УДК 631.53:581.143.6 DOI: 10.34736/FNC.2026.133.2.007.62-71

Влияние ионов меди и цинка на морфогенез проростков и микропобегов *Caragana pygmaea* L. в культуре *in vitro*

Жолобова О. О.✉, Малюков Н. А., Терещенко Т. В., Гричик Е. Л.
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Россия

Аннотация. Ионы меди и цинка являются жизненно важными микроэлементами растений, однако при избыточном содержании они способны оказывать токсичное воздействие, проявляющееся в ингибировании роста, формировании корневой системы, активности ферментов и хлорозе листьев. Изучение их влияния на рост и развитие растений в контролируемых условиях *in vitro* может способствовать оптимизации процесса микроклонального размножения. В работе изучается воздействие различных концентраций ионов цинка и меди в культуральной среде на процессы морфогенеза у проростков и растений-регенерантов *C. pygmaea* для оптимизации протокола микроклонального размножения. Было проанализировано 11 экспериментальных питательных сред с добавлением сульфатов цинка и меди и контрольная группа, которую культивировали на питательной среде по стандартному протоколу Мурасиги-Скуга. Оценивалась всхожесть семян, морфометрические показатели проростков и микропобегов в культуре *in vitro*. В результате проведенных исследований показано участие ионов цинка и меди в морфогенезе *C. pygmaea in vitro*. Было установлено, что ионы цинка в исследуемом диапазоне концентраций (1,875-30 мг/л) оказывали стимулирующие воздействия на рост и развитие эксплантов. Наилучшие морфометрические показатели микропобегов наблюдались у растений, культивируемых на среде с добавлением цинка в концентрации 3,75 мг/л. В то же время ионы меди (3,75-60 мг/л) проявляли выраженную токсичность, значительно подавляя рост, образование корней и вызывая нарушение водного обмена. Высокие концентрации (30-60 мг/л) оказались сублетальными для эксплантов *C. pygmaea*. В результате было выявлено, что модификация питательной среды с добавлением сульфата цинка в концентрации 3,75 мг/л позволяет повысить эффективность микроклонального размножения *C. pygmaea*.

Ключевые слова. *Caragana pygmaea* L.*;* цинк; медь; морфометрические показатели; *in vitro*.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке поддержке Минобрнауки РФ тема FNFE-2025-0010, рег. № 125021402244-3.

Цитирование. Жолобова О. О., Малюков Н. А., Терещенко Т. В., Гричик Е. Л. Влияние различных концентраций ионов тяжелых металлов на морфогенез *in vitro* проростков и микропобегов *Caragana pygmaea* L. // Научно-агрономический журнал. 2026;2(133):62-71. DOI: 10.34736/FNC.2026.133.2.007.62-71.

Поступила в редакцию: 12.03.2026 Принята к печати: 13.05.2026

UDC 631.53:581.143.6 DOI: 10.34736/FNC.2026.133.2.007.62-71

The influence of copper and zinc ions on *in vitro* morphogenesis of seedlings and microshoots of *Caragana pygmaea* L.

Zholobova O. O.✉, Malyukov N. A., Tereshchenko T. V., Grichik E. L.
Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology,
Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"

✉ – Для контактов/Corresponding author

Abstract. Copper and zinc ions are essential micronutrients for plants; however, when present in excess, they can have toxic effects, including inhibition of growth, root development, enzyme activity, and leaf chlorosis. Studying their effects on plant growth and development under controlled *in vitro* conditions can facilitate the optimization of micropropagation protocols. This study examines the effects of different concentrations of zinc and copper ions in the culture medium on morphogenesis in seedlings and regenerated plants of *C. pygmaea* with the aim of optimizing the micropropagation protocol. Eleven experimental culture media supplemented with zinc and copper sulfates were analyzed, along with a control group cultured on Murashige and Skoog medium according to the standard protocol. Seed germination, as well as morphometric parameters of seedlings and microshoots grown *in vitro*, were evaluated. The results demonstrated the involvement of zinc and copper ions in the morphogenesis of *C. pygmaea* under *in vitro* conditions. Zinc ions within the studied concentration range (1.875-30 mg/L) exerted a stimulating effect on the growth and development of explants. The most favorable morphometric characteristics of microshoots were observed in plants cultured on medium supplemented with 3.75 mg/L zinc. In contrast, copper ions (3.75-60 mg/L) exhibited pronounced toxicity, significantly inhibiting growth and root formation, as well as disrupting water balance. High concentrations (30-60 mg/L) were found to be sublethal for *C. pygmaea* explants.

Overall, modification of the culture medium by adding zinc sulfate at a concentration of 3.75 mg/L was shown to increase the efficiency of *C. pygmaea* micropropagation.

Keywords. *Caragana pygmaea* L.; zinc; copper; morphometric parameters; *in vitro*.

Funding. This work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FNFE-2025-0010 (registration No. 125021402244-3).

For citation. Zholobova O. O., Malyukov N. A., Tereshchenko T. V., Grichik E. L. The influence of copper and zinc ions on in vitro morphogenesis of seedlings and microshoots of *Caragana pygmaea* L. // Scientific Agronomy Journal. 2026;2(133):62-71. DOI: 10.34736/FNC.2026.133.2.007.62-71.

Received: 12.03.2026 Accepted: 13.05.2026

Введение. В результате естественных процессов, таких как выветривание горных пород, почвообразовательные процессы, лесные пожары и эрозия почв, а также по причине воздействия человека, включая промышленность и сельское хозяйство, ТМ накапливаются в окружающей среде (Погорелов и др., 2021; Oudghiri et al., 2025). Некоторые из них, такие как цинк (Zn) и медь (Cu), являются жизненно важными микроэлементами растений (Elazab et al., 2023; Panda et al., 2025).

Низкие концентрации цинка и меди оказывают существенное воздействие на окружающую среду и живые организмы. В растениях эти металлы участвуют в ионном гомеостазе, фотосинтезе, дыхании, биосинтезе пигментов, а также в других метаболических процессах (Chen et al., 2022). Однако их избыточное содержание может вызвать токсичность, проявляющуюся в ингибировании активности ферментов и изменении проницаемости клеточной мембраны (El-Sappah et al., 2024). Первичным объектом воздействия ТМ является корневая система, поскольку корни находятся в непосредственном контакте с поллютантом. Как правило, наблюдается подавление роста и деформация структуры (Петухов и др., 2018). Симптомами токсического воздействия металлов в надземных частях растения являются хлороз, снижение биомассы и угнетение общего развития (Rahman et al., 2024; Panda et al., 2025). Высокие концентрации меди подавляют рост, вызывают деформацию корней, а также нарушают пролиферацию клеток корневой меристемы. Накопление меди в растениях также может приводить к снижению других микроэлементов, таких как железо и цинк, что усугубляет стрессовое состояние растения (Chen et al., 2022; Oudghiri et al., 2025). Цинк в оптимальных концентрациях активирует ферменты и факторы транскрипции, регулирует выработку гормона ауксина, который отвечает за деление и удлинение клеток. При этом, как и медь, при повышенных концентрациях цинк становится токсичным, нарушая ионный баланс и биохимические процессы (Elazab et al., 2023; Nupur, 2025; Oudghiri et al., 2025). В исследованиях по влиянию различных концентраций цинка были изучены границы всхожести семян фитомелиорантов, где было отмечено стимулирующее действие на энергию прорастания донника и люцерны цинка в концентрации 0,01 %, тогда как при минимальной концентрации кадмия, меди и свинца проявлялся ингибирующий эффект (Ознобихина, 2019). В исследовании Васильева Д. В. было выяв-

лено, что невысокое содержание цинка в почве, превышающее ОДК в 1-2 раза, оказывает положительное влияние на всхожесть семян ячменя, в то время как превышение ОДК более чем в 4 раза снижало энергию прорастания и индуцировало повышенную частоту цитогенетических нарушений (Васильев, 2019).

В настоящее время все больше исследований по влиянию ионов металлов на рост и развитие растений проводится в культуре изолированных органов и тканей, так как при этом отмечен стимулирующий эффект на различные показатели морфогенеза микропобегов *in vitro*. Наблюдалось увеличение роста и активное развитие эксплантов у альбиции и гледичии, оптимальное развитие которых было зафиксировано при культивировании на питательной среде с добавлением меди в концентрации 2 мг/л, тогда как более высокие концентрации (8 мг/л) подавляли органогенез и накопление биомассы (Абдулкадырова и др., 2012). В исследовании по влиянию цинка на экспланты *Tocoyena brasiliensis* Mart. было выявлено, что летальной концентрацией для исследуемого вида являлся Zn ≥ 400 мг/л. При концентрациях Zn от 100 до 200 мг/л наблюдалось повреждение хлоропластов, снижение содержания хлорофилла и проявление хлороза (Martins et al., 2025). Преимуществами микроклонального размножения являются контролируемые условия культивирования *in vitro*, что позволяет наблюдать за ответной реакцией растений на стрессовые условия (Барсукова и др., 2020; Барсукова, Клыков, 2021; Pasternak, Steinmacher, 2024).

Представители рода *Caragana* являются ценными видами с хозяйственной точки зрения и успешно применяются в озеленении и фитомелиорации урбанизированных зон благодаря своей зимостойкости, лекарственным, кормовым и декоративным качествам, а также способности к быстрому росту и устойчивости к засухе (Егоров и др., 2023; Храмова, Сыева, 2023). *Caragana pygmaea* L. (Карагана карликовая) – низкорослый, до 1 м, кустарник, который содержит биологически активные вещества: флавоноиды, катехины, танины, сапонины, пектиновые вещества (пектины и протопектины), имеющие фармакологически полезный потенциал.

Цель работы – изучить влияние различных концентраций цинка и меди в культуральной среде на морфогенез проростков и растений-регенерантов *C. pygmaea* для оптимизации технологии микроклонального размножения.

Материалы и методы. Работа выполнена на базе «Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» в лаборатории биотехнологий.

Приготовление и стерилизацию питательных сред по протоколу Мурасиги-Скуга проводили согласно общепринятым методикам работы с культурой изолированных тканей и органов (Бутенко, 1991). Было проанализировано влияние 11 экспериментальных культуральных сред на рост и развитие проростков и микропобегов *C. pygmaea*: питательные среды с дополнительным внесением $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (3,75 мг/л, 7,5 мг/л, 15 мг/л, 30 мг/л, 60 мг/л) и $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (1,875 мг/л, 3,75 мг/л, 7,5 мг/л, 15 мг/л, 30 мг/л) и питательная среда по стандартному протоколу Мурасиги-Скуга (контроль).

Семена *C. pygmaea* по 10 шт. промывали в проточной воде в марлевых мешочках в трехкратной повторности в течение 1 часа, затем в стерильных условиях ламинар-бокса были обработаны 70 %-ным спиртом в течение одной минуты, а затем промыты стерильной дистиллированной водой. После этого осуществлялась их стерилизация в 7 %-ном растворе «Лизоформин 3000» (действующее вещество 9,5 % глутаровый альдегид) на протяжении 10 минут. Далее семена 3-4 раза промыли в стерильной дистиллированной воде и помещали на агаризованную поверхность контрольной и экспериментальных питательных сред. На 3, 5, 10 и 12 сутки фиксировали число проросших семян, количественные и качественные характеристики осевых органов проростков: длину эпикотиля, гипокотиля, общую длину проростков и корней. Согласно ГОСТу 13056.6-97 «Метод определения всхожести. Семена деревьев и кустарников» для вида *C. arborescens* энергия прорастания была зафиксирована на 7 день, а всхожесть на 20 день.

У хорошо сформированных проростков через 30-40 дней культивирования отделяли сегменты побегов размером 1,5-2,0 см с двумя междоузлиями и помещали в культуральные пробирки с контрольной и экспериментальными питательными средами. Культивирование осуществлялось в течение 45 дней при температуре 22-24 °С, интенсивности освещения 70-85 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, фотопериоде 16 часов на фитостеллажах (СТЕЛЛАР-ФИТО LINE, Россия). Оценивали следующие морфологические показатели микропобегов: длину эксплантов, количество междоузлий и листьев, а также окраску листовой пластины, содержание воды в экспланте и наличие корней.

Использовались возможности цифровой фотосъемки и программы свободного доступа ImageJ. Результаты представлены в формате средней арифметической с указанием ошибки среднего. Для межгруппового сравнения применялся Tukey HSD Post Hoc тест с использованием программы (STATISTICA 12, StatSoft Inc., США). Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты. Для низкорослой *C. pygmaea* в культуре *in vitro* на контрольной среде формирование и рост зародышевого корешка отмечали на 3 день у 20 % семян, уже на 5 день проросло 65 % семян, а на 10 сутки зафиксирована 100 % всхожесть в трех повторностях (рис. 1). На питательных средах с добавлением цинка с 3 по 10 дни показатели всхожести были ниже, чем на контрольной среде, на 12 день всхожесть варьировала в диапазоне 85-100 % на всех средах, включая контрольную, и статистически значимых различий между исследуемыми вариантами не было (рис. 1а). При рассмотрении влияния меди на всхожесть *C. pygmaea* было выявлено, что на начальных этапах всхожесть на питательной среде с добавлением 3,75 мг/л была замедленна по сравнению с контролем и составляла 35 % на 5 сутки (рис. 1б). Однако уже на 10 день всхожесть семян на всех концентрациях достигала 95-100 %.

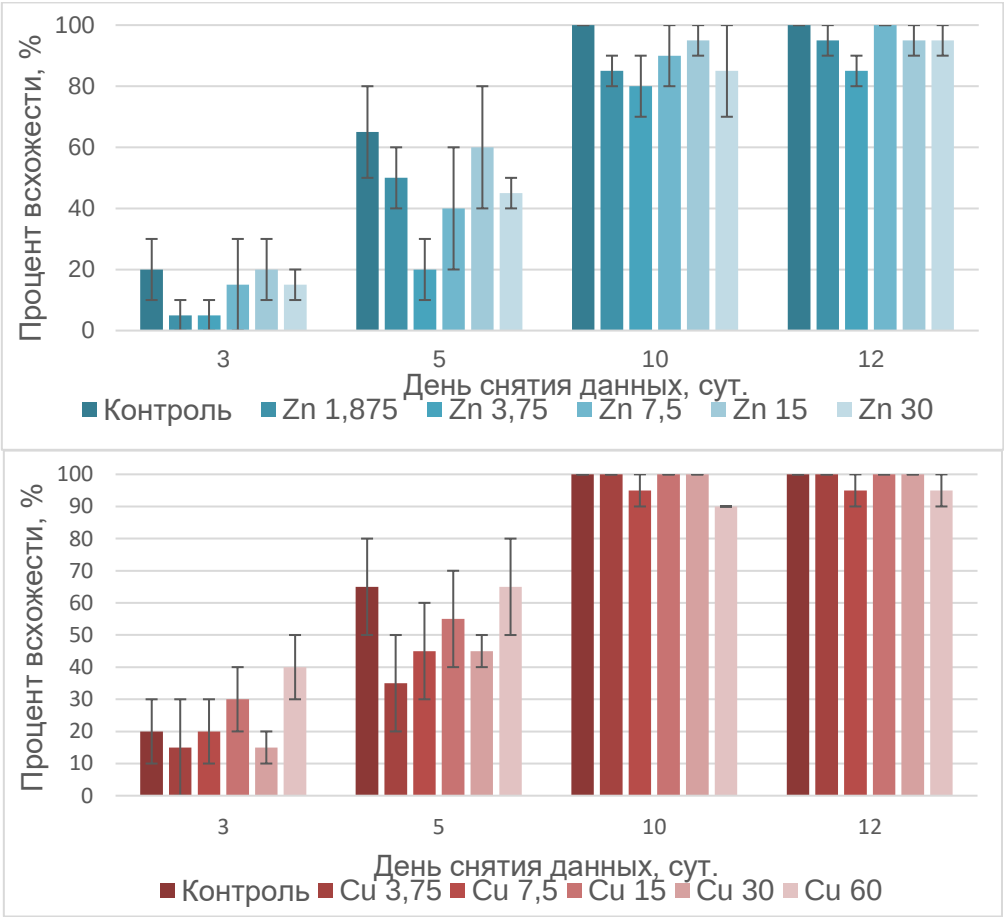

Рис. 1. Динамика прорастания семян *Caragana pygmaea* на экспериментальных питательных средах с добавлением цинка (а) и меди (б)

Морфометрические показатели проростков были зафиксированы на 30-40 день прорастания. Высокие концентрации меди (60, 30 и 15 мг/л) оказали ингибирующие воздействие на развитие проростков (табл. 1, рис. 2д, в). При этих концентрациях длина гипокотиля, эпикотиля и корня, а также общая длина были статистически меньше, чем на контроле (6,14±0,42 см). Также наблюдалось ингибирующее действие ионов меди на развитие корня, появившийся вначале зародышевый корешок находился непосредственно в питательной среде с добавлением меди, при максимальной концентрации в 30 мг/л это выражалось практически в полном отсутствии его дальнейшего развития (0,18 ± 0,02 см) (рис. 2д). При этом концентрация Cu 7,5 мг/л способствовала росту, длина корня увеличилась более чем в 2 раза по сравнению с контролем, а общая длина проростка составила 7,88 ± 0,75 см.

Таблица 1

Морфометрические показатели проростков *C. pygmaea*

Варинт	Длина гипокотиля, см	Длина эпикотиля, см	Длина корня, см	Общая длина проростка, см
Медь ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)				
Контроль	1,45 ± 0,08 a	2,68 ± 0,11 a	2,01 ± 0,23 bc	6,14 ± 0,42 ab
3,75 мг/л	1,36 ± 0,10 a	2,06 ± 0,08 b	2,98 ± 0,42 b	6,40 ± 0,60 a
7,5 мг/л	1,44 ± 0,07 a	2,06 ± 0,15 b	4,38 ± 0,53 a	7,88 ± 0,75 a
15 мг/л	1,16 ± 0,09 ab	2,02 ± 0,13 bc	1,34 ± 0,13 cd	4,52 ± 0,35 b
30 мг/л	0,99 ± 0,08 b	1,59 ± 0,07 c	0,52 ± 0,09 d	3,1 ± 0,24 bc
60 мг/л	0,93 ± 0,06 b	1,67 ± 0,16 bc	0,18 ± 0,02 d	2,78 ± 0,24 c
Цинк ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)				
Контроль	1,45 ± 0,08 ab	2,68 ± 0,11a	2,01 ± 0,23 a	6,14 ± 0,42 a
1,875 мг/л	1,07 ± 0,07 b	2,49 ± 0,23 a	2,14 ± 0,32 a	5,74 ± 0,62 a
3,75 мг/л	1,26 ± 0,12 ab	2,21 ± 0,19 a	2,24 ± 0,29 a	5,71 ± 0,60 a
7,5 мг/л	1,19 ± 0,07 ab	2,36 ± 0,23 a	2,04 ± 0,28 a	5,60 ± 0,58 a
15 мг/л	1,15 ± 0,07 b	2,40 ± 0,14 a	2,16 ± 0,19 a	5,71 ± 0,40 a
30 мг/л	1,46 ± 0,07 a	2,41 ± 0,18 a	2,43 ± 0,42 a	6,30 ± 0,67 a

Примечание. Здесь и в табл. 2и 3 представлены средние значения ± ошибка среднего, различные буквы в столбце обозначают статистические различия согласно Tukey HSD Post Hoc тесту при $p < 0,05$.

Исследуемый диапазон концентраций цинка не оказал статистически значимого влияния на длину эпикотиля, корня и общую длину. Однако длина гипокотиля при концентрации 15 и 1,875 мг/л была статистически меньше контроля, 1,15 ± 0,07 см и 1,07 ± 0,07 соответственно (рис. 2б, е). Добавление цинка способствовало развитию корневой системы, при максимальной концентрации в 30 мг/л длина корня составляла 2,43 ± 0,42 см. Несмотря на то, что статистически значимые различия отсутствовали по сравнению с контролем, было отмечено образование корней второго порядка на экспериментальных средах с добавлением цинка рис. 2а, б, г, е). Ионы цинка в питательной среде не оказывали выраженного токсического влияния на проростки *C. pygmaea* по сравнению с высокими концентрациями меди.

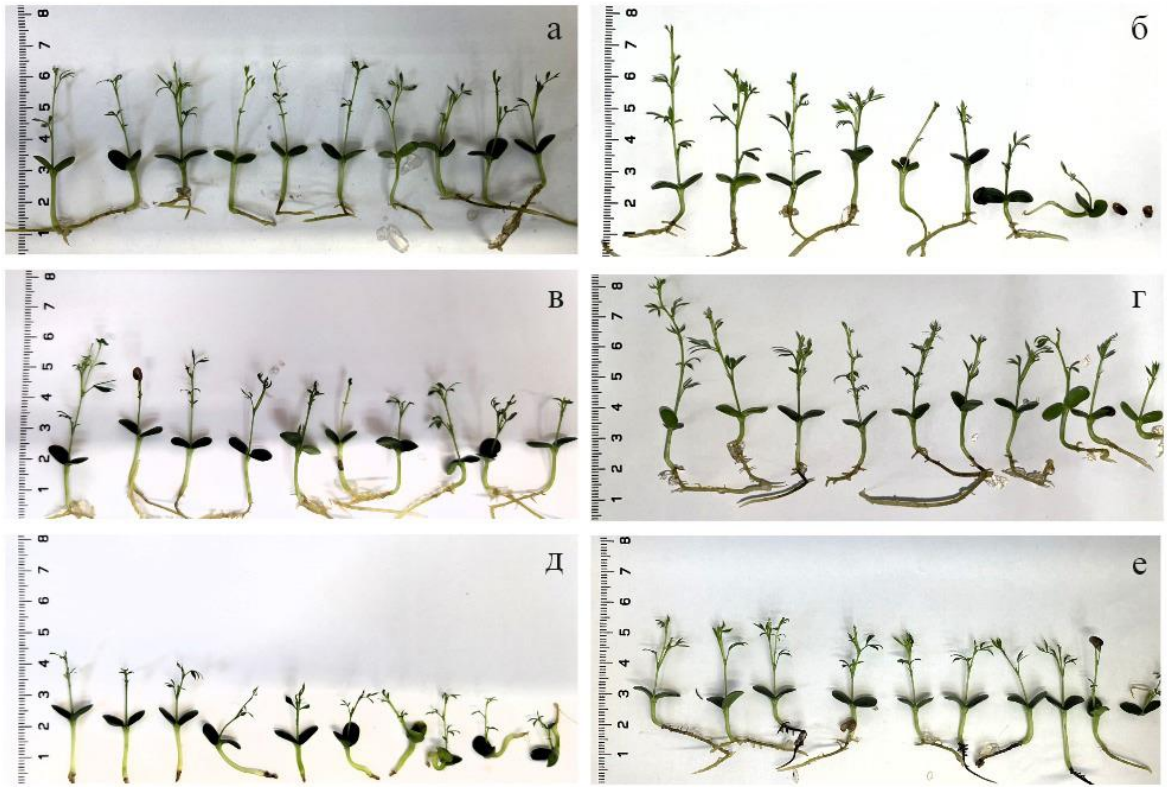

Рис. 2. Проростки *C. pygmaea* на экспериментальных питательных средах: а – контроль, б – Zn 1,875 мг/л, в – Cu 7,5 мг/л, г – Zn 7,5 мг/л, д – Cu 30 мг/л, е – Zn 15 мг/л

Сегменты побегов размером 1,5-2,0 см с двумя междоузлиями культивировали на экспериментальных питательных средах в течение 45 дней и оценивали влияние ионов меди и цинка на рост и развитие микропобегов *C. pygmaea* в культуре *in vitro*. Высокие концентрации меди оказались сублетальными, показатели длины побега и количества листьев уменьшились более чем в 4 раза по сравнению контрольной группой (табл. 2).

Таблица 2

Морфометрические показатели микропобегов *C. pygmaea* на питательных средах, дополненных ионами меди

Вариант	Длина побега, см	Количество листьев, шт.	Количество междоузлий, шт.	Содержание воды в экспланте, %
Контроль	4,72 ± 0,99 a	25,25 ± 3,09 a	5,75 ± 1,11 a	77,50 ± 2,18 ab
Cu 3,75 мг/л	2,91 ± 0,38 ab	12,25 ±1,25 bc	5,0 ± 0,71 ab	74,75 ± 5,54 b
Cu 7,5 мг/л	3,25 ± 0,49 a	13,0 ± 2,33 bc	4,92 ± 0,72 a	79,81 ± 3,11 ab
Cu 15 мг/л	3,67 ± 0,37 a	19,8 ± 1,98 ab	5,80 ± 0,58 a	76,90 ± 1,33 ab
Cu 30 мг/л	1,61 ± 0,12 b	7,75 ± 0,87 c	2,62 ± 0,24 bc	91,33 ± 3,35 ab
Cu 60 мг/л	1,12 ± 0,19 b	5,60 ± 0,93 c	1,40 ± 0,24 c	98,78 ± 0,24 a

Высокие концентрации Cu в питательной среде (30 и 60 мг/л) значительно ингибировали процессы морфогенеза *C. pygmaea* в культуре *in vitro*. Длина микропобегов составляла 1,12 ± 0,19 и 1,61 ± 0,12 см, количество листьев 5,6 ± 0,93 и 7,75 ± 0,87 шт., отсутствовали укорененные микропобеги, что сопоставимо с размерами и состоянием первичных эксплантов, помещенных на экспериментальные среды, и подтверждает отсутствие роста и деления клеток на фоне токсического воздействия ионов меди в исследуемых концентрациях (рис. 3в). При этом содержание воды было максимальным в эксплантах, что указывает на обводненность тканей в

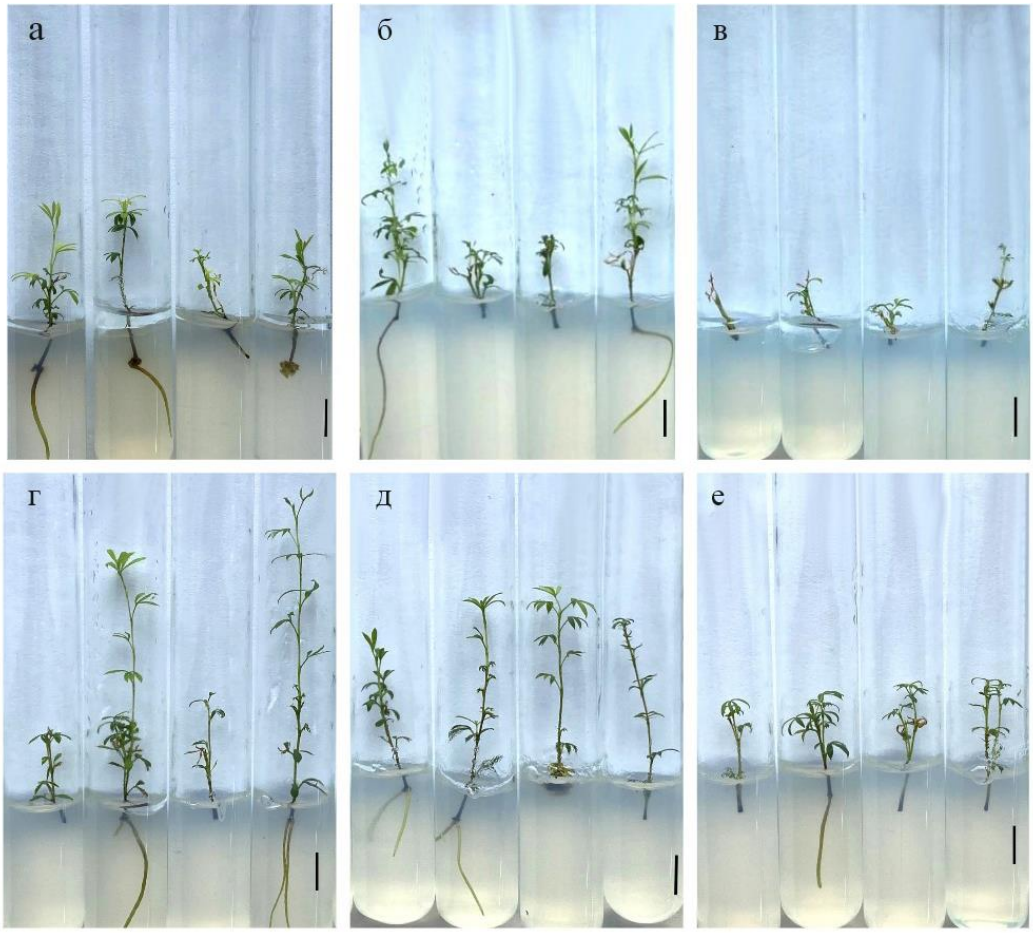

Рис. 3. Микропобеги *C. pygmaea* на экспериментальных питательных средах: а – контроль, б – Cu 7,5 мг/л, в – Cu 30 мг/л, г – Zn 1,875 мг/л, д – Zn 7,5 мг/л, е – Zn 15 мг/л. Масштаб: 1 см

культуре *in vitro* и нарушение транспорта воды, и фиксировалось проявление хлороза листовых пластин. Более низкие концентрации Cu от 3,75 до 15 мг/л не оказывали существенного отрицательного воздействия на морфометрические показатели микропобегов по сравнению с контролем статистически значимых различий практически не было (см. табл. 2). Дополнительно стоит отметить, что как на высоких концентрациях ионов меди, так и при Cu 3,75 мг/л укоренения микропобегов не происходило. На контрольной среде у 50 % микропобегов корнеобразование отмечено через 21 день культивирования, на средах с Cu в концентрации 7,5 и 15 мг/л также у половины эксплантов происходило формирование корней, но происходило это через 28-35 дней (рис. 3а, б, в).

Морфометрические показатели микропобегов *C. pygmaea* на экспериментальных средах с добавлением ионов цинка статистически не отличались от таких же параметров на контрольной среде (табл. 3). Максимальные значение всех показателей были зафиксированы на среде с Zn в концентрации 3,75 мг/л, длина побега достигла 6,17 ± 1,23 см, количество листьев 30,5 ± 6,46 и количество междоузлий 7,67 ± 1,69.

Таблица 3

Морфометрические показатели микропобегов *C. pygmaea* на питательных средах, дополненных ионами цинка

Вариант	Длина побега, см	Количество листьев, шт.	Количество междоузлий, шт.	Содержание воды в экспланте, %
Контроль	4,72 ± 0,99 a	25,25 ± 3,09 a	5,75 ±1,11 a	77,50 ± 2,18 ab
Zn 1,875 мг/л	5,96 ± 1,25 a	26,8 ± 4,7 a	7,0 ± 1,38 a	79,10 ± 3,54 a
Zn 3,75 мг/л	6,17 ± 1,23 a	30,5 ± 6,46 a	7,67 ± 1,69 a	77,60 ± 3,25 ab
Zn 7,5 мг/л	4,94 ± 0,62 a	24,44 ± 3,59 a	5,44 ± 0,84 a	72,80 ± 1,55 ab
Zn 15 мг/л	3,37 ± 0,31 a	19,38 ± 3,46 a	4,50 ± 0,76 a	75,75 ± 3,97 ab
Zn 30 мг/л	5,51 ± 0,56 a	24,0 ± 2,15 a	6,80 ± 0,61 a	64,0 ± 2,35 b

Главным отличием между экспериментальными средами с добавлением цинка можно отметить процесс корнеобразования, который с увеличением концентрации ионов Zn снижался, при концентрации 30 мг/л отсутствовал, развитие микропобегов происходило равномерно (рис. 4б). Снижение концентрации ионов цинка до 15,0 и 7,5 мг/л провоцировало корнеобразование у 10 и 30 % эксплантов соответственно, рост и развитие побегов были относительно равномерными (рис. 3д, е). На низких концентрациях цинка 1,875 и 3,75 мг/л корнеобразование происходило, как и на контрольной среде в те же сроки у 40-50 % эксплантов, при этом укорененные микропобеги активнее наращивали вегетативную массу чем на контрольной среде, показатели длины максимальные, а экспланты без корней развивались медленнее и морфометрические показатели не отличались от контрольных (рис. 3а, г; рис. 4а).

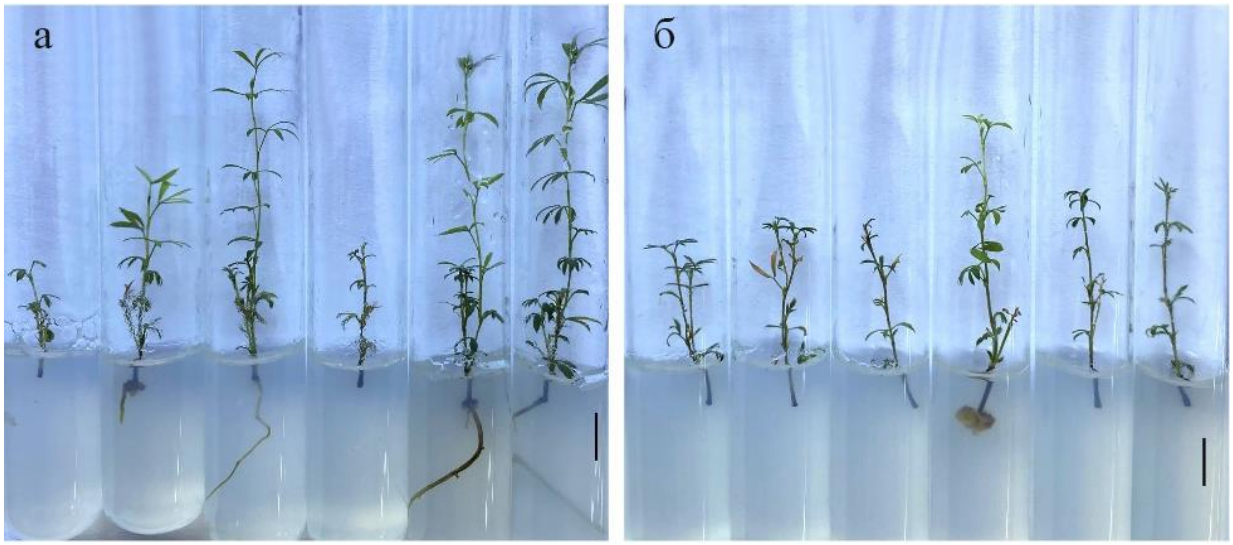

Рис. 4. Микропобеги *Caragana pygmaea* на экспериментальных питательных средах: а – Zn 3,75 мг/л, б – Zn 30 мг/л. Масштаб: 1 см

Обсуждение. Полученные результаты показывают существенные различия в зависимости от концентрации внесенных ионов меди и цинка. В исследуемом диапазоне концентраций (1,875-30 мг/л) цинк не оказал значительного ингибирующего воздействия на проростки и микропобеги, что подтверждается морфометрическими показателями и визуальным анализом. Семена *C. pygmaea* показали высокую всхожесть как в контрольной группе, так и в средах с добавлением ионов цинка и меди, что говорит об их устойчивости к данным концентрациям металлов. При этом в некоторых случаях было отмечено стимулирующее действие цинка на рост эксплантов. Исходя из результатов, видно, что добавление в питательную среду Zn в концентрации 3,75 мг/л стимулировало корнеобразование и характеризовалось максимальными морфометрическими показателями. В работе Oudghiri с соавторами также было выявлено, что цинк способен стимулировать развитие растений при низких дозах и ингибировать при высоких (Oudghiri et al., 2025). Полученные нами данные согласуется с исследованием Nupur на маше (*Vigna radiata*), где самые низкие концентрации цинка стимулировали рост и биомассу сеянцев. Микропобеги, культивируемые на таких средах, больше подходят для дальнейшего микроклонального размножения (Nupur, 2025).

В отличие от цинка, ионы меди проявили выраженное токсическое и ингибирующее действие на рост и развитие микрорастений. Высокие концентрации меди оказались сублетальными, что характеризовалось отсутствием процессов морфогенеза. Это согласуется с литературными данными, которые показывают, что избыточное накопление меди может приводить к подавлению роста, потемнению и деформации корней (Chen et al., 2022). В работе Петухова с соавторами было зафиксировано, что ТМ подавляют морфофизиологическое развитие растений, а наибольшее влияние оказывают именно на корневую систему (Петухов и др., 2018). Однако низкая концентрация меди 7,5 мг/л, наоборот, способствовала росту, длина корня увеличилась в несколько раз, что может указывать на адаптивные механизмы *C. pygmaea*. Учитывая все результаты влияния ионов меди и сравнивая их с цинком, можно сделать вывод, что изученные концентрации не подходят как дополнительный компонент в питательной среде для данного вида.

Заключение. В результате проведенных исследований определена морфогенная роль ионов цинка и меди в культуральной среде при микроклональном размножении *C. pygmaea*. Для проростков *C. pygmaea* стимулирующее действие оказали низкие концентрация цинка в диапазоне от 1,875 до 7,5 мг/л, которые способствовали развитию корневой системы и образованию корней второго порядка. Наиболее высокие показатели микропобегов наблюдались при концентрации 3,75 мг/л. Ионы цинка в диапазоне концентраций в целом проявляли стимулирующий характер воздействия на процессы морфогенеза *C. pygmaea*. Однако более высокая концентрация цинка 30 мг/л оказывала отрицательное влияние на процентное содержание воды в микропобегах, что проявлялось в увядании и хлорозе листьев и отсутствии корней.

Добавление ионов меди в исследуемом диапазоне от 3,75 до 60 мг/л проявлялось в постепенном угнетении морфогенного потенциала как проростков, так и культивируемых микропобегов *C. pygmaea.* Токсическое действие избыточного содержания меди проявлялось в подавлении роста, образовании листовых пластин и корневой системы. Высокие концентрации сульфата меди 30 и 60 мг/л вызвали максимальное угнетение роста и развития микропобегов *C. pygmaea.*

Полученные данные имеют практическое значение, так как в ходе исследования были выявлены концентрации, которые стимулируют процессы морфогенеза, угнетают или не оказывают никакого существенного влияния. Была выявлена модификация питательной среды с добавлением $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ в концентрации 3,75 мг/л, при которой происходит стимулирование процессов морфогенеза как у проростков, так и у микропобегов *C. pygmaea.* При проведении опыта с добавлением $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ на всех концентрациях происходило угнетение морфометрических показателей.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Абдулкадырова П. Э., Алиева З. М., Самудов Ш. М. Реакция эксплантов альбиции и гледичии на повышенное содержание меди в среде. *Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки*. 2012;1: 161-164. [Abdulkadyrova P. E., Aliyeva Z. M., Samudov SH. M. Reaktsiya eksplantov al'bitsii i gledichii na povyshennoye soderzhaniye medi v srede. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Yestestvennyye nauki*. 2012;1:161-164].

Барсукова Е. Н., Клыков А. Г. Селекция гречихи на стрессоустойчивость в культуре *in vitro*. *Дальневосточный аграрный вестник.* 2021;4: 7-14. [Barsukova Ye. N., Klykov A. G. Selektsiya grechikhi na stressoustoychivost' v kul'ture *in vitro*. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2021;4: 7-14].

Барсукова Е. Н., Клыков А. Г., Фисенко П. В Использование методов биотехнологии в селекции гречихи на дальнем востоке. *Вестник ДВО РАН.* 2020;4: 58-66. [Barsukova Ye. N., Klykov A. G., Fisenko P. V Ispol'zovaniye metodov biotekhnologii v selektsii grechikhi na dal'nem vostoke. *Vestnik DVO RAN.* 2020;4: 58-66].

Бутенко Р. Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнологии на их основе. М.: ФБк-Пресс. 1991;160. [Butenko R. G. Biologiya kletok vysshikh rasteniy *in vitro* i biotekhnologii na ikh osnove. M.: FBk-Press. 1991;160].

Васильев Д. В. Влияние разных концентраций цинка в почве на семенное потомство ячменя. *Научное обозрение. Биологические науки.* 2019;2: 30-34. [Vasil'yev D. V. Vliyaniye raznykh kontsentratsiy tsinka v pochve na semennoye potomstvo yachmenya. *Nauchnoye obozreniye. Biologicheskiye nauki.* 2019;2: 30-34].

Егоров С. А., Крючков С. Н., Солонкин А. В., Соломенцева А. С., Романенко А. К., Горбушова Д. А. Особенности адаптации древесных и кустарниковых видов в архиве популяций и клонов насаждений г. Волгограда. *Научно-агрономический журнал.* 2023;3(122): 60-67. DOI: https://doi.org/10.34736/FNC.2023.122.3.009.60-67 [Egorov S. A., Kryuchkov S. N., Solonkin A. V., Solomentseva A. S., Romanenko A. K., Gorbushova D. A. Tree and Shrub Species Adaptation Features in the Populations and Clones' Plantings Archive in Volgograd. *Scientific Agronomy Journal*. 2023;3(122): 60-67. DOI: https://doi.org/10.34736/FNC.2023.122.3.009.60-67].

Ознобихина А. О. Границы всхожести семян фитомелиорантов в присутствии токсичных концентраций тяжелых металлов. *Самарский научный вестник.* 2019;1: 82-86. [Oznobikhina A. O. Granitsy vskhozhesti semyan fitomeliorantov v prisutstvii toksichnykh kontsentratsiy tyazhelykh metallov. Samarskiy nauchnyy vestnik. 2019;1: 82-86].

Петухов А. С., Хритохин Н. А., Петухова Г. А. Влияние тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) на всхожесть и морфометрические показатели овса посевного (*Avena sativa*). *Международный студенческий научный вестник.* 2018;5: 63-70. [Petukhov A. S., Khritokhin N. A., Petukhova G. A. Vliyaniye tyazhelykh metallov (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) na vskhozhest' i morfometricheskiye pokazateli ovsa posevnogo (Avena sativa). *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik.* 2018;5: 63-70].

Погорелов А. В., Лазько В. Э., Шматок В. И., Мельченко А. И. Тяжелые металлы в окружающей среде и их влияние на сельскохозяйственные растения. *Рисоводство.* 2021;4(53): 54-61. DOI: https://doi.org/10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-6 [Pogorelov A. V., Laz'ko V. E., Shmatok V. I., Mel'chenko A. I. Tyazhelyye metally v okruzhayushchey srede i ikh vliyaniye na sel'skokhozyaystvennyye rasteniya. *Risovodstvo.* 2021;4(53): 54-61. DOI: https://doi.org/10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-61].

Храмова Е. П., Сыева С. Я., Кукушкина Т. А., Шалдаева Т. М. Биологически активные вещества и антиоксидантная активность растений рода Caragana из Горного Алтая. *Химия растительного сырья.* 2023;1: 145-156. DOI: https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111429 [Khramova E. P., Syeva S. Ya., Kukushkina T. A., Shaldaeva T. M. Biologically active compounds and antioxidant activity of the plants from the mountain altai of the Caragana genus. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2023;1: 145-156. DOI: https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111429].

Chen G., Li J., Han H., Du R., Wang X. Physiological and molecular mechanisms of plant responses to copper stress. *International journal of molecular sciences.* 2022;23(21): 12950.

Elazab D., Lambardi M., Capuana M. *In vitro* culture studies for the mitigation of heavy metal stress in plants. *Plants.* 2023;12(19): 3387.

El-Sappah A. H., Zhu Y., Huang Q., Chen B., Soaud S. A., Abd Elhamid M. A., Yan K., Li J., El-Tarabily K. A. Plants' molecular behavior to heavy metals: from criticality to toxicity. *Frontiers in plant science.* 2024;15: 1423625. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1423625.

Martins A. S. D., Huarancca Reyes T., Guglielminetti L., Damiani C. R. Screening of *In Vitro* Heavy Metal Tolerance in *Tocoyena brasiliensis* Mart. (Rubiaceae). *Plants.* 2025;14(9): 1331. DOI: https://doi.org/10.3390/plants14091331.

Nupur A. K. In-vitro Evaluation on the Germination Potential and Seedling Growth of *Vigna radiata* (L.) under Heavy Metal Stress. *Environment and Ecology.* 2025;43(1): 16-23. DOI: https://doi.org/10.60151/envec/GUSZ8343.

Oudghiri M., Yamani B., Benlemlih N., El Aammouri S., Abid N., Brhadda N., Samah B. R. Z, Ahmed C., Fatima Z., Mohamed El B., Yassine M., Mohammed I. Effect of Heavy Metals on the Morphological and Physiological Responses of the Torro Plus Variant of *Zea mays*. *Journal of Environmental & Earth Sciences.* 2025;7(4): 165-179. DOI: https://doi.org/10.30564/jees.v7i4.8208.

Panda A., Fatnani D., Parida A. K. Uptake, impact, adaptation mechanisms, and phytoremediation of heavy metals in plants: Role of transporters in heavy metal sequestration. *Plant Physiology and Biochemistry.* 2025: 109578. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109578.

Pasternak T. P., Steinmacher D. Plant growth regulation in cell and tissue culture *in vitro*. *Plants.* 2024;13(2): 327. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13020327.

Rahman G., Muhammad J., Ilyas M., Subhanullah M., Ullah K., Massimzhan M., Toktar M., Bektay Y., Kalybekov M., Ydyrys A., Zhakypbek Y. Phytoremediation of heavy metals from soil and their effects on plant physiology-A review. *ES Materials & Manufacturing.* 2024;26: 1298. DOI: https://doi.org/10.30919/esmm1298.

Информация об авторах

Жолобова Ольга Олеговна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией биотехнологий ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, zholobova-o@vfanc.ru, ORCID: 0000-0002-1594-4181.

Малюков Никита Анатольевич, лаборант – исследователь лаборатории биотехнологий ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, malukov-n@vfanc.ru, *ORCID:* 0009-0006-1413-1804.

Терещенко Татьяна Васильевна, младший научный сотрудник, ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, tereschenko@vfanc.ru, ORCID 0000-0001-9116-6062.

Гричик Елена Леонидовна, младший научный сотрудник, ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, grichik-e@vfanc.ru, ORCID 0000-0003-4478-6538.

Information about the authors

Zholobova Olga Olegovna, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher – Head of the Biotechnology Laboratory, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., Russian Federation, zholobova-o@vfanc.ru, ORCID: 0000-0002-1594-4181.

Malyukov Nikita Anatolyevich, Laboratory Researcher, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., Russian Federation, malukov-n@vfanc.ru, ORCID: 0009-0006-1413-1804.

Tereshchenko Tatyana Vasilevna, Junior Researcher, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., Russian Federation, tereschenko@vfanc.ru, ORCID 0000-0001-9116-6062.

Grichik Elena Leonidovna, Junior Researcher, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., Russian Federation, grichik-e@vfanc.ru, ORCID 0000-0003-4478-6538.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.