


УДК 634.72+631.52

Применение наночастиц металлов при размножении *Ribes atropurpureum* С.А. Мей. и её гибридов зелёными черенками


Б-Б.М. Чооду¹ , А.В. Локтева¹, А.Б. Горбунов¹¹ФГБУН Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, ул. Золотодолинская, д. 101, г. Новосибирск, Россия, botgard@csbg-nsk.ru

Аннотация

Красная смородина является одной из ключевых ягодных культур умеренной зоны, востребованная как в свежем виде, так и для переработки, благодаря стабильной урожайности и технологичности плодов. Ускорение внедрения новых сортов и гибридов требует эффективных и воспроизводимых методов вегетативного размножения, прежде всего зелёным черенкованием. Цель работы — оценить влияние наночастиц биогенного ферригидрита на укореняемость и качество корневой системы *Ribes atropurpureum* и её гибридов при зелёном черенковании. Биогенный ферригидрит был предварительно допирован кобальтом (Co) и кремнием (Si). Черенки обрабатывали раствором наночастиц с последующим укоренением на песчаном субстрате. Изучали окореняемость черенков, число и длину корней первого порядка. Обработка оказала разнонаправленный эффект, строго зависящий от генотипа. Для трудноукореняемого *R. atropurpureum* обработка наночастицами в концентрации 1 мг/л оказала стимулирующее действие: укореняемость повысилась с 50% (контроль) до 73,3% (Co), а также улучшились морфометрические показатели корневой системы и её ветвление. Напротив, для межвидовых гибридов с исходно высокой укореняемостью (86,7...100%) применение тех же наночастиц привело к снижению процента укоренения (до 73,3...76,7%) и ухудшению качества корневой системы. Наибольший отрицательный эффект у гибридов был связан с обработкой раствором наночастиц биогенного ферригидрита, допированного Co. Сделан вывод о перспективности предпосадочной обработки черенков наночастицами биогенного ферригидрита, допированные кобальтом и кремнием для интенсификации вегетативного размножения *R. atropurpureum* и её гибридов при обязательном учёте видовой и генотипической специфики реакции.

Ключевые слова: красная смородина, зелёное черенкование; наночастицы, укоренение, ризогенез

Application of metal nanoparticles in the propagation of *Ribes atropurpureum* C.A. Mey. and their hybrids using softwood cuttings

B-B.M Choodu¹ , A.V. Lokteva¹, A.B. Gorbunov¹¹Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Zolotodolinskaya st. 101, Novosibirsk, Russia, botgard@csbg-nsk.ru

Abstract

Red currants are one of the key berry crops in temperate zones, in demand both fresh and for processing thanks to their stable yield and technological properties. Accelerating the introduction of new varieties and hybrids requires effective and reproducible methods of vegetative propagation, primarily softwood cuttings. The aim of the study was to evaluate the effect of cobalt (Co) and silicon (Si) doped biogenic ferrihydrite nanoparticles on the rooting and root system quality of *Ribes*

atropurpureum and its hybrids during the propagation by softwood-cuttings. The cuttings were treated with a solution of nanoparticles and then rooted in a sandy substrate. The proportion of rooted cuttings, the number and length of first-order roots were studied. The treatment had a multidirectional effect, strictly dependent on the genotype. For the hard-to-root *R. atropurpureum*, treatment with nanoparticles at a concentration of 1 mg/l had a stimulating effect: rooting increased from 50% (control) to 73.3% (Co), as well as improved morphometric parameters of the root system and its branching. On the contrary, in interspecific hybrids with initially high rootability (86.7—100%), the use of the same nanoparticles led to a decrease in the percentage of rooting (to 73.3—76.7%) and a deterioration in the quality of the root system. The greatest negative effect in the hybrids was associated with treatment with a solution of biogenic ferrihydrite nanoparticles doped with cobalt. It was concluded that pre-planting treatment of cuttings with Co and Si nanoparticles is promising for intensifying the vegetative propagation of *R. atropurpureum* and its hybrids, taking into account the species and genotypic specificity of the reaction.

Key words: red currant, softwood cuttings; nanoparticles, rooting, rhizogenesis

Введение

Красная смородина – ценная ягодная культура в Сибири, которая в отличие от чёрной смородины возделывается в меньшем объеме, преимущественно распространена в приусадебном садоводстве. Промышленное возделывание ограничено (Коновалова, 1990; Креселюк, 1990; Поликарпова, Пилюгина, 1991; Сазонова, 2015; Атрощенко, Шеров-Игнатьев, 2017; Атрощенко, Голод, 2019; Столяров, 2018; Васильев, Гасымов, 2023). Многие используемые сорта созданы на основе европейских сортов, которые не обладают в достаточной мере адаптированностью к местным климатическим условиям. Они страдают от низких температур, их ритмы сезонного развития не соответствуют длительности вегетационного периода и теплообеспеченности для Сибири. Вместе с тем, в Сибири естественно произрастают несколько дикорастущих, устойчивых к местному климату, видов красной смородины. Это *Ribes atropurpureum* C.A. Meyer, *Ribes spicatum* E. Robson (*Ribes hispidulum* (Jancz.) Pojark.) *Ribes altissimum* (Jancz.) Turcz. ex Pojark. В ЦСБС СО РАН и других учреждения Сибири А.Б. Горбуновым, Т.А. Недовесовой (2020), В.Д. Федоровским (2001) О.Д. Голяевой (2020), В.Н. Сорокопудовым и Е.А. Мулькимовой (2003), проведены исследования по интродукции и селекции этих видов. Одним из наиболее перспективных объектов для интродукции и селекции в Сибири является *R. atropurpureum*. Данный вид встречается в черновой тайге, в горно-лесном поясе под пологом осиново-пихтового и кедрово-пихтового леса, в речных поймах и по руслам ручьев, сочетает ряд хозяйственно-ценных признаков: высокую урожайность, крупноплодность, длиннокистность, повышенное содержание антоцианов, пектинов и витамина С в ягодах, а также устойчивость к мучнистой росе, столбчатой ржавчине, махровости и почковому клещу. (Голяева, Панфилова, 2015). Однако, несмотря на эти преимущества и значительный природный полиморфизм, *R. atropurpureum* относится к трудноокореняемым видам.

В связи с этим в работе были изучены не только данный вид, но и его межвидовые гибриды. Гибрид *R. vulgare* × *R. atropurpureum* характеризуется высокой завязываемостью плодов, а гибриды *R. atropurpureum* × *R. hispidulum* и *R. hispidulum* × *R. atropurpureum* отличаются еще более высоким содержанием аскорбиновой кислоты по сравнению с родительской формой *R. atropurpureum* и гибридом *R. vulgare* × *R. atropurpureum* (Горбунов, Недовесова, 2020).

Размножение растений черенками является одним из ключевых методов вегетативного воспроизводства, широко применяется в современном садоводстве и питомниководстве. Опыты по черенкованию красной смородины проводились в различных учреждениях (Бопп,

Куприна, 2018; Павлова и др., 2018; Мистратова, 2020), было установлено, что при обработке черенков биопрепаратами в результате ускоряется процесс образования каллуса и увеличивается процент укоренения одревесневших черенков смородины (Никифоров, 2014). В экспериментах С.С. Савельева, О.С. Мишиной (2017) были использованы фиторегуляторы, среди которых препарат Циркон улучшал корнеобразовательную функцию у красной смородины по сравнению с контрольной группой обработанной только водой. В исследованиях С.Д. Расова, Т.В. Хуршайнена (2005) в качестве стимулятора сочетающего ризогенную и фунгицидную функции, был использован препарат А-1, полученный из растительного сырья. Авторы отмечают относительно низкую укореняемость красной смородины (83,3%; 63,3%) по сравнению с чёрной смородиной (90,0%; 66,7%). В современных исследованиях, например, в работе О.В. Ладыженской и др (2021), также подтверждена высокая эффективность комбинации препаратов на основе *Trichoderma viride* и *Pseudomonas fluorescens*, которая позволила повысить укореняемость черенков сортов (Голландская розовая и Ненаглядная) красной смородины до 77...80%. В то же время, как показано в исследовании Н.А. Фадеевой и др. (2021), применение традиционных регуляторов роста, таких как «Корневин» и «Гетероауксин», показывают высокую результативность, обеспечивая приживаемость черенков красной смородины на уровне 93...97%.

И.М. Морозова и А.М. Кандеранда (2016) показали, что обработка стеблевых черенков сортов 'Голландская красная', 'Ненаглядная' и 'Йонкер ван Тетс' стимуляторами (Экосил, Эпин, Корневин, ИУК) приводит к повышению степени укоренения, причём сортовые различия играли значительную роль: наибольшая укореняемость наблюдалась у сорта 'Голландская красная'. Аналогичные работы были проведены М.А. Атжиевой (2022) на тех же сортах, но с добавлением еще одного стимулятора – индолилуксусный эфир (ИУЭ), оказывающий сопоставимый эффект с другими стимуляторами.

В исследованиях А.Б. Горбунова и Т. Калуженковой (2007) было выявлено, что *R. atropurpureum* относится к трудноукореняющимся культурам. Наиболее результативным методом является зелёное черенкование, обеспечивающее до 60% укореняемости и формирование развитой корневой системы с ветвлением до V порядка. В контрольном варианте с обработкой водой укореняемость составила 48%. Среди регуляторов роста наибольший эффект дают гуминовое удобрение Теллура-М (1%) и органоминеральный препарат Артемия (1:1000), способствующие увеличению числа корней I...III порядков (Горбунов, Недовесова, 2020).

Исследования Н.А. Мистратовой (2020) подчёркивают важность подбора оптимальных субстратов и стимуляторов для повышения качества посадочного материала красной смородины. В условиях Красноярской лесостепи наибольшие показатели выхода стандартных саженцев обеспечивают комбинации органических субстратов с регуляторами корнеобразования.

Работы А.Ю. Павловой с соавторами (2018) и С.С. Савельева, О.С. Мишиной (2017) дополняют картину, указывая на значительный эффект фитогормонов в укоренении черенков разных видов рода *Ribes*, при этом эффективность зависит от фазы роста побегов и времени заготовки черенков.

Анализ литературных данных, представленный в обзоре Е.Н. Габибовой (2024), указывает, на то, что эффективность стимуляторов роста может существенно варьировать в зависимости от фазы вегетации и конкретного сорта, при этом в поздние сроки черенкования их применение становится технологически необходимым. Внедрение новых технологий в сельское хозяйство позволяет расширить возможности вегетативного размножения растений. Особое внимание уделяется наночастицам металлов,

применяемым в качестве компонентов стимуляторов укоренения. Их использование способствует активации ризогенеза и повышению качества посадочного материала.

Обзор Rico, C.M. et al (2011) показывает, что наночастицы (НЧ) способны проникать в ткани растений, участвовать в трансформациях и оказывать как стимулирующее, так и стрессовое воздействие. Наиболее активно изучаются НЧ TiO_2 , ZnO , Fe_3O_4 , Ag и Cu , среди которых наночастицы железа и цинка применяются в агробиотехнологии из-за доступности и биосовместимости.

Исследования, проведенные в Сибири, подтверждают эффективность применения НЧ биогенного ферригидрита (Feh) при размножении черенками. У чёрной смородины сортов 'Селеченская' и 'Лама' обработка ИУК в сочетании с НЧ Feh, допированным Co , обеспечивала до 100% укоренения и улучшенное развитие корневой системы, что согласуется с данным полученными при использовании наночастиц оксида цинка (40 мг/л), которые также способствовали 100% укоренению, увеличению количества корней на 33% и их суммарной длины на 44% (Сучкова, Астафурова, 2017; Мистратова и др., 2019; Кириченко, Захарцева, 2022). Подобные результаты получены и на черенках степной вишни. Использование Feh, допированного кобальтом или кремнием, повышало укореняемость на 22...25% по сравнению с контролем (Бопп, 2025).

У ивы Ледебурра было установлено, что НЧ Feh активизируют антиоксидантные ферменты, такие как Mn -супероксиддисмутаза, что связано с ускоренным корнеобразованием (Бопп и др., 2018). А при черенковании черемухи виргинской (*Padus virginiana*) наиболее высокие показатели укореняемости (до 90%) достигались при использовании Feh, допированного Co , особенно у трудноукореняемых сортов.

Применение наночастиц металлов, особенно в комплексе с фитогормонами, представляет собой эффективный подход для повышения укореняемости и качества саженцев. В данной работе мы использовали НЧ Feh, допированного, Co и Si с целью для оценки их влияния на укореняемость *R. atropurpureum* и ее гибридов, несмотря на то, что гибриды обладают более высокой базовой укореняемостью, именно перспективные гибриды представляют наибольший интерес для интродукции и селекции в Западной Сибири в целях повышения эффективности их размножения и качества корневой системы под действием наночастиц, что критически важно для ускоренного внедрения в производство.

Материалы и методы

Опыт проведен в 2023...2024 гг. на экспериментальном участке лаборатории интродукции пищевых растений ЦСБС СО РАН (Новосибирск). Была изучена укореняемость зелёных черенков *R. atropurpureum* и ее гибридов *R. vulgare* × *R. atropurpureum*, *R. hispidulum* × *R. atropurpureum*, *R. atropurpureum* × *R. hispidulum*. Зелёные черенки нарезают с хорошо развитых однолетних приростов, длиной 15 см, оставляя 1...2 верхних листа. Нижний срез делают чистым ножом на расстоянии 0,3 см от почки. Для изучения влияния биогенного ферригидрита (Feh), допированного наночастицами кобальта (Co) и кремния (Si), черенки погружали в раствор с конечной концентрацией наночастиц 1 мг/л. Ферригидрит, допированный наночастицами, был получен по методике ФИЦ КНЦ СО РАН (Гуревич, Теремова, 2022). Мы остановились именно на этих 2 элементах поскольку в ряде работ выявили их наиболее стабильное и выраженное стимулирующее действие на ризогенез по сравнению с другими НЧ Feh, допированными другими металлами. (Мистратова и др., 2019; Локтева, Чооду, 2024; Бопп, 2025). В отличие от НЧ Feh, допированные Co и Si , НЧ Feh допированные Al , марганца (Mn) и др. оказывали негативное или разнонаправленное влияние. В качестве контрольного варианта использовали обработку дистиллированной водой, без применения стимуляторов корнеобразования. Данный подход выбран на

основании литературы, согласно которой черенки ряда видов смородины, в отличие от трудноукореняемых культур, способны успешно укореняться без фитогормонов, демонстрируя высокий процент укореняемости до 95% (Павлова и др., 2018). Для стабилизации коллоидного раствора использовали лимонную кислоту. Время экспозиции составляло 12 часов. Повторность 3-кратная, в каждом повторе высаживали по 30 черенков. Далее черенки высаживали в песчаный субстрат в парниковую теплицу с туманообразующей установкой. Схема посадки 10 × 10 см, черенки заглубляли под углом 45° на 10 см. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Осенью после окоренения (через 90 суток) подсчитывали процент укоренившихся черенков и параметры корневой системы. Учёт длины корней проводили с помощью линейки с точностью до 0,5 см, для чего черенок размещали на разметочной подложке со шкалой (1 см). Измеряли число и длину корней 1-го порядка, а также оценивали объем корней 2-го порядка, по условной шкале с градацией на 4 категории, где 0 – отсутствие корней, I – единичные корни, II – десять-двадцать корней, III – более двадцати корней.

Статистическую обработку выполняли в программе Microsoft Excel 2021. Публикация подготовлена с использованием материалов биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте» УНУ №УСУ 440534.

Результаты и их обсуждение

Была проведена оценка влияния НЧ Co и Si на укореняемость черенков *R. atropurpureum* и её гибридов (рисунок 1). Было установлено, что НЧ FeH, допированный Co и Si в концентрации 1 мг/л., оказывает выраженное влияние на укореняемость *R. atropurpureum*.



а – *R. atropurpureum*; б – *R. atropurpureum* × *R. hispidulum*; в – *R. vulgare* × *R. atropurpureum*
Рисунок 1 – *Ribes atropurpureum* и межвидовые гибриды

Так, в контроле при обработке зелёных черенков дистиллированной водой укореняемость составила 50%, при обработке раствором, содержащим НЧ FeH, допированный Co и Si, процент укореняемости возрастал до 73,3 и 63,3% соответственно. Кроме того, улучшилось качество корневой системы, средняя длина корней первого порядка в контроле составила 4,4 см, тогда как под влиянием НЧ FeH, допированный Co, она увеличилась до 5,5 см, а под влиянием Si увеличилась до 6,6 см. При этом число корней первого порядка существенно не изменилось по сравнению с контролем (таблица 1). Наиболее выраженное влияние наночастиц металлов мы наблюдали на корнях второго порядка. В контрольном варианте у черенков *R. atropurpureum* на корнях 1 порядка встречались единичные корни (менее 10 шт., I категория) 2 порядка у 43,5% укоренившихся черенков, у 23,9% черенков число корней 2 порядка на один корень 1 порядка составляло от 10 до 20 шт. (II категория), черенки с корнями первого порядка, на которых бы присутствовали корни второго порядка в числе более 20 шт. (III категория), отсутствовали. При этом 32,6% укоренившихся черенков вообще не имели корней 2 порядка (0 категория).

Таблица 1 – Средние показатели укореняемости и качества корневой системы черенков в зависимости от обработки наночастицами биогенного ферригидрита допированного кобальтом и кремнием за 2023...2024 гг.

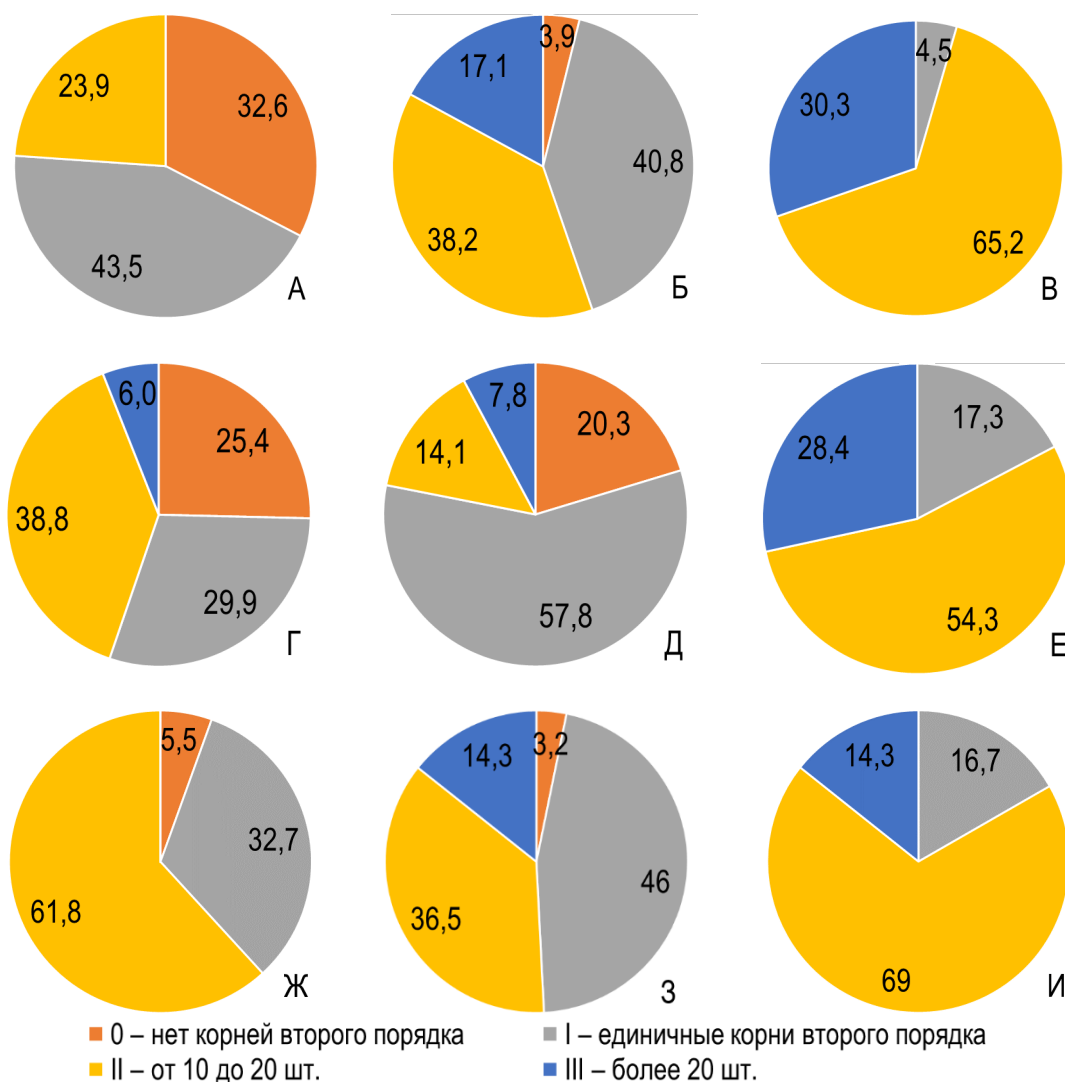
Название образца	Способ обработки	Укореняемость, %	Число корней, шт.	Длина корней, см		Р
				средняя	max-min	
<i>R. atropurpureum</i>	(контроль)	50,0	10,20±1,27	4,4±0,4	13,0-0,5	6,24
<i>R. atropurpureum</i> × <i>R. hispidulum</i>	(контроль)	86,7	12,9±0,80	5,0±0,2	16,0-1,0	2,95
<i>R. vulgare</i> × <i>R. atropurpureum</i>	(контроль)	100	30,65±1,58	6,9±0,1	25,0-0,5	2,13
<i>R. atropurpureum</i>	Feh + Co	73,3	12,30±0,73	5,5±0,3	20,0-0,5	6,29
<i>R. atropurpureum</i> × <i>R. hispidulum</i>	Feh + Co	76,7	15,80±1,02	4,4±0,2	14,0-0,5	4,34
<i>R. vulgare</i> × <i>R. atropurpureum</i>	Feh + Co	90,0	29,25±1,48	6,6±0,2	18,0-1,0	2,29
<i>R. atropurpureum</i>	Feh + Si	63,3	10,2±1,16	6,6±0,5	18,5-0,5	4,69
<i>R. atropurpureum</i> × <i>R. hispidulum</i>	Feh + Si	73,3	13,67±1,02	4,9±0,2	15,0-0,5	3,47
<i>R. vulgare</i> × <i>R. atropurpureum</i>	Feh + Si	96,7	29,88±1,53	6,8±0,2	20,0-1,0	2,24

В варианте с обработкой НЧ Feh, допированным Co, помимо увеличения процента укореняемости, возростала доля корней 1 порядка II и III категории до 38,8% и 6,0% соответственно, а доля корней 0 категории уменьшилась на 7,2%. При обработке НЧ Feh, допированного Si доля корней I категории составляла 32,7%, II категории — 61,8%, III категория отсутствовала, тогда как доля корней 0 категории уменьшилось на 27,1% по сравнению с контролем.

У гибридов *R. atropurpureum* × *R. hispidulum* и *R. vulgare* × *R. atropurpureum* укореняемость черенков в контрольных вариантах была значительно выше по сравнению с *R. atropurpureum*, 86,7 и 100% соответственно. У черенков, обработанных НЧ Feh, допированного Co, укореняемость снизилась до 76,7%, а у черенков обработанных НЧ Feh, допированного Si до 73,3%. При этом средняя длина корней 1 порядка практически не изменялась, но незначительно возрастало их число на 1 черенок. В этом варианте НЧ Feh, допированного Co оказали выраженное негативное влияние на качество корневой системы, уменьшилась доля корней II категории на 24,1% доля корней III категории на 9,3%, при этом доля корней 0 возростала с 3,9% до 20,3%. В варианте с НЧ Feh, допированного Si негативное влияние было значительно меньше по сравнению с НЧ Feh, допированного Co (таблица 1).

У гибрида *R. vulgare* × *R. atropurpureum* наблюдалось незначительное снижение укореняемости черенков в варианте обработки с НЧ Feh, допированного Co и Si по сравнению с контролем, укореняемость снизилась на 10 и 3,3% соответственно. При этом доля корней III категории в варианте обработки НЧ Feh, допированного Si уменьшилась с 30,3 до 14,3% по сравнению с контролем, а в варианте с НЧ Feh, допированного Co оставалась на уровне с контролем. При обработке НЧ Feh, допированного Co общее состояние корневой системы ухудшилось, уменьшилась доля корней II и III категории и соответственно возростала доля корней I категории до 17,3%. В случае с НЧ Feh, допированного Si в этом варианте у гибридов *R. vulgare* × *R. atropurpureum* общее качество корневой системы также ухудшилось. Особенно сильное негативное влияние НЧ Feh, допированного Si оказал на число корней III категории, их количество снизилось на 16% (рисунок 2).

В нашей предыдущей работе (Локтева, Чооду, 2024) была изучена укореняемость 2 видов и гибридов черёмухи, черенки *Padus avium* укореняется хорошо, а *Padus virginiana* практически не укореняются зелёным черенком. При этом гибриды наследовали хорошую способность к укоренению черенков.



А – *R. atropurpureum* + H₂O (контроль); Б – *R. atropurpureum* × *R. hispidulum* + H₂O (контроль); В – *R. vulgare* × *R. atropurpureum* + H₂O (контроль); Г – *R. atropurpureum* + Feh + Co; Д – *R. atropurpureum* × *R. hispidulum* + Feh + Co; Е – *R. vulgare* × *R. atropurpureum* + Feh + Co; Ж – *R. atropurpureum* + Feh + Si; З – *R. atropurpureum* × *R. hispidulum* + Feh + Si; И – *R. vulgare* × *R. atropurpureum* + Feh + Si
Рисунок 2 – Диаграммы распределения долей черенков в зависимости от числа корней второго порядка

В случае с *R. atropurpureum* мы наблюдаем схожую закономерность: черенки её гибрида с сортом *R. vulgare* `Красная Андрейченко` даже в контрольном варианте укоренялись на 100%, тогда как укореняемость *R. atropurpureum* была всего 50%. На примере черемухи было отмечено, что НЧ имеют разнонаправленное воздействие на укореняемость черенков: на трудноукореняемом сорте НЧ стимулировали укореняемость, а на сортах, которые хорошо укоренялись в контроле, НЧ оказывали угнетающее влияние. Наибольший положительный эффект наблюдался в варианте с обработкой НЧ Feh, допированный Co (рисунки 3...5).

В работе по изучению укореняемости чёрной смородины с использованием НЧ биогенного ферригидрата, допированного Co+ИУК (Мистратова, 2020) наблюдались схожие закономерности, выявленные при изучении укореняемости черенков черемухи (Локтева, Чооду, 2024).

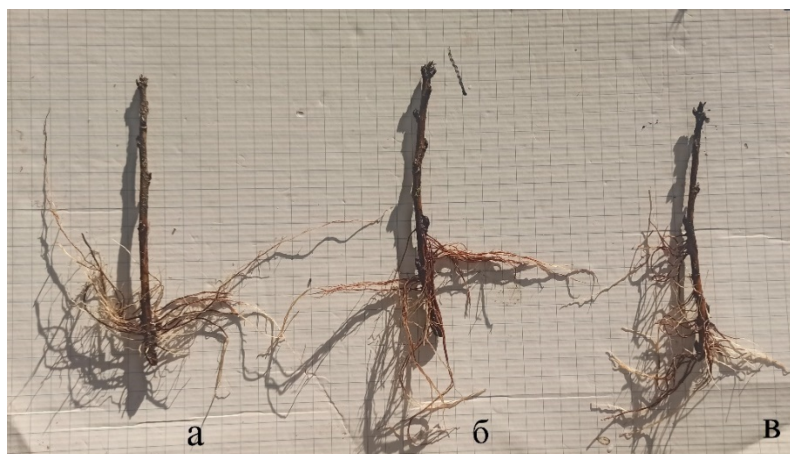


Рисунок 3 – Окоренившиеся черенки *R. atropurpureum* обработанных НЧ Feh допированного: а – Co; б – Si; в – контроль

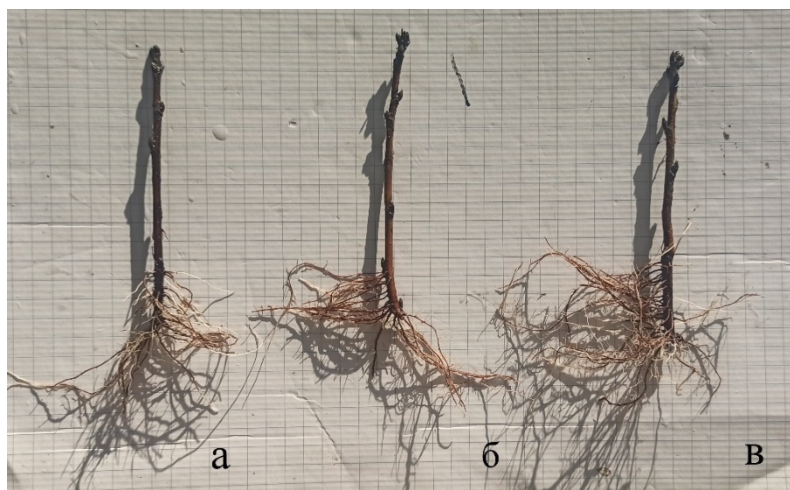


Рисунок 4 – Окоренившиеся черенки *R. atropurpureum* × *R. hispidulum* обработанных НЧ Feh, допированного а – Co; б – Si; в – контроль



Рисунок 5 – Окоренившиеся черенки *R. vulgare* × *R. atropurpureum* обработанных НЧ Feh, допированного: а – Co; б – Si; в – контроль

Здесь также черенки, обработанные НЧ FeH, допированным Co, показали достоверно более высокий процент укореняемости и более высокое качество корневой системы. На примере вишни степной также лучшие результаты были получены при использовании НЧ FeH, допированного Co и Si (Бопп, 2025).

Эффективность применения наночастиц подтверждена также в работах (на чёрной смородине, где наибольший эффект стимуляции был достигнут с НЧ FeH, допированного Co, что согласуется с нашими наблюдениями (Кириченко, Захарцева, 2022).

Сходные закономерности были зафиксированы и в работах, посвящённых укоренению черенков вишни (Бопп, 2025), винограда (Kara et al., 2025) и жимолости Бопп, 2024).

В то же время, в исследовании В.Л. Бопп (2024) сообщается о снижении процента укореняемости при использовании НЧ FeH, допированного Co при обработке черенков жимолости, что, вероятно, свидетельствует о разнонаправленном влиянии НЧ FeH, допированного Co в зависимости от генотипа. Однако, несмотря на снижение процента укореняемости у черенков, обработанных раствором ИУК с FeH в чистом виде и допированным Mn и Co, было отмечено увеличение общего числа корней.

Положительное влияние наночастиц на укореняемость черенков, показанное в настоящем исследовании, согласуется с результатами применения НЧ FeH, допированного другими металлами, в частности серебром (Kara et al., 2025) и алюминия (Кириченко, Захарцева, 2022).

Заключение

Предварительная обработка зелёных черенков *Ribes atropurpureum* раствором наночастиц биогенного ферригидрита (Feh), допированного Co и Si в концентрации 1 мг/л, оказалась эффективным средством для трудноукореняемого вида и качества корневой системы. У данного вида укореняемость возросла с 50% (контроль) до 73,3% (Co) и 63,3 (Si), средняя длина корней первого порядка с 4,4 см. до 5,5 см (Co) и 6,6 см (Si), при неизменном числе корней первого порядка. Наиболее заметные изменения затронули ветвление: снизилась доля черенков без корней второго порядка (0-категория) на 7,2% с Co и на 27,1% с Si. При обработке НЧ FeH, допированного Co, дополнительно появилась III категория (6%) с более чем 20 корнями второго порядка.

Для межвидовых гибридов на фоне высокой базовой укореняемости (86,7...100%, контроль) обработка НЧ FeH, приводила к ее снижению (до 73,3...76,7%) и к ухудшению качества корневой системы: при действии Co уменьшилась доля корней II и III категории на 24,1% и 9,3% соответственно, возрастала доля 0-категории с 3,9 до 20,3%. У гибрида *R. vulgare* × *R. atropurpureum* при обработке Si доля III-категории снижалась с 30,3 до 14,3%. Под воздействием НЧ FeH, допированного Co, наблюдалось общее смещение в сторону более низких категорий качества (рост I категории до 17,3%). В целом отрицательный эффект у гибридов был более выражен с Co, тогда как Si проявлял мягко выраженное, но все же негативное действие на качественные показатели корнеобразования.

Таким образом, эффект наночастиц носит ярко выраженный генотипический и специфический характер и зависит от исходной способности к укоренению: у трудноукореняющихся генотипов (*R. atropurpureum*) НЧ FeH, допированного Co и Si (1 мг/л) целесообразны для повышения укореняемости и усиления ветвления корней второго порядка; у легкоукореняющихся гибридов их применение не рекомендуется без предварительной оптимизации, поскольку возможно снижение как укореняемости, так и качества корневой системы. На практике это означает, что обработка черенков НЧ FeH, допированного Co и Si может быть включена в технологию вегетативного размножения *R. atropurpureum* как эффективный способ повышения качества укоренившихся черенков,

тогда как для гибридных форм требуется индивидуальный подбор условий. Перспективные направления дальнейших исследований: 1) оценка реакции в зависимости от дозы и длительности экспозиции каждого генотипа; 2) сравнение носителей и типов наночастиц; , а также изучение физиологических механизмов их воздействия; 3) изучение долговременной выживаемости, устойчивости и продуктивности укоренённых растений с оценкой возможной фитотоксичности и экологических рисков.

Финансирование

Исследование осуществлено в соответствии с государственным заданием ЦСБС СО РАН по проекту АААА-А21-121011290027-6 «Теоретические и прикладные аспекты изучения генофондов природных популяций растений и сохранения растительного разнообразия вне типичной среды обитания (*ex situ*)».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Атрощенко Г.П., Шеров-Игнатъев П.В. Оценка сортов красной смородины для возделывания в Ленинградской // Вестник Студенческого научного общества. 2017. 8, 1. 129-131. <https://elibrary.ru/xmiarv>
2. Атрощенко Г.П., Голод Т.А. Оценка сортов смородины красной для селекции и практики на Северо-Западе РФ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. 54. 11-15. <https://elibrary.ru/aqnich>
3. Атжыева М.А. Влияние стимуляторов роста на укоренение некоторых сортов рода *Ribes* // Молодость. Интеллект. Инициатива: материалы конференции. Витебск: Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, 2022. 28-29. <https://www.elibrary.ru/mrxmgk>
4. Бопп В.Л. Влияние наночастиц биогенного ферригидрита на окореняемость зеленых черенков жимолости // Состояние и проблемы сельскохозяйственной науки в Приенисейской Сибири: материалы конференции. Красноярск: Красноярский научный центр СО РАН, 2024. 151-155. https://doi.org/10.52686/9785605087908_151
5. Бопп В.Л. Наночастицы биогенного ферригидрита в технологии зеленого черенкования вишни степной // Аграрный научный журнал. 2025. 1. 17-23. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i1pp17-23>
6. Бопп В.Л., Куприна М.Н. Научные основы размножения смородины красной и облепихи одревесневшими черенками в условиях лесостепи Красноярского края. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2018. 168. <https://www.elibrary.ru/yuazhf>
7. Бопп В.Л., Мистратова Н.А., Петраковская Э.А., Гуревич Ю.Л., Теремова М.И., Хлебопрос Р.Г. Влияние наночастиц биогенного ферригидрита на окоренение одревесневших черенков ивы Ледебурга // Биофизика. 2018. 63, 4. 786-794. <https://doi.org/10.1134/S0006302918040154>
8. Васильев А.А., Гасымов Ф.М. Экологическая оценка перспективных сортов красной смородины в условиях Челябинской области // Агропродовольственная политика России. 2023. 5-6. 42-48. <https://elibrary.ru/vfaioz>
9. Габиева Е.Н. Размножение смородины зелеными черенками // Актуальные проблемы технических и естественных наук в России и за рубежом. М.: Наука и социум, 2024. 115-117. <https://www.elibrary.ru/lopouh>

10. Голяева О.Д. Интродукция орловских сортов смородины красной в Западно-Сибирский регион // Аграрный вестник Урала. 2020. 1. 35-42. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-192-1-35-42>
11. Голяева О.Д., Панфилова О.В. Создание источников и доноров хозяйственно-ценных признаков смородины красной // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2015. 6. 29-36. <https://www.elibrary.ru/vskhlr>
12. Горбунов А.Б., Недовесова Т.А. Сравнительная эффективность регуляторов роста при укоренении зелёных черенков *Ribes atropurpureum* (Gossulariaceae) // Растительный мир Азиатской России. 2020. 2. 44-47. <https://www.elibrary.ru/mmetjw>
13. Гуревич Ю.Л., Теремова М.И. Патент № 2767952. Способ получения наночастиц биогенного ферригидрита. 2022. <https://www.elibrary.ru/mwjlig>
14. Кириченко Н.А., Захарцева М.В. Действие ауксинов и растворов наночастиц на окоренение одревесневших черенков *Ribes nigrum* L // Студенческая наука: материалы конференции. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2022. 29-32. <https://www.elibrary.ru/lhoijg>
15. Коновалова М.Г. Сортоизучение и селекция красной смородины // Товарное ягодоводство: организации, технологии, сортимент: материалы конференции. Бердск: ВАСХНИЛ, 1990. 90-94.
16. Креселюк Г.С. Биологические особенности формирования урожая сортов красной смородины в условиях западной лесостепи УССР // Состояние и перспективы развития ягодоводства в СССР. Мичуринск: ВНИИС., 1990. 55. 115-117.
17. Ладыженская О.В., Аниськина Т.С., Крючкова В.А. Сравнительный анализ влияния комбинаций биопрепаратов на укореняемость черенков смородины красной (*Ribes rubrum* L.) // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. 12-2. 71-75. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.045>
18. Локтева А.В., Чооду Б-Б.М. Укоренение черемухи зеленым черенком в зависимости от индуктора ризогенеза // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. 54, 11. 39-48. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-11-4>
19. Мистратова Н.А., Гуревич Ю.Л., Теремова М.И., Колесник А.А. Опыт использования наночастиц гидроксида железа при размножении *Ribes nigrum* L. зелеными черенками // Вестник КрасГАУ. 2019. 11. 16-23. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2019-11-16-23>
20. Мистратова Н.А. Ризогенез одревесневших черенков смородины красной в зависимости от используемых стимуляторов роста // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы конференции. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2020. 2. 289-291. <https://www.elibrary.ru/xymvfy>
21. Морозова И.М., Кандеранда А.М. Использование некоторых стимуляторов роста при вегетативном размножении смородины красной *Ribes rubrum* L // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 2016. 1(90). 62-67. <https://www.elibrary.ru/vrrdrf>
22. Никифоров С.В. Влияние биопрепаратов на укоренение одревесневших черенков смородины // Плодоводство и ягодоводство России. 2014. 38, 2. 28-33. <https://www.elibrary.ru/rtriot>
23. Павлова А.Ю., Джура Н.Ю., Туть Е.А. Некоторые особенности размножения чёрной и красной смородины зелёными черенками в ограниченном объёме субстрата // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2018. 25. 19-21. <https://www.elibrary.ru/vpezue>
24. Поликарпова Ф.Я., Пилюгина В.В. Выращивание посадочного материала зеленым черенкованием. М.: Росагропромиздат, 1991. 97.

25. Расова С.Д., Хуршайнен Т.В. Влияние биологически активного препарата А-1 на укоренение черенков черной и красной смородины // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2005. 6. 47-49. <https://www.elibrary.ru/kvtotl>
26. Савельев С.С., Мишина О.С. Оценка эффективности использования фитогормонов для улучшения показателей роста и развития плодово-ягодных культур // Студенческая наука Подмосквю: материалы конференции. Орехово-Зуево: Государственный гуманитарно-технологический университет. 2017. 563-565. <https://www.elibrary.ru/zecaxp>
27. Сазонова И.Д. Оценка сортов смородины красной по химическому составу плодов и качеству замороженной продукции // Вестник Брянской ГСХА. 2015. 4. 8-10. <https://elibrary.ru/uihskl>
28. Сорокопудов В.Н., Мелькумова Е.А. Биологические особенности смородины и крыжовника при интродукции. Новосибирск: РАСХН, 2003. 296. <https://www.elibrary.ru/umaqoh>
29. Столяров М.Е. Оценка экономической эффективности использования сортов красной и чёрной смородины селекции ВНИИСПК // Вестник ОрелГИЭТ. 2018. 2(44). 11-15. <https://elibrary.ru/rzfzst>
30. Сучкова С.А., Астафурова Т.П. Морфологические изменения в черенках смородины черной под влиянием наночастиц оксида цинка // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2017. 13. 312-314. <https://www.elibrary.ru/ypspwp>
31. Фадеева Н.А., Шипцова Н.В., Захарова Н.Г. Использование стимуляторов роста в питомниководстве ягодных культур // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. 4. 21-26. <https://www.elibrary.ru/zyuulb>
32. Федоровский В.Д. *Ribes spicatum* Robson – смородина колосистая (систематика, география, изменчивость, интродукция). Киев: Фитосоцицентр, 2001. 204.
33. Rico, C.M., Majumdar S., Duarte M., Peralta J.R., Gardea J.L. Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011. 59. 3485-3498. <http://dx.doi.org/10.1021/jf104517j>
34. Gorbunov A.B., Koluzhenkova T. Vegetative propagation of *Ribes atropurpureum* C.A.Meyer // Acta Horticulturae et Regiotecturae. 2007. 10. 68-72.
35. Kara Z., Koç D., Doğan O., Yılmaz T. Effects of Nano Silver Particles Applications on Rooting of Grapevine Cuttings // Phyton-International Journal of Experimental Botany. 2025. 94, 6. 1827-1840. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.065702>

References

1. Atroschenko, G.P., & Sherov-Ignatiev, P.V. (2017). Evaluation of red currant varieties for cultivation in the Leningrad region. *Bulletin of the Student Scientific Society*, 8(1), 129-131. <https://elibrary.ru/xmiarv>. (In Russian).
2. Atroschenko, G.P., & Golod, T.A. (2019). Evaluation of red currant varieties for breeding and practice in the North-West of the Russian Federation. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*, 54, 11-15. <https://elibrary.ru/aqnich>. (In Russian).
3. Atzhyeva, M.A. (2022). The effect of growth stimulants on the rooting of some varieties of the genus *Ribes* In *Youth. Intelligence. Initiative: conference proceedings* (pp. 28-29). P.M. Masherov Vitebsk State University. <https://www.elibrary.ru/mrxmgk>. (In Russian).
4. Bopp, V.L. (2024). Influence of biogenic ferrihydrite nanoparticles on the rooting of green honeysuckle cuttings In *State and Problems of Agricultural Science in the Yenisei Siberia Region: conference proceedings* (pp. 151-155). Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. https://doi.org/10.52686/9785605087908_151. (In Russian, English abstract).

5. Bopp, V.L. (2025). Nanoparticles of biogenic ferrihydrite in the technology of green cuttings of steppe cherry. *The Agrarian Scientific Journal*, 1, 17-23. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i1pp17-23>. (In Russian, English abstract).
6. Bopp, V.L., & Kuprina, M.N. (2018). *Scientific Basis for the Propagation of Red Currants and Sea Buckthorn by Woody Cuttings in the Forest-Steppe Conditions of the Krasnoyarsk Territory*. <https://www.elibrary.ru/yuazhf>. (In Russian).
7. Bopp, V.L., Mistratova, N.A., Petrakovskaya, E.A., Gurevich, Yu.L., Teremova, M.I., & Khlebopros, R.G. (2018). The influence of nanoparticles of biogenic ferrihydrite on the rooting of lignified cuttings of the Ledebour willow. *Biophysics*, 63(4), 786-794. <https://doi.org/10.1134/S0006302918040154>. (In Russian, English abstract).
8. Vasiliev, A.A., & Gasimov, F.M. (2023). Ecological assessment of promising red currant varieties in the conditions of the Chelyabinsk region. *Agro-Food Policy in Russia*, 5-6, 42-48. <https://elibrary.ru/vfaioz>. (In Russian, English abstract).
9. Gabibova, E.N. (2024). Propagation of currants by green cuttings. In *Current Problems of Technical and Natural Sciences in Russia and Abroad* (pp. 115-117). Science and Society. <https://www.elibrary.ru/lopouh>. (In Russian, English abstract).
10. Golyaeva, O.D. (2020). Introduction of Orel red currant varieties into the West-Siberian region. *Agrarian Bulletin of The Urals*, 1, 35-42. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-192-1-35-42>. (In Russian, English abstract).
11. Golyaeva, O.D., & Panfilova, O.V. (2015). Creation of sources and donors of economically valuable red currants traits. *Vestnik OrelGAU*, 6, 29-36. <https://www.elibrary.ru/vskhlr>. (In Russian, English abstract).
12. Gorbunov, A.B., & Nedovesova, T.A. (2020). Comparative effectiveness of growth regulators in rooting green cuttings of *Ribes atropurpureum* (Grossulariaceae). *Rastitel'nyj Mir Aziatskoj Rossii*, 2, 44-47. <https://www.elibrary.ru/mmetjw>. (In Russian, English abstract).
13. Gurevich, Yu.L., & Teremova, M.I. (2022). *Method of Producing Ferrihydrite Nanoparticles* (Patent No 2767952). <https://www.elibrary.ru/mwjlig>. (In Russian, English abstract).
14. Kirichenko, N.A., & Zakharceva, M.V. (2022). Effect of auxins and solutions of nanoparticles on rooting of lightened cuttings of *Ribes nigrum* L. In *Student Science – a Look Into the Future: conference proceedings* (pp. 29-32). Krasnoyarsk State Agrarian University, 2022. 1. 29-32. <https://www.elibrary.ru/lhoijg>. (In Russian, English abstract).
15. Konovalova, M.G. (1990). Variety study and selection of red currants. In *Commercial Berry Growing: Organization. Technologies, Assortment* (pp 90-94). VASKhNIL. (In Russian).
16. Kreselyuk, G.S. (1990). Biological features of red currant variety yield formation in the western forest-steppe of the Ukrainian SSR. In *Status and Prospects for the Development of Berry Growing in the USSR*. (pp. 115-117). VNIIS. (In Russian).
17. Ladyzhenskaya, O.V., Aniskina, T.S., & Kryuchkova, V.A. (2021). A comparative analysis of the effect of combinations of biological preparations on the rooting ability of redcurrant cuttings (*Ribes rubrum* L.). *International Research Journal*, 12-2, 71-75. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.045>. (In Russian, English abstract).
18. Lokteva, A.V., & Choodu, B-B.M. (2024). Rooting of bird cherry green cuttings depending on the rhizogenesis inducer. *Siberian Herald of Agricultural Science*, 54(11), 39-48. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-11-4>. (In Russian, English abstract).
19. Mistratova, N.A., Gurevich, Yu.L., Teremova, M.I., & Kolesnik, A.A. (2019). The experience of using iron hydroxide nanoparticles while reproducing *Ribes nigrum* L. by green shanks. *Vestnik KrasGAU*, 11, 16-23. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2019-11-16-23>. (In Russian, English abstract).

20. Mistratova, N.A. (2020). Rhygenesis of lambured red currant smalls depending on the growth stimulants used. In *Science and Education: Experience, Problems, Prospects for Development: conference proceedings* (pp. 289-291). Krasnoyarsk State Agrarian University. <https://www.elibrary.ru/xymvfy>. (In Russian, English abstract).
21. Morozova, I.M., & Kanderanda, A.M. (2016). Application of growth promoters while vegetative breeding of red currants *Ribes rubrum* L. *Vestnik Vitebsk State University*, 1, 62-67. <https://www.elibrary.ru/vrrdrt>. (In Russian, English abstract).
22. Nikiforov, S.V. (2014). The effect of biological products on the rooting of woody currant cuttings. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*, 38(2), 28-33. <https://www.elibrary.ru/rrtiot>. (In Russian, English abstract).
23. Pavlova, A.Yu., Dzhura, N.Yu., & Tut, E.A. (2018). On some reproduction features of black and red currants with green cuttings in a limited amount of substrate. *Bulletin of the Katanov Khakass State University*, 25, 19-21. <https://www.elibrary.ru/vpezue>. (In Russian, English abstract).
24. Polikarpova, F.Ya., & Pilyugina, V.V. (1991). *Growing Planting Material by Green Cuttings*. Rosagropromizdat. (In Russian).
25. Rasova, S.D., & Khurshkainen, T.V. (2005). The effect of the biologically active preparation A-1 on the rooting of black and red currant cuttings. *Agricultural Science Euro-North-East*, 6, 47-49. <https://www.elibrary.ru/kvtotl>. (In Russian).
26. Saveliev, S.S., & Mishina, O.S. (2017). Assessment of the effectiveness of using phytohormones to improve the growth and development of fruit and berry crops. In *Student Science in the Moscow Region: conference proceedings* (pp. 563-565). State University of Humanities and Technology. <https://www.elibrary.ru/zecaxp>. (In Russian).
27. Sazonova, I.D. (2015). Evaluation of red currant varieties by the chemical composition of fruits and the quality of frozen products. *Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*, 4, 8-10. <https://elibrary.ru/uihskl>. (In Russian).
28. Sorokopudov, V.N., & Melkumova, E.A. (2003). Biological Characteristics of Currants and Gooseberries During Introduction. Russian Academy of Agricultural Sciences. <https://www.elibrary.ru/umaqoh>. (In Russian).
29. Stolyarov, M.E. (2018). Economic efficiency estimation of use of the grades of red and black currant of VNIISPК (Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding) selection. *OreIGIET Bulletin*, 2, 11-15. <https://elibrary.ru/rzfzst>
30. Suchkova, S.A., & Astafurova, T.P. (2017). Morphological changes in black currant cuttings under the influence of zinc oxide nanoparticles. *New and Non-Traditional Plants and Prospects for their Use*, S13, 312-314. <https://www.elibrary.ru/ypspwp>. (In Russian).
31. Fadeeva, N.A., Shiptsova, N.V., & Zakharova, N.G. (2021). Use of growth stimulants in berry crops nursery. *Vestnik Chuvash State Agricultural Academy*, 4, 21-26. <https://www.elibrary.ru/zyuulb>. (In Russian, English abstract).
32. Fedorovsky, V.D. (2001). *Ribes spicatum* Robson – *Spiked Currant* (Systematics, Geography, Variability, Introduction). Phytosociocenter. (In Russian).
33. Rico, C.M., Majumdar, S., Duarte, M., Peralta, J.R., & Gardea, J.L. (2011) Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 3485-3498. <http://dx.doi.org/10.1021/jf104517j>
34. Gorbunov, A.B., & Koluzhenkova, T. (2007). Vegetative propagation of *Ribes atropurpureum* C.A. Meyer. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 10, 68-72.
35. Kara, Z., Koç, D., Doğan, O., & Yılmaz, T. (2025). Effects of Nano Silver Particles Applications on Rooting of Grapevine Cuttings. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 94(6), 1827-1840. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.065702>

Авторы:

Байыр-Белек Мергенович Чооду, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории интродукции пищевых растений, ФГБУН «Центральный сибирский ботанический сад СО РАН», baiyr_94@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0493-9798
SPIN: 3299-6466

Анна Владимировна Локтева, к.б.н., научный сотрудник лаборатории интродукции пищевых растений, ФГБУН «Центральный сибирский ботанический сад СО РАН», lokteva30@mail.ru
SPIN: 2968-4299

Алексей Борисович Горбунов, к.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории интродукции пищевых растений, ФГБУН «Центральный сибирский ботанический сад СО РАН», alex_gordunov22@mail.ru
SPIN: 9026-1530

Authors:

Baiyr-Belek M. Choodu, PhD student, junior researcher at the Laboratory for the Introduction of Food Plants in Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (CSBG SB RAS), baiyr_94@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0493-9798
SPIN: 3299-6466

Anna V. Lokteva, Candidate of Science in Biology, Researcher in Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (CSBG SB RAS), lokteva30@mail.ru
SPIN: 2968-4299

Aleksey B. Gorbunov, Candidate of Science in Biology, Researcher in Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (CSBG SB RAS), alex_gordunov22@mail.ru
SPIN: 9026-1530

Отказ от ответственности: заявления, мнения и данные, содержащиеся в публикации, принадлежат исключительно авторам и соавторам. ФГБНУ ВНИИСПК и редакция журнала снимают с себя ответственность за любой ущерб людям и/или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.