

УДК 573

РОСТ И РАЗВИТИЕ РЕГЕНЕРАНТОВ ЗЕМЛЯНИКИ АНАНАСНОЙ (*FRAGARIA* × *ANANASSA* (WESTON) DUCHESNE EX ROZIER) НА РАЗЛИЧНЫХ ВЕРМИКУЛИТОВЫХ СУБСТРАТАХ ПРИ ПЕРЕВОДЕ ИЗ *IN VITRO* В *EX VITRO*

М. А. Ярцева^{1*}, А. Б. Хвостова², Л. А. Иванова^{1,3}, М. В. Слуковская^{4,5}

¹ Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина, ФИЦ «Кольский научный центр РАН» (Академгородок, 18а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209), *468975@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова, Полярная опытная станция – филиал ВИР (ул. Козлова, 2, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

³ Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ «Кольский научный центр РАН» (Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

⁴ Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, ФИЦ «Кольский научный центр РАН» (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

⁵ Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева, ФИЦ «Кольский научный центр РАН» (Академгородок, 26а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

Состав субстратов играет важную роль в адаптации растений-регенерантов при их дальнейшем выращивании в естественных условиях. Представлены результаты эксперимента по использованию термовермикулита Ковдорского месторождения марок Випон-2 и ТВ2-Н, различающихся по методу производства, для адаптации регенерантных растений земляники ананасной (*Fragaria* × *ananassa*) к нестерильным условиям. Исследовано влияние вермикулитовых субстратов и их смесей на приживаемость и рост растений. Использование субстратов ТВ2-Н и смеси ТВ2-Н с почвой способствовало повышению приживаемости растений по сравнению с растениями, выращенными в почве. Для растений, выращенных на данных субстратах, установлена стопроцентная приживаемость. При использовании смеси указанных субстратов с почвой наблюдали снижение этого показателя до 95–90 %, с наибольшими потерями количества прижившихся растений в варианте при выращивании в почве (приживаемость 76 %). Растения, выращенные на смешанном субстрате из термовермикулита ТВ2-Н и почвы, были на 40 % выше, чем выращенные в почве (контрольные растения). Также у них отмечались более высокие значения сырой биомассы (на 22 %) и массы корней (на 95 %), чем у контрольных растений. Прирост растений, выращенных на субстрате ТВ2-Н, и их сырой биомассы корней составил по сравнению с контрольными растениями 16 и 30 % соответственно; статистически значимых различий по показателю «сырая биомасса» не установлено. Применение субстратов Випон-2 и смеси Випон-2 с почвой при выращивании регенерантов оказалось менее эффективным (по сравнению с использованием

субстрата ТВ2-Н) для получения более высоких растений с большей биомассой. Тем не менее масса корней растений, выращенных на субстрате Випон-2 и смеси Випон-2 с почвой, была на 30 % больше, чем у контрольных растений. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования субстратов на основе термовермикулита для адаптации регенерантных растений земляники ананасной к нестерильным условиям при переходе из условий *in vitro* в *ex vitro*.

Ключевые слова: вермикулитовые субстраты; приживаемость регенерантов; клональное микроразмножение; земляника ананасная

Для цитирования: Ярцева М. А., Хвостова А. Б., Иванова Л. А., Слуковская М. В. Рост и развитие регенерантов земляники ананасной (*Fragaria* × *ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier) на различных вермикулитовых субстратах при переводе из *in vitro* в *ex vitro* // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 7. С. 91–101. doi: 10.17076/eb1915

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FGEM-2022-0004 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда вегетативно размножаемых культур и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции» и в рамках государственного задания по теме НИР «Стратегия развития и содержания коллекционных фондов ПАБСИ как базы для проведения научных изысканий в области интродукции и экологии в Арктической зоне РФ» (рег. № 1023032400462-1-1.6.19;1.6.20;1.6.4;1.6.11).

M. A. Yartseva^{1*}, A. B. Khvostova², L. A. Ivanova^{1,3}, M. V. Slukovskaya^{4,5}. GROWTH AND DEVELOPMENT OF REGENERANT STRAWBERRY (*FRAGARIA* × *ANANASSA* (WESTON) DUCHESNE EX ROZIER) PLANTS ON VARIOUS VERMICULITE SUBSTRATES DURING TRANSFER FROM *IN VITRO* TO *EX VITRO* CONDITIONS

¹ N. A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (18a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia), *468975@mail.ru

² N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Polar Experiment Station (2 Kozlova St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)

³ Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)

⁴ Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (26a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)

⁵ I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)

Substrate composition plays an important role in the adaptation of regenerated plants during their further cultivation under natural conditions. The article presents the results of an experiment on using two brands of thermovermiculite from the Kovdor deposit (Vipon-2 and TV2-N, produced by different methods) for the adaptation of regenerated garden strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) plants to non-sterile conditions. The effect of vermiculite substrates and their mixtures on the survival rate and growth of plants was studied. The use of TV2-N substrates and TV2-N mix with soil enhanced the survival rate of plants compared to plants grown in soil. Plants cultivated on these substrates exhibited a 100 % survival rate. The survival rates on a mixture of these substrates with soil decreased to 95–90 %, and the greatest loss of plants occurred in the variant with cultivation in soil (76 % survival rate). Plants grown on a mix of thermovermiculite TV2-N and soil were 40 % taller than those grown in soil (control plants). They also had 22 % higher wet biomass and 95 % higher root mass than the control plants. The increase in the height and wet root biomass in plants grown on TV2-N substrate versus the control was 16 % and 30 %, respectively. No statistically significant differences between them were found as regards the wet biomass parameter. The use of Vipon-2 substrates and a Vipon-2 mix with soil proved to be less effective in growing taller and higher-biomass regenerant plants than the use of TV2-N substrate. Nevertheless, the root mass of plants grown on the Vipon-2 substrate and a mixture of Vipon-2 with soil was 30% greater than that of the control plants. Our data suggest indicate thermovermiculite-based substrates

have potential for the adaptation of regenerated garden strawberry plants to non-sterile environments during their transfer from *in vitro* to *ex vitro* cultivation.

Keywords: vermiculite substrates; survival of regenerant plants; clonal micropropagation; garden strawberry

For citation: Yartseva M. A., Khvostova A. B., Ivanova L. A., Slukovskaya M. V. Growth and development of regenerant strawberry (*Fragaria* × *ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier) plants on various vermiculite substrates during transfer from *in vitro* to *ex vitro* conditions. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 7. P. 91–101. doi: 10.17076/eb1915

Funding. The activities were carried out within state-ordered theme No. FGEM-2022-0004: “Improving approaches and methods for ex situ preservation of the known gene pool of vegetatively propagated crops and their wild relatives; developing techniques for their efficient use in selective breeding” and within state-ordered theme “Strategy for the development and maintenance of PABGI collection stock as a basis for scientific research on introduction and ecology in the Arctic zone of the Russian Federation” (reg. No. 1023032400462-1-1.6.19; 1.6.20; 1.6.4; 1.6.11).

Введение

Земляника ананасная (*Fragaria* × *ananassa*) является одной из наиболее популярных ягодных культур открытого грунта Заполярья [Елсакова, Елсаков, 1999]. Продуктивность этой культуры в значительной степени зависит от качества посадочного материала, используемого при закладке плантации [Trejo-Tellez, Gomez-Merino, 2014]. Получение здоровых растений при вегетативном размножении сопряжено с трудностями; даже при строгом соблюдении агротехнических условий в почве со временем накапливаются вирусы и патогены, что ведет к потере сортовых качеств и к деградации сорта [Schiavon et al., 2022]. Одно из решений этой проблемы заключается в клональном микроразмножении растений [Trejo-Tellez, Gomez-Merino, 2014].

В условиях Арктической зоны Российской Федерации клональное микроразмножение является наиболее перспективным методом для получения здоровой рассады в необходимых количествах, для длительного сохранения сортовых особенностей растений. Однако внедрение этого метода требует персонализированного подхода к каждому виду растений [Cardoso et al., 2018].

Процесс клонального микроразмножения включает четыре основных этапа: введение в культуру, микроразмножение, укоренение и адаптация микроклонов к нестерильным условиям. Последний этап особенно важен, поскольку в этот период растения наиболее подвержены стрессу, что может привести к массовой их гибели и снижению эффективности работы [Мацнева, Ташматова, 2019]. Высокий уровень гибели клонов при переводе из *in vitro*

в *ex vitro* обусловлен прежде всего особенностями их роста и развития в стерильной среде, в частности особенностями формирования корней регенерантов на этапе размножения *in vitro* [Бородулина, Плаксина, 2015].

На данный момент отсутствует стандартизированная методика адаптации клонированных растений к природным почвенным условиям [Дедюхина и др., 2011; Teixeira da Silva et al., 2017; Галдина и др., 2018]. В то же время установлены основные требования к субстрату: он должен обеспечивать оптимальные условия для развития как наземной, так и корневой части растений и обладать такими характеристиками, как стерильность, влагоемкость и воздухопроницаемость [Иванова, 1996, 2008; Valasevich et al., 2009; Чудецкий и др., 2022].

Термовермикулит удовлетворяет этим требованиям, и его эффективность для адаптации растений подтверждена в ряде исследований [Крицкая и др., 2014; Erst et al., 2014; Шибанова, Орлова, 2018; Iwuagwu, Nwosu, 2018; Hoang et al., 2020]. В отличие от натуральной почвы он не требует обеззараживания, поскольку в процессе обжига при высоких температурах (500–700 °C) происходит полная стерилизация субстрата, что предотвращает размножение патогенов и микроорганизмов [Мосендз, Кременецкая, 2022]. Это позволяет существенно сократить затраты времени и снизить расходы на производство посадочного материала.

Однако следует учитывать высокую вариабельность физико-химических свойств термовермикулита, связанных с местом его добычи, составом руды и технологией обжига [Болотников, 1964]. Поэтому с появлением нового типа термовермикулита на рынке становится актуальным изучение его пригодности

в качестве субстрата-посредника при адаптации растений-регенерантов, переводимых из *in vitro* в *ex vitro*.

Цель исследования – изучить особенности роста и развития регенерантов земляники ананасной на различных вермикулитовых субстратах при переходе из условий *in vitro* в условия *ex vitro*.

Задачи исследования: 1) оценить влияние нового вермикулитового субстрата марки ТВ2-Н на рост и приживаемость растений-регенерантов земляники ананасной; 2) сравнить эффективность нового субстрата ТВ2-Н с ранее рекомендованным вермикулитом марки Випон-2; 3) оценить эффективность субстратов ТВ2-Н и Випон-2 в сочетании с автоклавированной почвой; 4) определить возможности применения этих субстратов для адаптации растений земляники ананасной при переходе из *in vitro* в *ex vitro*.

Объекты и методы

Эксперимент проводили в 2022 г. на базе лаборатории биотехнологии Полярной опытной станции – филиала Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР) и Кольского научного центра Российской академии наук (ФИЦ КНЦ РАН).

Объектами исследования явились растения-регенеранты земляники ананасной сорта Хибинская красавица, выращенные на различных субстратах. В качестве контрольных растений использованы регенеранты, выращенные в почве.

Сорт земляники ананасной Хибинская красавица является селекционным достижением ВИР, зарегистрирован в Государственном реестре в 2007 году и рекомендован для выращивания в условиях Мурманской и Архангельской областей, Республик Карелия и Коми. Сорт характеризуется ранним сроком созревания, высокой урожайностью, ягоды темно-красные с белым кончиком, средний вес ягод – 16 г, дегустационная оценка – 5 баллов, устойчив к болезням и вредителям [Елсакова, Елсаков, 1999].

Субстрат 1 (ТВ2-Н) – термовермикулит фракции 0,45–2,0 мм, полученный из ковдорского вермикулитового концентрата. Обжиг концентрата осуществлялся в электрической модульно-спусковой печи, разработанной на базе ООО «Квалитет» (г. Иркутск) под руководством А. И. Нижегородова из Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета [Нижегородов, 2015]. Данный субстрат впервые

подвергается оценке в растениеводческих испытаниях на предмет его применения в агротехнологиях.

Субстрат 2 (Випон-2) – термовермикулит фракции 0,45–2,0 мм, был использован в качестве эталонного материала, ранее прошедшего испытания в растениеводстве и рекомендованного как универсальный субстрат для посева семян, укоренения черенков, выращивания рассады и зеленых культур [Иванова и др., 2020]. По сравнению с вермикулитом марки ТВ2-Н этот субстрат отличается меньшей щелочностью, а также обладает большей насыпной плотностью и влагоемкостью (табл.).

Субстрат 3 (ТВ2-Н + почва) – смесь термовермикулита марки ТВ2-Н и автоклавированной почвы, пропорции которых составляют 1:1 по объему.

Субстрат 4 (Випон-2 + почва) аналогично является смесью термовермикулита марки Випон-2 и автоклавированной почвы, также в соотношении 1:1 по объему.

Субстрат 5 (почва) представляет собой почвосмесь, приготовленную из поверхностного слоя почвы с добавлением речного песка и перегноя в соотношении 1:0,3:0,5 по объему. Данная смесь была измельчена, просеяна и прошла автоклавирование.

Для стерилизации почвы использовался автоклав Tuttnauer 3870ELV-wR-D/. Автоклавирование проводили при температуре 121 °C (250 °F), время стерилизации – 15 минут при давлении 1 атм.

Для получения однородного посадочного материала проведена предварительная работа по его подготовке (рис. 1). Эта работа включала в себя следующие этапы: выбор растения-донора (а), изолирование эксплантов (б), получение стерильной культуры (с), микроразмножение растений с целью получения меристематических клонов (д), а также черенкование и укоренение полученных побегов (е). Полный цикл, начиная с введения в культуру *in vitro* и заканчивая получением посадочного материала, составил 4,5 месяца. Для проведения эксперимента были выбраны растения с длиной корней от 3 до 4 см и с 3–5 листьями на каждом экземпляре. Процесс укоренения осуществлялся в течение четырех недель. Перед посадкой корни регенерантов земляники ананасной промывались от остатков агара в дистиллированной воде.

Для перевода растений из *in vitro* в *ex vitro* использовались пластиковые кассеты с ячейками размером 5,3×3,1×6,0 см, в каждую из которых помещался субстрат объемом 150 мл, предварительно увлажненный 75 мл воды.

Характеристика субстратов
Description of the substrates

Вариант Variant	Субстрат Substrate	Показатель Index				
		Насыпная плотность, г/дм ³ Bulkdensity, g/dm ³	Влагоемкость, мас. % Moisture capacity, wt. %	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	*ОВП, мВ Eh, mV
1	ТВ2-Н TV2-H	300–320	100 ± 15	9,0–9,2	7,0–7,4	114 ± 1
2	Випон-2 Vipon-2	400–420	180 ± 10	8,5–8,8	6,9–7,1	176 ± 1
3	ТВ2-Н + почва TV2-H+ soil	350–380	60 ± 8	7,0–7,2	6,8–7,0	152 ± 2
4	Випон-2 + почва Vipon-2 + soil	400–420	80 ± 5	6,8–7,0	6,1–6,5	168 ± 2
5	Почва Soil	300–400	43 ± 5	6,4–6,8	6,0–6,3	200 ± 3

Примечание. *Окислительно-восстановительный потенциал.

Note. * Oxidation-reduction potential.

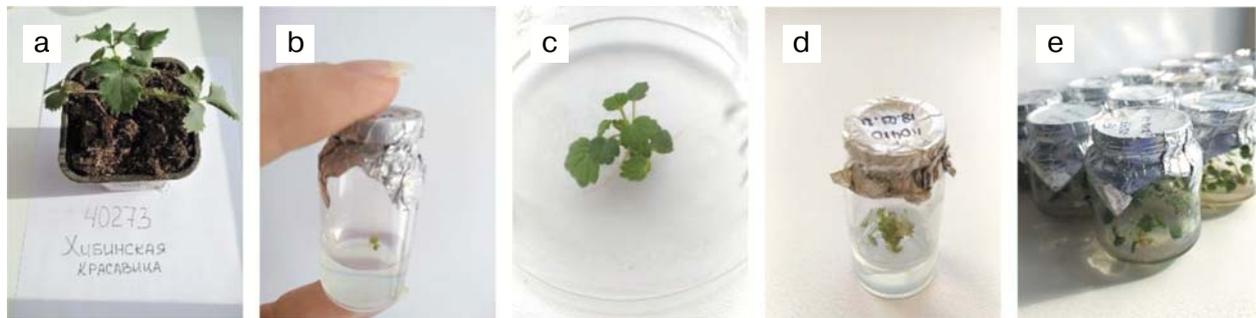


Рис. 1. Этапы подготовки растений земляники ананасной для использования в эксперименте (расшифровку см. в тексте)

Fig. 1. Stages of preparing pineapple strawberry plants for use in the experiment (for the legend see the text)

Затем в подготовленные кассеты высаживались растения, после чего производился полив водой в объеме 30 мл на каждую емкость. Посадки покрывались пленкой до появления новых листьев, затем пленка удалялась. Наблюдения за ростом и количеством прижившихся растений проводились регулярно с интервалом один раз в три дня. Общая продолжительность эксперимента составила 45 суток. Состояние растений оценивалось по ряду биометрических показателей (высота растений, вес сырой биомассы побегов и корней, количество листьев), а также по содержанию хлорофилла в листьях. Содержание хлорофилла ($a+b$) (мкг/см³) определяли с помощью ручного листового миниспектрометра CI-710s (CID Bio-Science, США).

Схема эксперимента включала пять вариантов, каждый выполнялся в трех повторностях по 7 растений в каждой (табл.).

Интенсивность освещения в помещении, в котором проводились эксперименты, варьировала в зависимости от погодных условий:

в пасмурные дни она составляла 6 кЛк, тогда как в солнечные дни достигала 20 кЛк. Установленный фотопериод – 16 часов света и 8 часов темноты, что способствовало оптимальному росту растений. Температурный режим поддерживался в диапазоне от 22 до 25 °С, а уровень влажности воздуха оставался на уровне 60 %.

Искусственное досвечивание осуществлялось с использованием белых светодиодных ламп марки ЗНР2, обладающих спектром в диапазоне 3800–4300 К. Данные условия освещения и температуры были выбраны для создания оптимальной среды, способствующей эффективной фотосинтетической активности растений.

Для анализа полученных данных использовались методы описательной статистики и однофакторного дисперсионного анализа. Обработка данных проводилась в программном обеспечении Microsoft Excel и Statistica 8. Использован критерий Стьюдента. Различия считались значимыми при $p < 0,05$. На диаграммах (рис. 2) приведены средние значения и ошибка среднего.

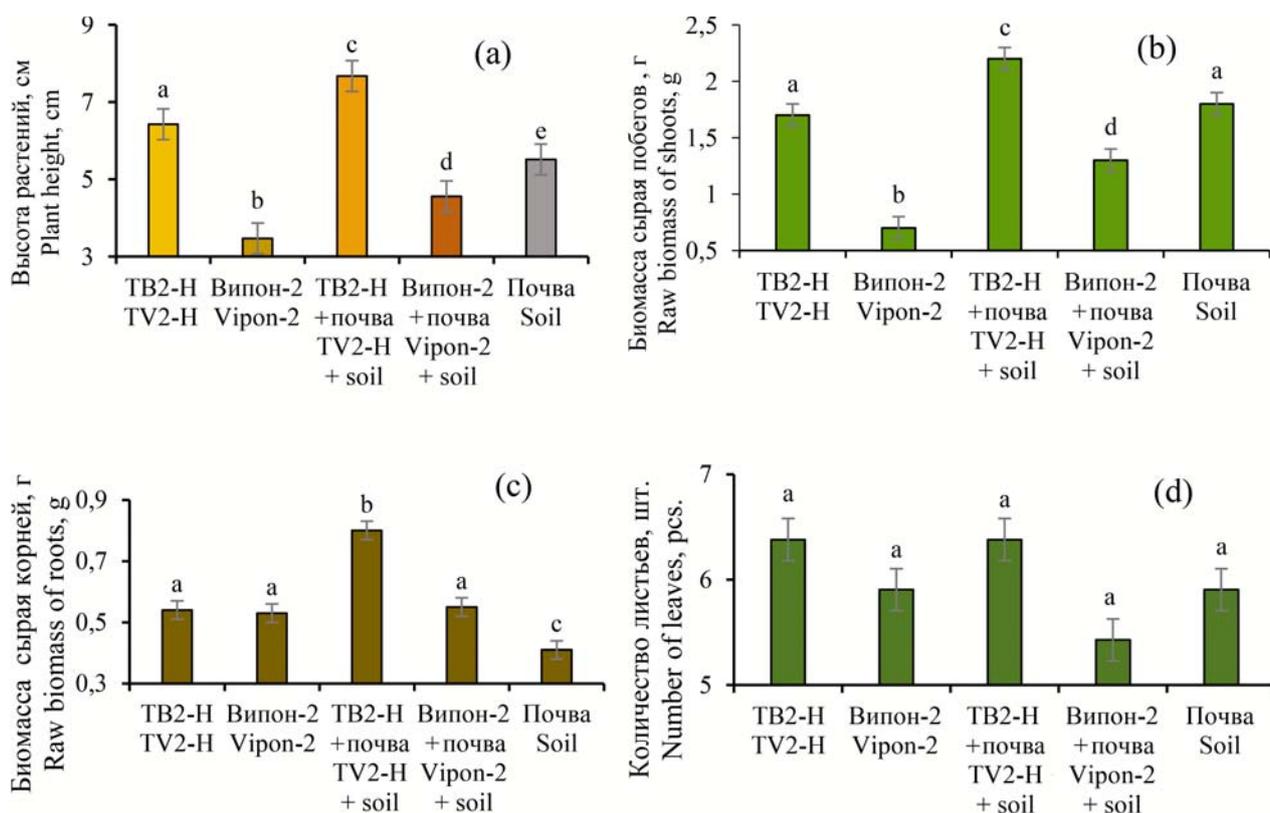


Рис. 2. Биометрические показатели растений земляники ананасной на 45-й день эксперимента: высота растений (а), сырая биомасса растений (б), сырая биомасса корней (с), количество листьев (д). Буквы над столбцами указывают статистически значимое различие между вариантами субстратов

Fig. 2. Biometric indicators of pineapple strawberry plants on day 45 of the experiment: plant height (a), raw biomass of plants (b), raw biomass of roots (c), number of leaves (d). The letters above the columns indicate a statistically significant difference between the substrate variants

Результаты

Наилучшие показатели приживаемости (100 %) зафиксированы у растений, высаженных в субстраты, содержащие термовермикулит марки ТВ2-Н, как в чистом виде, так и в комбинации с обычной почвой.

При применении Випон-2 у регенерантов наблюдался значительно меньший процент приживаемости (95–90 %), чем у растений, выращенных в субстрате ТВ2-Н, что указывает на существенно более низкую эффективность данного субстрата по сравнению с термовермикулитом ТВ2-Н. У растений, посаженных в обычную почву, эта цифра достигала 76 %.

Выявлены различия ($p < 0,05$) в высоте растений между всеми экспериментальными вариантами. В частности, растения, выращенные в субстратах на основе термовермикулита ТВ2-Н в сочетании с почвой, были на 40 и 16 % выше (рис. 2, а), чем растения контрольной группы, что подчеркивает заметное

влияние выбранного субстрата на рост. В то же время в вариантах с Випон-2 в сочетании с почвой высота растений была ниже по сравнению с контрольной группой на 16 и 36 % соответственно.

Результаты показали, что растения на субстрате ТВ2-Н на 45 % превосходили по высоте растения, высаженные в субстрат Випон-2, что подтверждает более благоприятные условия роста, создаваемые первым типом субстрата (рис. 3).

Установлено, что надземная биомасса растений земляники ананасной, выращенных в субстрате, составленном из вермикулита ТВ2-Н и почвы, была на 22 % больше, чем у растений из контрольной группы ($p < 0,05$). Различий в надземной биомассе между вариантами с использованием вермикулита ТВ2-Н и почвы не выявлено. Обнаружено заметное снижение накопления биомассы у регенерантов земляники ананасной при их выращивании в субстрате Випон-2 и его смеси с почвой по сравнению

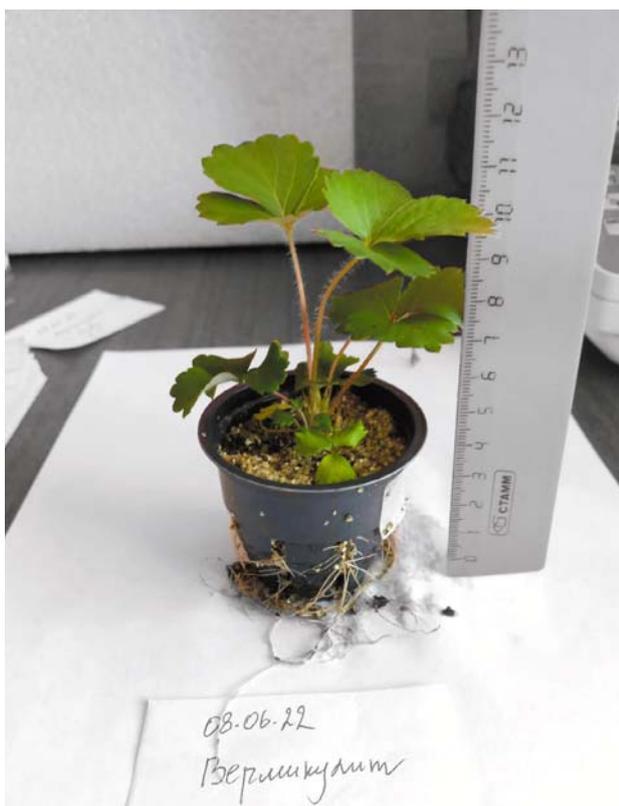


Рис. 3. Внешний вид растений земляники в вариантах ТВ2-Н и Випон-2 на 45-й день после посадки
 Fig 3. The appearance of strawberry plants in variants TV2-N and Vipon-2 on the 45th day after planting

с контрольными растениями (на 62 и 28 % соответственно) (рис. 2, b).

Анализ данных по биомассе корней показал, что во всех опытных вариантах она была статистически значимо выше, чем в контрольной группе. При этом среди экспериментальных вариантов не выявлено значительных различий, за исключением смеси вермикулита ТВ2-Н и почвы. В этом случае масса корней превышала контрольные показатели на 95 %. При использовании вермикулита ТВ2-Н без почвы, субстрата Випон-2, а также смеси Випон-2 с почвой наблюдалось увеличение корневой биомассы в среднем на 30 % по сравнению с контрольными растениями (рис. 2, c).

В течение экспериментального периода (45 дней) у растений земляники ананасной, размещенных во всех типах субстратов, сформировалось от 5 до 8 листьев. Различия в количестве листьев между разными вариантами не были статистически значимыми (рис. 2, d).

Общее содержание хлорофилла *a* и *b* у растений из всех экспериментальных групп между собой не различалось ($p > 0,05$).

Обсуждение

Результаты эксперимента продемонстрировали принципиальную возможность успешной адаптации растений, а также подтвердили положительное влияние выбранных субстратов на основные показатели, такие как приживаемость, высота и биомасса растений-регенерантов.

Отсутствие различий в общем содержании хлорофилла *a* и *b* может указывать на то, что фотосинтетический аппарат растений, выращенных на разных субстратах, функционирует примерно на схожем уровне.

Наилучшие результаты достигнуты при применении смеси почвы с вермикулитом марки ТВ2-Н, полученным путем обжига концентрата в электрической модульно-пусковой печи. Следует отметить, что, несмотря на более низкие показатели биомассы и высоты растений в других вариантах, уровень их выпадов оставался минимальным, а корневая система демонстрировала хорошее развитие. Это позволяет сделать вывод о высоком потенциале применения различных опытных субстратов для адаптации растений-регенерантов в процессе

клонального микроразмножения. В условиях отсутствия автоклавированной почвы термовермикулитовые субстраты могут служить эффективной альтернативой традиционным методам [de Souza Ferrari et al., 2020].

Важно подчеркнуть, что данный эксперимент проведен без использования минеральных удобрений, что, по всей видимости, негативно сказалось на качественных характеристиках растений после их перехода в рассадный период. Чистый термовермикулит, обладая относительно низким содержанием питательных веществ, ограничивал рост, особенно в варианте с использованием субстрата Випон-2, где повышенная плотность способствовала ухудшению условий для развития растений. Введение почвы в смеси с вермикулитом обеспечило необходимый пул питательных элементов, что, в свою очередь, оказало положительное влияние на рост и развитие растений [Галдина и др., 2018].

Тем не менее при использовании почвенных смесей для перевода растений из *in vitro* в *ex vitro* необходимо учитывать регламентированные процедуры по обеззараживанию данных субстратов методом автоклавирования, что представляет собой затратное и трудоемкое мероприятие. В связи с этим актуальными представляются дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния различных типов стерильных термовермикулитов, обогащенных минеральными веществами, на процесс адаптации клонально размноженных растений земляники ананасной в рассадный период. Это может способствовать получению здоровой и продуктивной рассады без необходимости использования органических субстратов, которые могут оказаться потенциально опасными для развития молодых растений-регенерантов.

Полученные результаты подтверждают предположение о том, что сочетание различных субстратов может значительно повлиять на успешность адаптации растений [Дедюхина и др., 2011]. Применение термовермикулита в комбинации с почвой дало лучшие результаты в отношении прироста биомассы корней в сравнении с чистым термовермикулитом. Это согласуется с наблюдениями, представленными в литературе, где акцентируется внимание на необходимости обеспечивать растения достаточным количеством питательных веществ в переходный из *in vitro* в *ex vitro* период [Us-Camas et al., 2014].

Следует отметить, что вермикулит обладает уникальными свойствами удержания влаги и аэрации, что критически важно для здоровья

корневой системы при переходе растений в более экстремальные условия [Иванова, 2008]. Тем не менее даже такое полезное свойство, как удержание влаги, может не способствовать усилению адаптационных возможностей растений, если не обеспечить достаточное количество макро- и микроэлементов [Lakho et al., 2023].

Заключение

Новый вермикулитовый субстрат марки ТВ2-Н продемонстрировал свою эффективность в улучшении показателей роста и приживаемости растений-регенерантов земляники ананасной при переходе из *in vitro* в *ex vitro* по сравнению с обычной почвой. Более того, выращивание растений в субстрате ТВ2-Н обеспечило им более высокий прирост биомассы корней и процент приживаемости по сравнению с ранее рекомендованным вермикулитом марки Випон-2. Использование смесей субстратов ТВ2-Н и Випон-2 с автоклавированной почвой имело преимущество по сравнению с использованием чистого термовермикулита, предоставляя растениям более полноценный питательный профиль.

Таким образом, субстраты на основе термовермикулита показали возможность успешной адаптации земляники ананасной при изменении условий выращивания (переходе из *in vitro* в *ex vitro*). Тем не менее необходимы дальнейшие исследования, касающиеся оптимизации субстратов для перевода регенерантов в *ex vitro* при микроклональном размножении разных видов растений. Это позволит улучшить практику клонального размножения и адаптации плодово-ягодных, декоративных и экзотических культур, особенно в условиях Севера.

Литература

- Болотников Д. П. Вермикулит. Мурманск: Мурман. кн. изд-во, 1964. 50 с.
- Бородулина И. Д., Плаксина Т. В. Адаптация растений-регенерантов земляники садовой сорта Московский Деликатес к условиям *ex vitro* // Acta Biol. Sib. 2015. № 1-2. С. 74–84. doi: 10.14258/abs.v1i1-2.832
- Галдина Т. Е., Калошин В. П., Самошин С. Е. Применение методов биотехнологии в декоративном растениеводстве // Субтропическое и декоративное садоводство. 2018. Т. 66. С. 105–112. doi: 10.31360/2225-3068-2018-66-105-112
- Дедюхина О. Н., Константинова А. С., Баранова О. Г. Адаптация растений-регенерантов *Eremogone saxatilis* (L.) Ikonn. к почвенным условиям // Вестник Удмуртского университета. 2011. Вып. 3. С. 31–35.

Елсакова С. Д., Елсаков Г. В. Ягодный сад на Кольском Севере. Мурманск, 1999.

Иванова Л. А., Слуковская М. В., Кременецкая И. П., Горбачева Т. Т. Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 37 с.

Иванова Л. А. Субстрат для культивирования растений-регенерантов при микроклональном размножении // Биотехнология как инструмент сохранения биоразнообразия растительного мира: Мат-лы II Всерос. науч.-практ. конференции (г. Волгоград, 19–21 августа 2008 г.). Белгород: Изд-во БелГУ, 2008. С. 171–174.

Иванова Л. А. Технология выращивания альстромерии гибридной в Заполярье. Информ. листок № 152. Мурманск: Мурм. межотрасл. террит. ЦНТИ и пропаганды, 1996. С. 96.

Крицкая Т. А., Петрова Н. А., Кашин А. С. Подготовка регенерантов *Potentilla vulgarica* Juz. (Rosaceae) к высадке из культуры *in vitro* в природные условия // Бюллетень Ботанического сада Саратовского государственного университета. 2014. № 12. С. 143–148.

Мацнева О. В., Ташматова Л. В. Клональное микроразмножение земляники – перспективный метод современного питомниководства (обзор) // Современное садоводство. 2019. № 4. С. 113–119. doi: 10.24411/2312-6701-2019-10411

Мосендз И. А., Кременецкая И. П. Оценка влияния способов термообработки вермикулита для применения его в качестве гидропонного субстрата // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 248–252. doi: 10.31241/FNS.2022.19.045

Нижегородов А. И. Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов // Новые огнеупоры. 2015. № 10. С. 22–27. doi: 10.17073/1683-4518-2015-10-22-27

Чудецкий А. И., Родин С. А., Зарубина Л. В., Кузнецова И. Б., Тяк Г. В. Микроклональное размножение и особенности адаптации к условиям *ex vitro* лесных ягодных растений рода *Vaccinium* // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52, № 3. С. 570–581. doi: 10.21603/2074-9414-2022-3-2386

Шибанова Н. Л., Орлова М. В. Микроклональное размножение *Citrus limon* (L.) Osbeck сорта Павловский // Биотехнология. 2018. № 1. С. 57–61. doi: 10.17072/1994-9952-2018-1-57-61

Cardoso J. C., Sheng Gerald L. T., Teixeira da Silva J. A. Micropropagation in the twenty-first century // Plant Cell Culture Protocols. Methods in Molecular Biology. 2018. Vol. 1815. P. 17–46. doi: 10.1007/978-1-4939-8594-4_2

de Souza Ferrari M. P., da Cruz R. M. S., dos Santos Queiroz M., de Andrade M. M., Alberton O., Magalhães H. M. Efficient *ex vitro* rooting, acclimatization, and cultivation of *Curcuma longa* L. from mycorrhizal fungi // J. Crop Sci. Biotechnol. 2020. Vol. 23. P. 469–482. doi: 10.1007/s12892-020-00057-2

Erst A. A., Erst A. S., Shaulo D. N. *In vitro* propagation of *Dianthus mainensis*, an endemic plant from the West Sayan (North Asia) // Taiwan. 2014. Vol. 59(2). P. 106–110. doi: 10.6165/tai.2014.59.106

Hoang N. N., Kitaya Y., Shibuya T., Endo R. Effects of supporting materials in *in vitro* acclimatization stage on *ex vitro* growth of wasabi plants. *Scientia Hort.* 2020. Vol. 261. Art. 109042. doi: 10.1016/j.scienta.2019.109042

Iwuagwu M. O., Nwosu N. N. Performance of *in vitro* cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plantlets weaned with locally sourced substrates // International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology. 2018. Vol. 3(2). P. 663–669. doi: 10.22161/ijeab/3.2.47

Lakho M. A., Jatoi M. A., Solangi N., Abul-Soad A. A., Qazi M. A., Abdi G. Optimizing *in vitro* nutrient and *ex vitro* soil mediums-driven responses for multiplication, rooting, and acclimatization of pineapple // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 1275. doi: 10.1038/s41598-023-28359-9

Schiavon A. V., Becker T. B., Delazeri E. E., Vignolo G. K., Mello-Farias P., Antunes L. E. C. Production and quality of strawberry plants produced from different nutrient solutions in soilless cultivation // Revista Ceres. 2022. Vol. 69, no. 3. P. 348–357. doi: 10.1590/0034-737X202269030013

Teixeira da Silva J. A., Dewir Y. H., Wicaksono A., Sahjiram L., Kim H., Zeng S., Chandler S. F., Hosokawa M. African violet (*Saintpaulia ionantha* H. Wendl.): Classical breeding and progress in the application of biotechnological techniques // Folia Hort. 2017. No. 29/2. P. 99–111. doi: 10.1515/fhort-2017-0010

Trejo-Téllez L. I., Gómez-Merino F. C. Nutrient management in strawberry: effects on yield, quality and plant health // Strawberries: Cultivation, Antioxidant Properties and Health Benefits. Hauppauge, NY: Nova Science Publ., 2014. P. 239–267.

Us-Camas R., Rivera-Solís G., Duarte-Aké F., De-la-Peña C. *In vitro* culture: an epigenetic challenge for plants // Plant Cell Tiss. Org. Cult. 2014. Vol. 118. P. 187–201.

Valasevich N., Kukharchyk N., Krasinskaya T. Influence of adaptation substrates on morphological development of raspberry plantlets during acclimatization *ex vitro* // Acta Hort. 2009. Vol. 812. P. 409–414. doi: 10.17660/ActaHort.2009.812.57

References

Bolotnikov D. P. Vermiculite. Murmansk: Murm. kn. izd-vo; 1964. 50 p. (In Russ.)

Borodulina I. D., Plaksina T. V. *Ex vitro* adaptation of regenerated strawberry (Moscow Delicacy variety). *Acta Biol. Sib.* 2015;1-2:74–84. (In Russ.). doi: 10.14258/abs.v1i1-2.832

Cardoso J. C., Sheng Gerald L. T., Teixeira da Silva J. A. Micropropagation in the twenty-first century. *Plant Cell Culture Protocols. Methods in Molecular Biology.* 2018;1815:17–46. doi: 10.1007/978-1-4939-8594-4_2

Chudetskii A. I., Rodin S. A., Zarubina L. V., Kuznetsova I. B., Tyak G. V. Clonal micropropagation and peculiarities of adaptation to *ex vitro* conditions of forest berry plants of the genus *Vaccinium*. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology.* 2022;52(3):570–581. (In Russ.). doi: 10.21603/2074-9414-2022-3-2386

Dedyukhina O. N., Konstantinova A. S., Baranova O. G. Adaptation of regenerated plants *Eremogone saxatilis* (L.) Ikonn. to soil conditions. *Vestnik Udmurtskogo universiteta = Bulletin of Udmurt University*. 2011;3:31–35. (In Russ.)

de Souza Ferrari M. P., da Cruz R. M. S., dos Santos Queiroz M., de Andrade M. M., Alberton O., Magalhães H. M. Efficient *ex vitro* rooting, acclimatization, and cultivation of *Curcuma longa* L. from mycorrhizal fungi. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 2020;23:469–482. doi: 10.1007/s12892-020-00057-2

Elsakova S. D., Elsakov G. V. Berry orchard in the Kola North. Murmansk; 1999. (In Russ.)

Erst A. A., Erst A. S., Shaulo D. N. *In vitro* propagation of *Dianthus mainensis*, an endemic plant from the West Sayan (North Asia). *Taiwania*. 2014;59(2):106–110. doi: 10.6165/ta.2014.59.106

Galdina T. E., Kaloshin V. P., Samoshin S. E. Applying biotechnology techniques in ornamental horticulture. *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo = Subtropical and Ornamental Gardening*. 2018;66:105–112. (In Russ.). doi: 10.31360/2225-3068-2018-66-105-112

Hoang N. N., Kitaya Y., Shibuya T., Endo R. Effects of supporting materials in *in vitro* acclimatization stage on *ex vitro* growth of wasabi plants. *Scientia Hortic.* 2020;261:109042. doi: 10.1016/j.scienta.2019.109042

Ivanova L. A., Slukovskaya M. V., Kremenetskaya I. P., Gorbacheva T. T. It's time to green the Arctic. Innovative lawn technologies for creating grass for various purposes in the Arctic. Apatity: KSC RAS; 2020. 37 p. (In Russ.)

Ivanova L. A. Substrate for cultivating regenerated plants for microclonal propagation. *Biotekhnologiya kak instrument sokhraneniya bioraznobraziya rastitel' nogo mira: Mat-ly II Vseros. nauch.-prakt. konferentsii (Volgograd, 19–21 avgusta 2008 g.) = Biotechnology as a tool for preserving the biodiversity of flora: Proceed. II All-Russian scientific and practical conference (Volgograd, August 19–21, 2008)*. Belgorod: BelGU, 2008. P. 171–174. (In Russ.)

Ivanova L. A. A technique for growing hybrid alstroemeria in the Arctic. *Inform. bull. No. 152*. Murmansk: Murm. mezhotrasl. territ. TsNTI i prop.; 1996. P. 96. (In Russ.)

Iwuagwu M. O., Nwosu N. N. Performance of *in vitro* cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plantlets weaned with locally sourced substrates. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*. 2018;3(2):663–669. doi: 10.22161/ijeab/3.2.47

Kritskaya T. A., Petrova N. A., Kashin A. S. Preparation of regenerated plants *Potentilla vulgarica* Juz. (Rosaceae) for landing from *in vitro* culture under natural conditions. *Byulleten' Botanicheskogo sada Saratovskogo*

gosuniversiteta = Bulletin of the Botanical Garden of Saratov State University. 2014;12:143–148. (In Russ.)

Lakho M. A., Jatoi M. A., Solangi N., Abul-Soad A. A., Qazi M. A., Abdi G. Optimizing *in vitro* nutrient and *ex vitro* soil mediums-driven responses for multiplication, rooting, and acclimatization of pineapple. *Scientific Reports*. 2023;13(1):1275. doi: 10.1038/s41598-023-28359-9

Matsneva O. V., Tashmatova L. V. Clonal micro-propagation of strawberries – a promising method of modern nursery breeding (review). *Sovremennoe sadovodstvo = Modern Horticulture*. 2019;4:113–119. (In Russ.). doi: 10.24411/2312-6701-2019-10411

Mosendz I. A., Kremenetskaya I. P. Evaluating the effect of vermiculite heat treatment methods for its application as a hydroponic substrate. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN = Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*. 2022;19:248–252. (In Russ.). doi: 10.31241/FNS.2022.19.045

Nizhegorodov A. I. Electric modular firing furnaces with an energy recovery system for firing vermiculite concentrates. *Novye ognepory = New Refractories*. 2015;10:22–27. (In Russ.). doi: 10.17073/1683-4518-2015-10-22-27

Schiavon A. V., Becker T. B., Delazeri E. E., Vignolo G. K., Mello-Farias P., Antunes L. E. C. Production and quality of strawberry plants produced from different nutrient solutions in soilless cultivation. *Revista Ceres*. 2022;69(3):348–357. doi: 10.1590/0034-737X202269030013

Shibanova N. L., Orlova M. V. Microclonal propagation of *Citrus limon* (L.) Osbeck variety Pavlovsky. *Biotekhnologiya = Biotechnology*. 2018;1:57–61. doi: 10.17072/1994-9952-2018-1-57-61

Teixeira da Silva J. A., Dewir Y. H., Wicaksono A., Sahijram L., Kim H., Zeng S., Chandler S. F., Hosokawa M. African violet (*Saintpaulia ionantha* H. Wendl.): Classical breeding and progress in the application of biotechnological techniques. *Folia Hortic.* 2017;29/2: 99–111. doi: 10.1515/fhort-2017-0010

Trejo-Téllez L. I., Gómez-Merino F. C. Nutrient management in strawberry: effects on yield, quality and plant health. *Strawberries: Cultivation, Antioxidant Properties and Health Benefits*. Hauppauge, NY: Nova Science Publ.; 2014. P. 239–267.

Us-Camas R., Rivera-Solis G., Duarte-Aké F., De-la-Peña C. *In vitro* culture: an epigenetic challenge for plants. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 2014;118:187–201.

Valasevich N., Kukharchyk N., Krasinskaya T. Influence of adaptation substrates on morphological development of raspberry plantlets during acclimatization *ex vitro*. *Acta Hortic.* 2009;812:409–414. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.812.57

Поступила в редакцию / received: 14.05.2024; принята к публикации / accepted: 05.11.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ярцева Мария Александровна

аспирант, ведущий инженер Лаборатории интродукции и акклиматизации растений

e-mail: 468975@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Yartseva, Maria

Doctoral Student, Leading Engineer

Хвостова Александра Борисовна

аспирант, специалист

e-mail: a.khvostova.k-2@mail.ru

Иванова Любовь Андреевна

д-р биол. наук, главный научный сотрудник
Лаборатории декоративного цветоводства
и озеленения ПАБСИ КНЦ РАН; ведущий научный
сотрудник ИППЭС КНЦ РАН

e-mail: ivanova_la@inbox.ru

Слуковская Марина Вячеславовна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник
Лаборатории природоподобных технологий
и техносферной безопасности Арктики ФИЦ
КНЦ РАН; научный сотрудник ИХТРЭМС КНЦ РАН

e-mail: m.slukovskaya@ksc.ru

Khvostova, Alexandra

Doctoral Student, Specialist

Ivanova, Lubov

Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, PABGI KSC RAS;
Leading Researcher, INEP KSC RAS

Slukovskaya, Marina

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory
of Nature-Inspired Technologies and Environmental
Safety of the Arctic, KSC RAS; Researcher,
ICTREMRM KSC RAS