

Возможности использования карбонизата из избыточного активного ила для культивирования *in vitro* межвидовых гибридов *Populus L.*

И. В. Могилевская

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия

E-mail: mogilevskaya-i@vfanc.ru

Аннотация. Цель – провести оценку возможности использования карбонизата из избыточного активного очистных сооружений биологической очистки сточных вод для культивирования растений *in vitro* как аналога активированного угля. **Методы.** Выращивание эксплантов межвидовых гибридов *Populus F1* в течение 6 недель проводили стандартными методами, принятыми в биотехнологии. Культивирование осуществляли в строго контролируемых условиях в климатической камере Ve Farm Clima 2: температура $25 \pm 0,2$ °C, интенсивность освещения $40 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, длительность фотопериода 16/8 ч, спектральное соотношение красной (КС), синей (СС) и зеленой (ЗС) составляющих КС : СС : ЗС = 2,5 : 1,0 : 0,4 для эффективного ризогенеза. Для определения содержания общего хлорофилла листовых пластин эксплантов использовали оптический метод. **Научная новизна.** Впервые проведена оценка возможности применения аналога активированного угля – карбонизата – для культивирования *in vitro* гибридов *Populus F1*, полученного методом низкотемпературного пиролиза при 500 °C. **Результаты.** Определен широкий спектр морфометрических показателей побегов и листовых пластин исследуемых объектов, а также основной показатель работы фотосинтетического аппарата – содержание общего хлорофилла. Подтверждена эффективность использования исследуемого сорбента как аналога активированного угля. Полученные на среде MS по протоколу Murashige and Skoog с добавлением карбонизата в концентрации 2,5 г/л данные по длине корня, проценту укорененных побегов, сухой массе побегов значительно отличаются от данных на среде с добавлением активированного угля в такой же концентрации. Карбонизат из отходов стадии биологической очистки – избыточного активного ила – получен без дополнительной высокотемпературной стадии, что существенно удешевляет процесс получения сорбента и делает эффективным его применение в технологии микрклонального размножения древесных растений. Отсутствие статистических различий по длине побега, размерам листовых пластин и листовому индексу относительно результатов, полученных в контрольной среде, подтверждает безопасность применения данного продукта для микрклонального размножения.

Ключевые слова: гибриды *Populus*, *in vitro*, микрклональное размножение, карбонизат, активированный уголь, морфогенез

Благодарности. Работа была выполнена в рамках Государственного задания ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (тема № 125021402244-3 «Изучение основных путей реализации морфогенеза *in vitro* и факторов абиотической и биотической природы, регулирующих процессы регенерации древесно-кустарниковых и культурных растений»). Авторы благодарят лабораторию селекции, семеноводства и питомниководства ФНЦ агроэкологии РАН.

Для цитирования: Могилевская И. В. Возможности использования карбонизата из избыточного активного ила для культивирования *in vitro* межвидовых гибридов *Populus L.* // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 07. С 1085–1094. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-07-1085-1094>.

Дата поступления статьи: 06.03.2025, **дата рецензирования:** 12.04.2025, **дата принятия:** 22.05.2025.

Possibilities of using carbonizate from excess activated sludge for in vitro cultivation of *Populus* L. interspecific hybrids

I. V. Mogilevskaya

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

E-mail: mogilevskaya-i@vfanc.ru

Abstract. The purpose is to evaluate the possibility of using carbonizate from excess active biological wastewater treatment plants for in vitro plant cultivation as an analogue of activated carbon. **Methods.** The cultivation of explants of interspecific hybrids *Populus* F1 for 6 weeks was carried out with standard biotechnological methods. Cultivation was carried out under strictly controlled conditions in the climatic chamber Ve Farm Clima 2: temperature 25 ± 0.2 °C, light intensity $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, photoperiod duration 16/8 hours, and spectral ratio of red (R), blue (B), and green (G) components of R : B : G = 2.5 : 1.0 : 0.4 for effective rhizogenesis. To determine the total chlorophyll content in the leaf plates of explants, the optical method was used. **Scientific novelty.** For the first time, an assessment of the possibility of applying an analogue of activated carbon – carbonizate – for the cultivation of in vitro *Populus* F1 hybrids obtained by low-temperature pyrolysis at 500 °C. **Results.** A wide range of morphometric indicators of shoots and leaf plates of the objects studied was determined, and the main indicator of the photosynthetic apparatus' work was the total chlorophyll content. The efficiency of the studied sorbent as an analogue of activated carbon was confirmed. The obtained data at MS medium with the Murashige and Skoog protocol and the addition of carbonizate at a concentration of 2.5 g L^{-1} in the root length, the percentage of rooted shoots, and the shoot dry mass differ significantly from the data with the addition of activated carbon in the same concentration. Carbonizate from the waste of biological cleaning – excessive active silt – was obtained without an additional high-temperature stage, which significantly reduces the process of obtaining sorbent and makes it effective in the technology of woody plants' tissue culture. The lack of statistical differences in the shoot length, the sizes of leaf plates, and the leaf index regarding the results obtained in the control medium confirms the safety of the product's use for the micropropagation.

Keywords: *Populus* hybrids, in vitro, carbonizate, activated carbon, morphogenesis, micropropagation

Acknowledgements. The study was performed within the framework of the State Assignment of the Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Forestry of the Russian Academy of Sciences (No. 125021402244-3 “Study of the main pathways of morphogenesis in vitro and factors of abiotic and biotic nature regulating the processes of regeneration of woody-shrub and cultivated plants”). The authors would like to thank the Laboratory of Breeding, Seed Production and Nursery Production of the Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Mogilevskaya I. V. Possibilities of using carbonizate from excess activated sludge for in vitro cultivation of *Populus* L. hybrids. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (07): 1085–1094. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-07-1085-1094>. (In Russ.)

Date of paper submission: 06.03.2025, **date of review:** 12.04.2025, **date of acceptance:** 22.05.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Сегодня в сельскохозяйственном производстве стремятся к использованию экологической концепции, а также биологических принципов. Достижение осуществляется за счет комплекса мер, которые направлены на сохранение генофонда растений, поддержание плодородия почвы и рациональное использование экологически безопасных компонентов для размножения растений, в том числе в культуре *in vitro*.

В технологии микроклонального размножения на разных этапах исследователи часто применяют сорбенты, среди которых очень распространен активированный уголь (АУ). Его получают путем двухстадийного обжига углеродсодержащих органических веществ (например, древесины, различные виды скорлупы от орехов и косточковых культур; каменноугольный кокс). Активированный уголь образуется после активации карбонизата, полученного на первой стадии при температуре 400–600 °C, на второй стадии – при температуре 800–1000 °C.

Вторая стадия – активация – проходит с использованием водяного пара или различных смесей жидкостей [1]. Такой продукт на выходе содержит большое количество пор, что способствует появлению значительной удельной поверхности на единицу массы и, как следствие, высокой адсорбции. За счет такой структуры происходит поглощение различных примесей.

Активированный уголь (АУ) часто используют в качестве стимулирующего средства, высвобождающих вещества для подавления соединений, способствующих потемнению питательной среды (например, фенольных). При изучении антиоксидантов и их ингибирования фенольных соединений сорго *in vitro*, а также их влияния на высоту растений установлено, что незначительный прирост (0,2–1,3 см) наблюдался при применении АУ [2]. Эффекты активированного угля, способствующие развитию морфогенеза, исследователи часто связывают с адсорбцией замедляющих рост соединений и снижением накопления токсических метаболитов [3–5]. Например, в исследовании К. Р. Бикметовой и Т. В. Терещенко добавление 3 мг/л аскорбиновой кислоты и 1 г/л АУ способствовали развитию микробе-гов *Cotinus coggygia in vitro*. Исследования проводились с концентрациями углеродного сорбента от 1 до 5 г/л [5]. С целью укоренения роста эксплантов Е. Н. Васильченко с соавторами модифицировали питательную среду для устранения эффектов, которые могут вызвать ауксины в условиях *in vitro*, различными концентрациями активированного угля. Положительное влияние (увеличение частота образования корней на 7,8–10,7 %) на ризогенез оказала небольшая концентрация АУ (3 мг/л) совместно с индолилмасляной кислотой (ИМК) и нафтилуксусной кислотой (НУК) [6]. J. P. R. Martins с соавторами сообщили в своем исследовании, что у проростков, выращенных с добавлением АУ в концентрации 2 г/л наблюдалась более высокая биомасса и большее количество фотосинтетических пигментов. АУ также улучшил работу фотосинтетического аппарата, процесс укоренения черенков *Quercus robur in vitro* [7]. Таким образом, активированный уголь в различных концентрациях часто используется в культуре тканей для улучшения роста и развития клеток.

Во многих научных исследованиях [9; 10] питательные среды с добавлением АУ используют для хранения *in vitro* и для поглощения выделяющихся в результате окисления фенолов, которые могут тормозить рост и приводить к гибели культур. В своем исследовании К. Р. Баймухаметова и Б. Р. Кулуев делали акцент на том, что выбор метода устранения потемнения зависит от видовой и сортовой принадлежности исследуемого объекта. Некоторые соединения, например активированный уголь, аскорбиновая кислота, нитрат серебра, классифицируют

как универсальное и эффективное средство борьбы с потемнением эксплантов *in vitro*. [4].

В связи с глобальным изменением климата и увеличением масштабов антропогенных нагрузок возрастает необходимость в растениях с повышенной устойчивостью, к которым можно отнести и тополь. Древесные растения рода *Populus* L. широко распространены в Северном полушарии и насчитывают более 30 видов [11]. Многие виды обладают таким ценными свойствами, как быстрый рост, экологическая пластичность, которые способствуют увеличению продуктивности лесных насаждений и срокам их выращивания. Некоторые виды, например *P. alba* или *P. suaveolens*, обладают способностью к биоаккумуляции тяжелых металлов (Cd, Cr и Ni) [12]. Все эти ценные качества позволяют отнести тополь к хозяйственно важным видам деревьев в связи со способностью к интенсивному росту и накоплению за короткий промежуток времени больших запасов древесины. С помощью биотехнологических методов идет ускорение процесса селекции, благодаря которому можно в более короткие сроки размножить ценные генотипы [13].

В связи со всем вышеупомянутым актуальность использования активированного угля в технологии микроклонального размножения не вызывает сомнений. В настоящем исследовании оценена возможность замены АУ карбонизатом из отходов – избыточного активного ила, образующегося в технологическом процессе на стадии биологической очистки бытовых и промышленных сточных вод шести районов Волгограда, которую проводят на станции аэрации о. Голодный. Карбонизат прошел только первую стадию обжига (низкотемпературный пиролиз при 500 °C) и не был активирован на второй стадии. Поэтому целью нашего исследования являлась оценка возможности использования карбонизата из избыточного активного ила в культивировании растений *in vitro* как аналога активированного угля.

Методология и методы исследования (Methods)

В качестве объектов исследования были отобраны гибриды *Populus* F1, полученные в лаборатории селекции и семеноводства ФНЦ агроэкологии РАН методом опыления на срезанных ветвях [14]. В результате комбинаций направленного скрещивания отобранных родительских линий [15] (*Populus deltoids* W. Bartram ex Marshall × *Populus alba* L. (F1-3), *Populus nigra* L. var. *pyramidalis* (Rozer) Čelak. × *Populus alba* L. (F1-5) и *Populus alba* × *alba* v. *pyramidalis* × *Populus alba* L. (F1-2) были получены незрелые семена *Populus*. Далее методом изолирования незрелых зародышей [16] получили и размножили стерильную культуру генотипов *Populus* F1. *in vitro*.

В эксперименте использовали 3 генотипа из разных скрещиваний *Populus* F1: F1-2g12, F1-3g14, F1-

5g3. Культивирование осуществляли на питательной среде (MS) по протоколу Murashige – Skoog (MS) [17; 18] в трех вариантах: без добавления сорбентов, с добавлением сорбента уголь активированный – УБФ (ООО «Уралбиофарм») в концентрации 2,5 мг/л (У) и карбонизата в концентрации 2,5 мг/л (К). Карбонизат с фракционным составом < 0,6 мм получен низкотемпературным пиролизом (500 °C) из избыточного активного ила (ИАИ) очистных сооружений станции аэрации на о. Голодный (Волгоград) согласно методике [19]. В качестве контроля использовали питательную среду MS без добавления сорбентов и регуляторов роста. При приготовлении вариантов сред сорбенты добавляли до автоклавирования, pH среды после внесения сорбентов доводили до значения 5,8. Подготовленные среды стерилизовали при температуре $T = 121$ °C, далее их разливали в асептических условиях в ламинарном боксе Neoteric (Lamsystems, Российская Федерация) по 12–15 мл в биологические пробирки. Для предотвращения осаждения сорбента и равномерного распределения в среде колбы постоянно перемешивали при разливе вариантов сред с сорбентами. Культивирование эксплантов генотипов гибридов *Populus* проводили в определенных климатических условиях, обеспечиваемых камерой Ve Farm Clima 2: температура $25 \pm 0,2$ °C, фотопериод – 16/8 ч в течение 6 недель. Светодиоды расположены внутри на расстоянии 2 см от верхней части пробирок. В климатической камере были настроены оптимальные условия освещения [20] с помощью фотометра: 40 мкль $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ спектральном соотношении красной (KC), синей (CC) и зеленой (ЗС) составляющих $KC : CC : ЗС = 2,5 : 1 : 0,4$. Для установления уровня освещенности (необходимой фотосинтетической плотности потока фотонов (PPFD)) использовали компактный датчик спектрального состава фотонного потока с сенсорным экраном L600D (RoHS Compliant, Тайвань) и программное обеспечение UspectrumX 1.00 (UPRtek, Тайвань), а также онлайн-конвертер в PPFD [21]. Культивирование эксплантов проводили в тройной биологической повторности по 10 пробирок в каждой.

Для определения свежего веса побега целиком взвешивали на весах ВЛ-120 С (Gosmeter, Россия), далее образцы высушивали при температуре 105 °C в течение 2 часов с помощью стерилизатора воздушного ГП-40 (Vityas, Беларусь). После охлаждения взвешивали образцы для определения параметра «сухой вес».

Для получения данных о содержании общего хлорофилла в листовых пластинах проводили фиксацию результатов до взвешивания побегов с использованием портативного измерителя хлорофилла SPAD-502+ (Konica, Япония). Пересчет из единиц SPAD в мкг см^{-2} проводили по формуле [22]:

$$CHL = \frac{99SPAD}{144 - SPAD}, \quad (1)$$

где CHL – количество общего хлорофилла, мкг/см^2 ;

SPAD – результат, полученный после измерения листовой пластины с помощью портативного измерителя хлорофилла SPAD-502 Plus, единицы SPAD.

Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась с использованием программ ImageJ (США) и Excel 2016. Были рассчитаны средние значения и стандартные ошибки, а статистическая значимость различий между средними значениями оценивалась с помощью дисперсионного анализа или критерия множественных диапазонов Дункана (Duncan's test) при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты (Results)

В ходе проведенного исследования определены длина побега и длина корня, количество корней, процент укоренения, длина, ширина и площадь листовой пластины, а также величина листового индекса, содержание общего хлорофилла, свежий и сухой вес побегов.

Длина побега после культивирования в течение 6 недель на контрольной среде MS и с содержанием сорбентов (активированного угля (У) и карбонизата (К)) и существенно не различалась как для разных генотипов, так и средняя по всем скрещиваниям (отсутствие различий по критерию Дункана) (рис. 1).

Анализ данных показал, что введение в среду обоих видов сорбентов не повлияло на увеличение длины, но и не оказало отрицательного действия на рост побегов, что свидетельствует об отсутствии токсичности исследуемого сорбента из избыточного активного ила (ИАИ).

Длина корня по результатам нашего эксперимента не отличалась статистически при культивировании гибридов *Populus* F1 на среде с использованием карбонизата (К) и без добавления сорбентов (MS) (рис. 1, б). Сравнение средних длин корней всех исследуемых генотипов показало, что на контрольной среде и среде с добавлением карбонизата параметры статистически не отличаются (10,79 см) и (10,08 см), в то время как культивирование на среде с добавлением активированного угля снизило средний показатель более чем на 40 % (5,97 см). Такая же тенденция прослеживалась на генотипе *Populus* F1g12 (рис. 2).

Сравнение регенерантов на среде с карбонизатом и активированным углем (рис. 2, а и б) показало активное развитие и увеличение длины корней относительно среды с добавлением активированного угля. Кроме того, среда с карбонизатом при одинаковой концентрации более прозрачная, чем такая же с АУ, что удобнее в использовании (для наблюдения и визуальной оценки промежуточных результатов). Как видно из рис. 2, побеги и корни у *Populus* F1g12

равномерно развивались на среде с добавлением карбонизата, листья по цветовому оттенку не отличались от выращенных на контрольной среде MS.

Через две недели длина корней на среде К уже отличалась от длины регенерантов на среде с добавлением активированного угля (рис. 2, б, в).

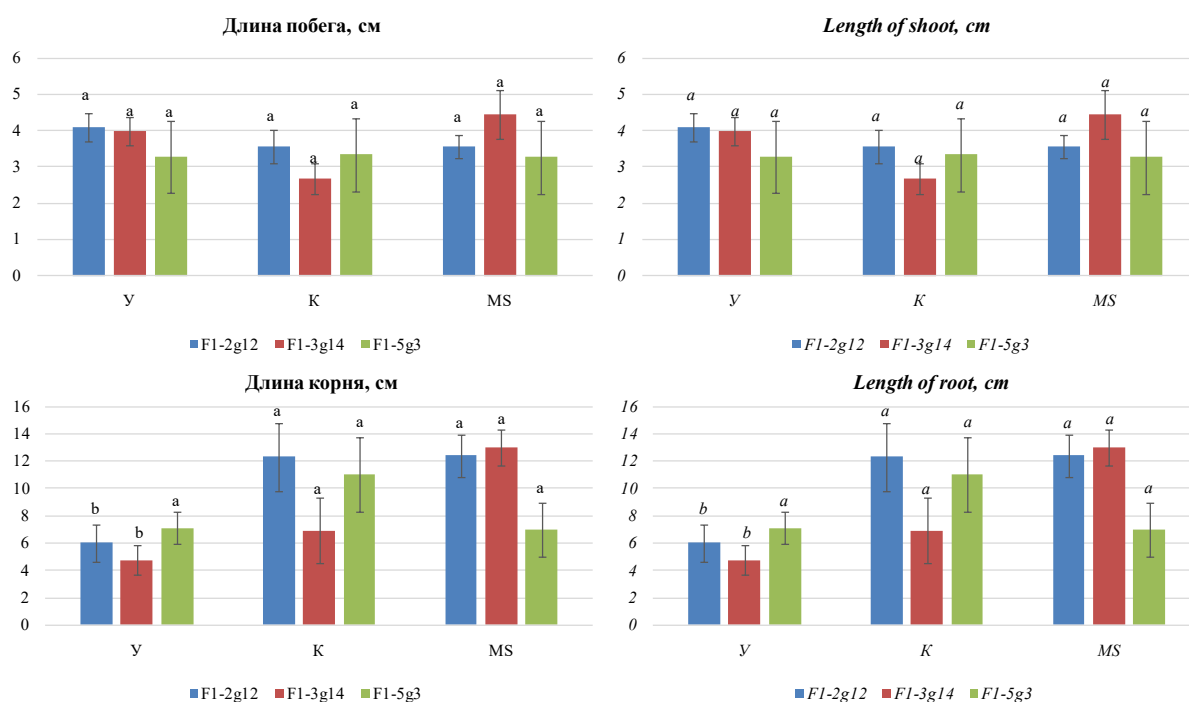


Рис. 1. Длина побега (а) и длина корня (б) после 6 недель культивирования на средах: У – активированный уголь, К – карбонизат, MS – контроль. Разные буквы в каждом столбце показывают статистически значимые различия согласно Duncan's-test при $p < 0,05$

Fig. 1. Length of shoot (a) and length of root (b) after six weeks of growth on nutrient medium: U – carbon activated, C – carbonizate, MS – control. The different letters in each column show statistically significant differences according to Duncan's-test at $p < 0.05$



Рис. 2. Регенеранты *Populus F1g12* через 2 недели (а, б, в) и 6 недель (д, е, ф) культивирования на разных средах. Масштаб длины соответствует 1 см

Fig. 2. *Populus F1g12* regenerants after 2 (a, b, c) and 6 weeks (d, e, f) of cultivation on different medium. The length scale corresponds to 1 cm

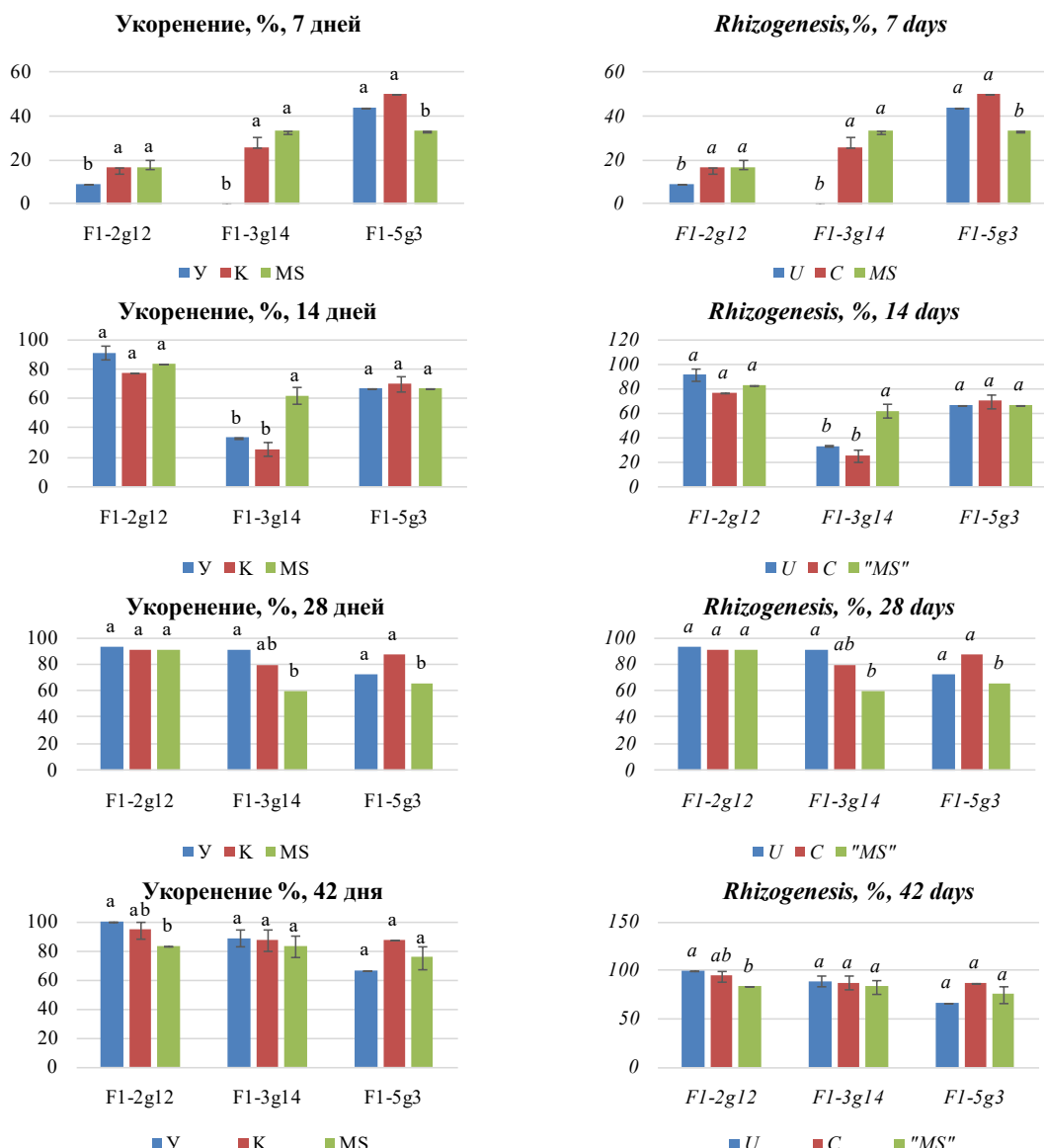


Рис. 3. Динамика укоренения гибридов *Populus* F1, % на средах. У – активированный уголь, К – карбонизат, MS – контроль. Разные буквы в каждом столбце показывают статистически значимые различия согласно Duncan's test, при $p < 0,05$.

В течение всего срока культивирования отслеживали процесс укоренения эксплантов выбранных генотипов *Populus* F1. (рис. 3). Анализируя возможность использования в качестве добавки в среду карбонизата, можно заметить, что через 7 дней процент укоренения (50 %) у генотипа F1-5g3 отличался со значением на среде с содержанием угля 2,5 г/л (43,87 %) и был на треть выше, чем на среде MS. У генотипов F1-2g12 и F1-3g14 на среде с добавлением активированного угля укоренение отсутствует или значительно меньше, чем на среде MS и с добавлением карбонизата. Спустя 2 недели процент укоренения у всех исследуемых генотипов на средах выравнивается (рис. 2, б, рис. 3). Через 4 недели процент укоренения у генотипов F1-3g14 и F1-5g3 выше на средах с добавлением сорбентов, чем на контрольной среде MS.

Fig. 3. The dynamics of rhizogenesis of *Populus* F1 hybrids, % on media: U – activated carbon, C – carbonizate, MS – control. The different letters in each column show statistically significant differences according to Duncan's-test at $p < 0.05$.

С увеличением длительности культивирования до 42 дней процент укоренения у исследуемых был без статистических различий у генотипов F1-3g14 и F1-5g3 (рис. 3), статистические различия обнаружены только у генотипа F1-2g12 на среде MS. Таким образом, среда с добавлением карбонизата для укоренения способствует увеличению скорости ризогенеза (экспланты укореняются на более раннем сроке).

Статистический анализ сравнения числа корней показал отсутствие значимых различий между разными средами (по критерию Дункана). Число корней в течение всего периода культивирования (рис. 4) на средах с сорбентами и контрольной среде увеличивалось равномерно в среднем до 2–2,33 на 1 эксплант.

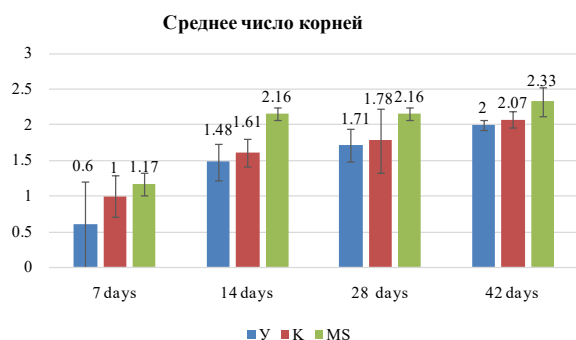


Рис. 4. Динамика увеличения числа корней на исследуемых питательных средах: У – активированный уголь, К – карбонизат, MS – контроль. Статистически значимые различия согласно Duncan's test при $p < 0,05$ отсутствуют

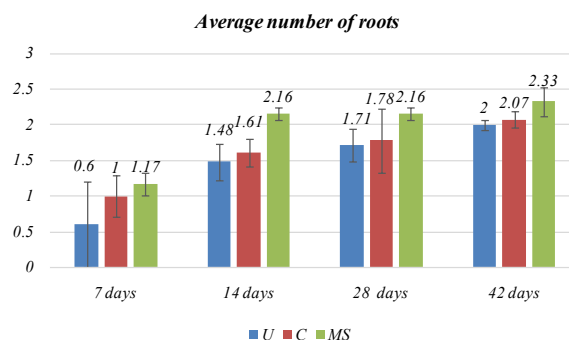


Fig. 4. Dynamics of the increase in the number of roots on the studied nutrient media: U – activated carbon, C – carbonizate, MS – control. There are no statistically significant differences according to Duncan's test at $p < 0.05$

Таблица 1
Усредненные показатели побегов и листовых пластин гибридов *Populus* после 6 недель культивирования на различных питательных средах

Наименование среды Параметр	Уголь активированный (У)	Карбонизат (К)	Контроль (MS)
Свежий вес, мкг	102,50 ± 14,09b	120,60 ± 17,37ab	147,80 ± 19,85a
Сухой вес, мкг	15,45 ± 1,87b	23,22 ± 5,31a	18,82 ± 2,12ab
СНЛ, мкг/см ²	21,02 ± 1,13b	25,64 ± 0,99a	26,90 ± 1,06a
Число листьев	10,27 ± 0,82a	10,33 ± 0,59a	10,09 ± 1,19a
Площадь листовой пластины, см ² (S)	0,72 ± 0,26a	0,63 ± 0,15a	0,45 ± 0,06a
Листовой индекс	2,93 ± 0,24a	2,93 ± 0,25a	2,83 ± 0,19a

Примечание. Разные буквы в строке одного параметра показывают статистически значимые различия согласно Duncan's test при $p < 0,05$.

Table 1
Average values of shoots and leaf plates of *Populus* hybrids after 6 weeks of growth on various nutrient medium

Medium Parameter	Carbon activated (U)	Carbonizate (C)	Control (MS)
Fresh weight, μg	102.50 ± 14.09b	120.60 ± 17.37ab	147.80 ± 19.85a
Dry weight, μg	15.45 ± 1.87b	23.22 ± 5.31a	18.82 ± 2.12ab
CL, $\mu\text{g}/\text{cm}$	21.02 ± 1.13b	25.64 ± 0.99a	26.90 ± 1.06a
Number of leaves	10.27 ± 0.82a	10.33 ± 0.59a	10.09 ± 1.19a
The area of leaf plate, cm ² (S)	0.72 ± 0.26a	0.63 ± 0.15a	0.45 ± 0.06a
Leaf Index	2.93 ± 0.24a	2.93 ± 0.25a	2.83 ± 0.19a

Note. Different letters in the string of the same parameter show statistically significant differences according to Duncan's-test at $p < 0.05$.

Карбонизат при добавлении в питательную среду не оказывал отрицательного влияния на развитие числа корней в течение всего срока наблюдения в эксперименте (рис. 4) и по своим свойствам не уступал по качеству активированному углю.

Сравнение между собой параметров свежего и сухого веса побегов (таблица 1) исследуемых гибридов *Populus* F1 свидетельствовало об отсутствии негативного влияния карбонизата при введении его в питательную среду MS. Минимальные значения свежего и сухого веса побегов получены на среде с добавлением активированного угля. Максимальное количество сухого накопленного вещества зафиксировали на среде К (2,5 г/л).

Анализ усредненных параметров (таблица 1) на питательных средах с сорбентами и без показал, что регенеранты на среде К по некоторым показателям были лучше, чем после культивирования на среде MS. Например, содержание общего хлорофилла на питательной среде с добавлением карбонизата значительно выше этого параметра на среде с АУ в концентрации 2,5 (г/л).

Величина полученного среднего значения общего содержания хлорофилла соответствует нормальной работе фотосинтетического аппарата исследуемых генотипов гибридов *Populus* и показывает отсутствие отрицательного влияния карбонизата на микропобеги исследуемых объектов in vitro.

Анализ параметров листовых пластин на всех трех питательных средах (таблица 1) показал отсутствие статистических различий. Такие результаты свидетельствовали о том, что листовые пластины на побегах развивались равномерно, ингибирования роста или ухудшения их качества при культивировании *in vitro* на среде с добавлением карбонизата не наблюдали. Такие данные подтверждают отсутствие токсичных веществ в исследуемом сорбенте – карбонизате.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Полученные данные показали, что длина побега у регенерантов генотипов гибридов *Populus* F1 после культивирования на контрольной среде и с добавлением сорбентов не имела статистических различий. Введение карбонизата не ухудшило состояния микропобегов – напротив, прирост оказался аналогичным культивированию на контрольной среде MS. Отсутствие влияния на ускорение роста верхней части побегов связано с действием, аналогичным действию активированного угля на клоны тополей в исследовании Е. А. Шабановой с соавторами, где добавление АУ использовали для хранения в культуре *in vitro*, но с большей концентрацией [9].

Добавление в питательную среду карбонизата (как аналога АУ) положительно сказалось на укоренении эксплантов на раннем этапе, что согласуется с данными Е. Н. Васильченко с соавторами (2019) [6]. Как показали результаты нашего исследования количество общего хлорофилла и сухого веса побегов при добавлении карбонизата были выше, чем при введении АУ и сопоставимы со значениями, полученными

на контрольной среде. В исследовании Martins и др. (2024) у проростков, выращенных на среде WPM с добавлением АУ в концентрации 2 г/л наблюдалась более высокая биомасса и большее количество фотосинтетических пигментов, произошло улучшение работы фотосинтетического аппарата, а также стимулирование процесса укоренения черенков *Quercus robur in vitro*: сами корни были более разветвленными, с корнями второго порядка [7].

Впервые проведено культивирование *in vitro* на питательной среде по протоколу Murashige и Skoog (MS) с добавлением в качестве сорбента отхода – карбонизата из избыточного активного ила очистных сооружений станции Аэрации о. Голодный (Волгоград). Подтверждена возможность использования данного вида сорбента для безопасного культивирования объектов – генотипов гибридов *Populus*. В ходе исследования получены данные о положительном влиянии карбонизата, полученного методом низкотемпературного пиролиза, на культивирование исследуемых образцов. Замечен больший процент укоренения (через 7 дней) на среде с добавлением карбонизата в концентрации 2,5 мг/л. Получены сопоставимые с контрольной средой данные о длине корня, содержании общего хлорофилла, накоплении сухой биомассы побега. Добавление активированного угля в такой же концентрации способствовало получению сниженных параметров по проценту укоренения, длине корня. Данные исследования будут востребованы в научном сообществе, так как появляется дополнительное применение отходов (ИАИ) в качестве аналога активированного угля для культивирования *in vitro*.

Библиографический список

1. Активированный уголь. Виды, свойства, характеристики [Электронный ресурс]. URL: <https://ecotime.tech/articles/activated-carbon> (дата обращения: 02.03.2025).
2. Сторожик Л. И., Войтковская В. И., Недяк Т. Н. Ингибирование фенольных соединений сорго сахарного *in vitro* [Электронный ресурс] // Sci-Article. 2015. № 21. URL: <https://sci-article.ru/stat.php?i=1428251593> (дата обращения: 02.03.2025).
3. Пугачева А. М., Бикметова К. Р., Смирнова Ю. С. Сорбенты фенолов как компоненты питательной среды в микроклональном размножении растений // Природные системы и ресурсы. 2021. Т. 11, № 3. С. 39–48. DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2021.3.6.
4. Баймухаметова Э. А., Кулуев Б. Р. Потемнение растительных тканей при культивировании *in vitro* и способы его предотвращения // Биотехнология. 2020. Т. 36, № 2. С. 26–42. DOI: 10.21519/0234-2758-2020-36-2-26-42.
5. Бикметова К. Р., Терещенко Т. В. Модификация питательной среды на этапе введения в культуру *in vitro* с целью снижения отрицательного действия фенольных соединений // От модернизации к опережающему развитию: обеспечение конкурентоспособности и научного лидерства АПК. Инновационные технологии в растениеводстве, традиционном, органическом и ресурсосберегающем земледелии: сборник статей, Екатеринбург, 2022. С. 31–34.
6. Васильченко Е. Н., Колесникова Е. О., Жужжалова Т. П. Индукция ризогенеза у сахарной свеклы в культуре *in vitro* // Сборник трудов Восемнадцатой Международной научно-практической конференции. Белгород, 2019. С. 42–50.
7. Martins J. P. R., Wawrzyniak M. K., Kalembe E. M., Ley-Lopez J. M., Lira J. M. S., Chmielarz P. In vitro rooting of *Quercus robur*, activated charcoal vs. exogenous auxin: a morphophysiological approach // Plant Cell and Tissue Organ Culture. 2024. Vol. 156, No. 24. DOI: 10.1007/s11240-023-02656-7.
8. Шабанова Е. А., Внукова Н. И., Машкина О. С. Влияние модификаций состава питательных сред на эффективность длительного хранения *in vitro* клонов тополя и осины // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2020. № 1. С. 42–49.

9. Климов А. В., Прошкин Б. В. Происхождение и эволюция рода *Populus* L. (семейство Salicaceae) // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14, № 2. С. 205–238. DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-2-205-238.
10. Собралиева Э. А., Джамаева А. Ю., Башуева А. М. Влияние адсорбционной способности активированного угля в составе питательной среды на приживаемость и морфогенез изолированных тканей картофеля *in vitro* // Методы повышения эффективности инновационных исследований в регионах СКФО: материалы студенческой научно-практической конференции. Грозный, 2023. С. 128–133. DOI: 10.36684/116-1-2023-128-133.
11. Фоменко Н. Г., Жолобова О. О., Сорокопудов В. Н. Ингибирование фенольных соединений на этапе введения в культуру *in vitro* *Ribes aureum* Pursh. для увеличения приживаемости эксплантов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 7. С. 85–92.
12. Miletic Z., Jonjev M., Jarić S., Kostić O., Sekulić D., Mitrović M., Pavlović P. Green solution to riparian pollution: *Populus alba* L. potential for phytoremediation and bioindication of PTEs along the Sava river // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28183.
13. Аминова Е. Ю., Табацкая Т. М., Машкина О. С. Оценка солеустойчивости *Populus* L. в условиях моделируемого стресса *in vitro* // Субтропическое и декоративное садоводство. 2021. № 79. С. 60–66. DOI: 10.31360/2225-3068-2021-79-60-66.
14. Эрст А. А., Шишкин С. В., Воронкова М. С. Получение межвидовых гибридов (*Populus alba* × *P. bolleana*) × *P. canescens* с использованием культуры *in vitro* // Сибирский лесной журнал. 2019. С. 45–52. DOI: 10.15372/SJFS20190204.
15. Крючков С. Н., Соломенцева А. С., Романенко А. К. Внутривидовые скрещивания выделенных биотипов родов вяз и тополь для получения гетерозисных селекционных форм // Аграрный вестник Урала. 2023. № 6 (235). С. 23–34. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-235-06-23-34.
16. Жолобова О. О., Могилевская И. В., Терещенко Т. В., Пугачева А. М., Солонкин А. В. Разработка принципов отбора засухоустойчивых гибридов, форм и клонов тополей в культуре *in vitro* // BIOAsia Altai 2024: материалы IV Международного биотехнологического форума. Барнаул, 2024. Т. 4, № 1. С. 299–302.
17. Phillips G. C., Garda M. Plant tissue culture media and practices: an overview // *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2019. Vol. 55. Pp. 242–257. DOI: 10.1007/s11627-019-09983-5.
18. Ряго Н. В., Панфилова О. В. Регенерационная способность генотипов подрода *Ribesia* Berl. в культуре *in vitro* // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 10. С. 1345–1358. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-10-1345-1358.
19. Голяткина В. А., Могилевская И. В., Колотова О. В., Яшкина Т. Е., Карасев Е. А., Голяткин И. А. Разработка биосорбента на основе карбонизата для очистки природных и сточных вод от нефтезагрязнений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 2 (34). С. 69–80. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.06.
20. Могилевская И. В., Жолобова О. О., Терещенко Т. В., Пугачева А. М., Солонкин А. В. Оптимизация спектрального состава, интенсивности освещения и длительности фотопериода для технологии микроклонального размножения гибридов тополей // BIOAsia Altai 2024: Материалы IV Международного биотехнологического форума. Барнаул, 2024. Т. 4, № 1. С. 337–341.
21. Convert Lux to PPFD – Online Calculator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lux-to-ppfd-online-calculator> (дата обращения: 02.03.2025).
22. Карпов М. В. Изменение функциональных признаков листьев лесных растений в различных условиях произрастания // Сборник тезисов III научной конференции Plantae & Fungi. Владивосток, 2023. С. 33. DOI: 10.17581/paf2023.23.

Об авторах:

Ирина Владимировна Могилевская, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия; ORCID 0000-0001-8421-4767, AuthorID 573135.
E-mail: mogilevskaya-i@vifanc.ru

References

1. Activated carbon. Types, properties, characteristics [Internet]. 2021 [cited 2025 March 02]. Available from: <https://ecotime.tech/articles/activated-carbon>. (In Russ.)
2. Storozhik L. I., Voykovskaya V. I., Nedyak T. N. Inhibition of phenolic compounds of sugar sorghum *in vitro* [Internet]. 2015 [cited 2025 March 02]. *Sci-Article*. 2015; 21. Available from: <https://sci-article.ru/stat.php?i=1428251593>. (In Russ.)
3. Pugacheva A. M., Bikmetova K. R., Smirnova Yu. S. Sorbents of phenols as components of the nutritional medium in microclonal reproduction of plants. *Natural Systems and Resources*. 2021; 11 (3): 39–48. DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2021.3.6. (In Russ.)
4. Baimukhametova E. A., Kuluev B. R. Darkening of plant tissues during *in vitro* cultivation and methods for its prevention. *Biotechnologiya*. 2020; 36 (2): 26–42. DOI: 10.21519/0234-2758-2020-36-2-26-42. (In Russ.)

5. Bikmetova K. R., Tereshchenko T. V. Modification of the nutrient medium at the injection stage in vitro culture in order to reduce the negative effect phenolic compounds. *From modernization to advanced development: ensuring competitiveness and scientific leadership of the agroindustrial complex. Innovative technologies in crop production, traditional, organic and resource-saving agriculture: collection of articles*. Ekaterinburg, 2022. Pp. 31–34. (In Russ.)
6. Vasilchenko E. N., Kolesnikova E. O., Zhuzhalova T. P. Induction of rhizogenesis in sugar beet in in vitro culture. *Proceedings of the 18th International Scientific and Practical Conference*. Belgorod, 2019. Pp. 42–50. (In Russ.)
7. Martins J. P. R., Wawrzyniak M. K., Kalembe E. M., Ley-Lopez J. M., Lira J. M. S., Chmielarz P. In vitro rooting of *Quercus robur*, activated charcoal vs. exogenous auxin: a morphophysiological approach. *Plant Cell and Tissue Organ Culture*. 2024; 156 (24). DOI: 10.1007/s11240-023-02656-7.
8. Shabanova E. A., Vnukova N. I., Mashkina O. S. Influence of modifications in the composition of nutrient media on the effectiveness of in vitro long-term storage of poplar and aspen clones. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2020; 1: 42–49. (In Russ.)
9. Klimov A. V., Proshkin B. V. Origin and evolution of the genus *Populus* L. (family Salicaceae). *Environment and Human: Ecological Studies*. 2024; 14 (2): 205–238. DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-2-205-238. (In Russ.)
10. Sobralieva E. A., Dzhumaeva A. Y., Bushueva A. M. Influence of adsorption capacity of activated carbon in the nutrient medium on engraftment and morphogenesis of isolated potato tissues in vitro. *Methods of improving the efficiency of innovative research in the regions of the North Caucasian Federal District: proceedings of the student scientific-practical conference*. Groznyy, 2023. Pp. 128–133. DOI: 10.36684/116-1-2023-128-133. (In Russ.)
11. Fomenko N. G., Zholobova O. O., Sorokopudov V. N. Inhibition of phenol compounds at the stage of introduction in vitro culture *Ribes aureum* Pursh. to increase explants ennobility. *Bulletin of the Kursk State Agriculural Academy*. 2022; 7: 85–92. (In Russ.)
12. Miletić Z., Jonjev M., Jarić S., Kostić O., Sekulić D., Mitrović M., Pavlović P. Green solution to riparian pollution: *Populus alba* L. potential for phytoremediation and bioindication of PTEs along the Sava river. *Heliyon*. 2024; 10 (7). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28183.
13. Amineva Y. Y., Tabatskaya T. M., Mashkina O. S. Assessment of *Populus* L. salt resistance under simulated stress conditions in vitro. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2021; 79: 60–66. DOI: 10.31360/2225-3068-2021-79-60-66. (In Russ.)
14. Erst A. A., Shishkin S. V., Voronkova M. S. The generation of interspecific hybrids in (*Populus alba* × *P. bolleana*) × *P. canescens* by in vitro culture. *Siberian Journal of Life Science*. 2019: 45–52. DOI: 10.15372/SJFS20190204. (In Russ.)
15. Kruchkov S. N., Solomentseva A. S., Romanenko A. K. Intraspecific crosses of selected biotypes of the *Ulmus* and *Populus* genera to obtain heterotic breeding forms. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 6 (235): 23–34. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-235-06-23-34. (In Russ.)
16. Zholobova O. O., Mogilevskaya I. V., Tereshchenko T. V., Solonkin A. V., Pugacheva A. M. Development of principles of selection of drought-tolerant hybrids, forms and clones of poplar in culture in vitro. *BIOAsia Altai 2024: Proceedings of the IV International Biotechnology Forum*. Barnaul, 2024. Vol. 4 (1). Pp. 299–302. (In Russ.)
17. Phillips G. C., Garda M. Plant tissue culture media and practices: an overview. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2019; 55: 242–257. DOI: 10.1007/s11627-019-09983-5.
18. Ryago N. V., Panfilova O. V. Regenerative ability of genotypes of the *Ribesia* Berl. in vitro. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (10): 1345–1358. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-10-1345-1358. (In Russ.)
19. Golyatkina V. A., Mogilevskaya I. V., Kolotova O. V., Yashkina T. E., Karasev E. A., Golyatkin I. A. Development of a biosorbent based on carbonated coal for purifying natural and waste water from oil pollution. *PNRPU Bulletin, Applied ecology. Urban development*. 2019; 2 (34): 69–80. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.06.
20. Mogilevskaya I. V., Zholobova O. O., Tereshchenko T. V., Pugacheva A. M., Solonkin A. V. Optimization of spectral composition, light intensity and photoperiod duration for the microclonal reproduction technology of *Populus* hybrids. *Proceedings of the IV International Biotechnology Forum*. Barnaul, 2024; 4 (1): 337–341.
21. Convert Lux to PPFD – Online Calculator [Internet]. 2023 [cited 2025 March 02]. Available from: <https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lux-to-ppfd-online-calculator>.
22. Karpov M. V. Changes in the functional characteristics of leaves of forest plants under different growing conditions. *Proceedings of the III scientific conference “Plantae & Fungi”*. Vladivostok, 2023. Pp. 33. DOI: 10.17581/paf2023.23.

Authors' information:

Irina V. Mogilevskaya, candidate of biological sciences, leader researcher of laboratory of biotechnologies, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia; ORCID 0000-0001-8421-4767, AuthorID 573135.

E-mail: mogilevskaya-i@vifanc.ru