Raj M. C., Dey A., Shekhawat M. S. Influence of meta-topolin on *in vitro* propagation and foliar micro-morpho-anatomical developments of *Oxystelma esculentum* (Lf) Sm. // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2021. Vol. 147. P. 325–337. DOI: 10.1007/s11240-021-02126-y.
25. Semenova D. A., Krakhmaleva I. L., Mishanova E. V., Molkanova O. I., Mitrofanova I. V. Features of regeneration *in vitro* in promising *Actinidia arguta* cultivars // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2023. No. 1(32). P. 93–103. DOI: 10.5281/zenodo.7898485.
26. Krakhmaleva I. L., Molkanova O. I., Orlova N. D., Koroleva O. V., Mitrofanova I. V. *In vitro* morpho-anatomical and regeneration features of cultivars of *Actinidia kolomikta* (Maxim.) Maxim // *Horticulturae*. 2024. Vol. 10(12). Art. No. 1335. DOI: 10.3390/horticulturae10121335.
27. Abdalla N., Dobránszki J. Meta-topolin as an effective benzyladenine derivative to improve the multiplication rate and quality of *in vitro* axillary shoots of Húsvéti rozmaring apple scion // *Plants*. 2024. Vol. 13. Art. No. 1568. DOI: 10.3390/plants13111568.
28. Verma V., Thakur D., Bhargava B. Dual role of meta-topolin in mediating *in vitro* propagation and phytochemical elicitation in *Zephyranthes grandiflora* // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2025. DOI: 10.1007/s00344-025-11712-9.
29. Grzegorzczak-Karolak I., Hnatuszko-Konka K., Krzemińska M., Olszewska M. A., Owczarek A. Cytokinin-based tissue cultures for stable medicinal plant production: regeneration and phytochemical profiling of *Salvia bulleyana* shoots // *Biomolecules*. 2021. Vol. 11. Art. No. 1513. DOI: 10.3390/biom11101513.
30. Grigolava T. R., Vishnyakova A. V., Zubko O. N., Monakhos G. F., Monakhos S. G. Nutrient medium gelling agent effect on embryo- and callusogenesis in isolated ovules of red beet (*Beta vulgaris* L.) // *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2021. No. 6. P. 32–41. DOI: 10.26897/0021-342X-2021-6-32-41.
31. Asayesh Z. M., Aliniaiefard S., Vahdati K. Stomatal morphology and desiccation response of Persian walnut tissue culture plantlets influenced by the gelling agent of *in vitro* culture medium // *Journal of Nuts*. 2021. Vol. 12(1). P. 41–52. DOI: 10.22034/jon.2021.1922749.1105.
32. Choi M., Kim H. H., Seo H., Sathasivam R., Kim J. K., Park S. U. Influence of medium and gelling agents concentration on *in vitro* rooting of *Polygonum tinctorium* // *Journal of Phytology*. 2024. Vol. 16. P. 8–12. DOI: 10.25081/jp.2024.v16.8793.
33. Madzikane O., Gebashe F. C., Amoo S. O. Use of alternative components in cost-effective media for mass production of clonal plants // In book: *Commercial scale tissue culture for horticulture and plantation crops* / Ed. by Gupta S., Chaturvedi P. Singapore: Springer, 2022. P. 49–64. DOI: 10.1007/978-981-19-0055-6_3.
34. Ahamad S. Optimization of low-cost media for plant tissue culture: a step towards the formulation of economical culture medium // *Journal of Plant Biology and Crop Research*. 2024. Vol. 7(1). Art. No. 1097. [Electronic resource]. Access point: <https://meddocsonline.org/journal-of-plant-biology-and-crop-research/optimization-of-low-cost-media-for-plant-tissue-culture-a-step-towards.pdf> (reference's date 24.04.2025).

UDC 582.635.3:57.085.2

Molkanova O. I., Krakhmaleva I. L.

OPTIMISATION OF THE MAIN MICROPROPAGATION STAGES FOR PROMISING *FICUS ELASTICA* ROXB. EX HORNEM. CULTIVARS

Summary. *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem. is a valuable ornamental plant used for outdoor and indoor landscaping. The biotechnological approaches for the propagation of this species are relevant for the accelerated reproduction and preservation of its valuable cultivars. The study was aimed to optimize some micropropagation stages for the promising *F. elastica* cultivars 'Belize' and 'Schrijveriana'. The research was carried out in the

Laboratory of Plant Biotechnology, which is a structural unit of the Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences in 2024-2025. The effective sterilization method of explants was established; it consisted of sequential application of 7 % “Fundazol” (2–3 minutes), 70 % ethanol (30 seconds) and 3 % “Lysoformin 3000” (5–7 minutes). The number of viable explants reached 73–83 %. The regeneration potential of the *F. elastica* cultivars in response to the effect of different growth regulators (0.5 mg L^{-1} 6-benzylaminopurine (6-BAP), 0.5 mg L^{-1} meta-Topolin (mT) and 0.25 mg L^{-1} mT + 0.25 mg L^{-1} thidiazuron (TDZ)) and gelling agents (6.8 g L^{-1} agar-agar and 3.0 g L^{-1} gelrite) at the micropropagation stage was determined. The addition of mT into the Murashige and Skoog (MS, 1962) medium increased the multiplication rate of both *F. elastica* cultivars by 1.5–2.6 times (8.9 ± 0.7 for ‘Belize’ and 11.1 ± 1.5 for ‘Schrijveriana’). It was revealed that cultivation on media supplemented with TDZ led to morphological changes in explants, negatively affecting their subsequent micropropagation and rooting. The replacement of agar-agar with gelrite as the gelling agent in MS medium was found to be effective at the micropropagation stage – the microshoots were 1.6–2.0 times higher. The height of microshoots reached the highest values when cultivated on media supplemented with 0.5 mg L^{-1} mT ($1.9 \pm 0.4 \text{ cm}$ for ‘Belize’ and $1.6 \pm 0.2 \text{ cm}$ for ‘Schrijveriana’).

Keywords: *Ficus elastica*, micropropagation, gelling agents, plant growth regulators, multiplication rate.

Молканова Ольга Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией биотехнологии растений, ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН»; 127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, 4; e-mail: molkanova@mail.ru.

Крахмалева Ирина Леонидовна, научный сотрудник Лаборатории биотехнологии растений, ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН»; 127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, 4; e-mail: seglory@bk.ru.

Molkanova Olga Ivanovna, Cand. Sc. (Agr.), leading researcher, head of the Laboratory of plant biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences; 4, Botanicheskaya str., Moscow, 127276, Russia; e-mail: molkanova@mail.ru.

Krakhmaleva Irina Leonidovna, researcher of the Laboratory of plant biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences; 4, Botanicheskaya str., Moscow, 127276, Russia; e-mail: seglory@bk.ru.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН № 122042700002-6 «Биологическое разнообразие природной и культурной флоры: фундаментальные и прикладные вопросы изучения и сохранения».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

Дата поступления в редакцию – 10.03.2025.

Дата принятия к печати – 12.05.2025.