УДК 502.572: 504.05 DOI: 10.5281/zenodo.15010621 EDN: SNBSME

© **О. В. Фрунзе, О. С. Горецкий**

СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ДЕКОРАТИВНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНТРОЛИРУЕМОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ИОНАМИ КОБАЛЬТА И КАДМИЯ

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283050, Россия, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46

Фрунзе О. В., Горецкий О. С. **Сорбционная способность некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами кобальта и кадмия. –** Исследована сорбционная способность ионов кобальта и кадмия в почве и органах некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы этими ионами с целью выявления видов-гипераккумуляторов тяжелых металлов, которые можно использовать для озеленения и фиторемедиации почв техногенного региона. Наибольшая сорбционная способность отмечена у проростков *Ageratum houstonianum* cv. *Blue Lagoon* и *Phacelia tanacetifolia* L., а наименьшая – у проростков *Calendula officinalis* L. Установлено, что содержание ионов кобальта и кадмия в корневой системе значительно превышает их концентрацию в побегах.

Ключевые слова: кобальт, кадмий, декоративные травянистые растения, коэффициент транслокации.

Введение

Загрязнение природной среды тяжелыми металлами представляет серьезную глобальную экологическую проблему. Опасности, связанные с загрязнением тяжелыми металлами, обусловлены их токсичностью, способностью накапливаться в пищевых цепях [1]. Тяжелые металлы с физиологической точки зрения можно разделить на две условные группы. Первая включает металлы, необходимые клеткам живых организмов в качестве микроэлементов (Zn, Cu, Fe, Mn, Ni и др.). Эти металлы выполняют важные биологические функции, часто входят с состав металлопротеинов. Тем не менее, содержание этих элементов в окружающей среде иногда достигает токсических уровней, что представляет угрозу для флоры и фауны. У второй группы, включающей As, Cd, Pb и Hg, пока не выявлены положительные физиологические функции для живых организмов, ионы данных тяжелых металлов наносят ущерб экосистемам даже в низких концентрациях, что требует регулярного мониторинга в различных регионах для оценки безопасности воды, воздуха и сельскохозяйственной продукции [2].

Тяжелые металлы, поступающие в экосистемы из природных и антропогенных источников, представляют собой потенциальную угрозу для здоровья человека и живых организмов. В организмах металлы могут накапливаться в результате как естественных, так и антропогенных процессов, что может привести к серьезным последствиям для здоровья и окружающей среды. Это указывает на необходимость организации систематических мониторинговых исследований в различных регионах России. Такие исследования помогут определить уровень безопасности почв техногенных регионов, качества атмосферного воздуха, а также продуктов сельского хозяйства. Кроме того, важно изучить декоративные травянистые растения, которые используют в озеленении городской среды, на предмет их способности накапливать ионы тяжелых металлов. Обеспечение экологической безопасности городской среды должно стать приоритетом для защиты здоровья человека и сохранения биологическое разнообразия [3].

Элементный состав растительных организмов формируется под влиянием множества факторов, среди которых основное значение имеют биохимические характеристики и качество почвы. Однако видовые различия в метаболизме растений приводят к тому, что они

© **Фрунзе О. В., Горецкий О. С., 2025**

по-разному могут контролировать поступление ионов тяжелых металлов из окружающей среды в вегетативные органы. Отличие в величинах коэффициента биологического накопления (КБН) ионов тяжелых металлов позволяет выделить виды растений с высокой и низкой способностью транслокации токсичных элементов из почвы в вегетативные органы. Растения, обладающие способностью к фитоэкстракции (включая фитоаккумуляцию и фитоабсорбцию), могут интенсивно поглощать ионы тяжелых металлов из почвы и накапливать их в вегетативных органах. Эти виды растений рекомендуются для восстановления загрязненных почв с помощью фиторемедиации [4, 5].

Поэтому целью нашего исследования было изучить сорбционную способность ионов кобальта и кадмия в почве и органах некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы этими ионами.

Материал и методы исследования

В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы декоративные травянистые растения: Агератум Гаустона *(Ageratum houstonianum* cv. *Blue Lagoon)*, Фацелия пижмолистная (*Phacelia tanacetifolia* Benth.), Календула лекарственная (*Calendula officinalis* L.), которые часто применяют для озеленения в Донецком регионе

Исследования сорбционной способности проростков проводились по схеме полного двухфакторного пятиуровневого эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Схема эксперимента влияния загрязнения почвы ионами кобальта и кадмия на некоторые виды декоративных травянистых растений

Вариант загрязнения	Загрязнители	
	$CoSO_4$, мг/кг (в перерасчете на Co^{2+})	$CdSO_4$, мг/кг (в перерасчете на Cd^{2+})
1	0 (контроль)	0 (контроль)
2	5	0
3	10	0
4	0	0,5
5	0	1
6	5	0,5
7	10	1

В качестве загрязнителей использовались сульфат кобальта и сульфат кадмия по стехиометрическому отношению. Концентрации для кобальта и кадмия составляли 0,1 ПДК и 2 ПДК с учетом фона (кларка).

Семена растений проращивались согласно их биологическим особенностям. Выращивание велось на протяжении тридцати дней, при продолжительности светового дня 14 ч, температуре 20–22 °С и ~70 % влажности. В каждый сосуд вносилось по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм, в который предварительно вносились сульфат кобальта и сульфат кадмия согласно схеме эксперимента.

Содержание кобальта и кадмия в растительном материале определяли по методу атомно-абсорбционной спектроскопии по В. Прайсу на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Сатурн-3». Метод основан на кислотном вскрытии растительного сырья, распылении полученных растворов в пламя ацетилен-воздух или при введении в графитовую печь спектрофотометра полученного раствора с последующей электротермической

атомизацией. Коэффициент транслокации (КТЛ) [почва/корень] рассчитывали по формуле [7]:

$$КТЛ_{[почва/корень]} = \frac{С_к}{С_п}, \quad (1)$$

где $С_к$ – концентрация металла в корнях, мг/кг сухой массы;
$С_п$ – концентрация металла в почве, мг/кг.

Коэффициент транслокации [корень/стебель] рассчитывали по формуле:

$$КТЛ_{[корень/стебель]} = \frac{С_п}{С_к}, \quad (2)$$

где $С_п$ – концентрация металла в побегах, мг/кг сухой массы;
$С_п$ – концентрация металла в корнях, мг/кг сухой массы.

Полученные данные обрабатывали статистически с помощью специально разработанных программ.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что способность растений накапливать в своих органах тяжелые металлы зависит как от металла, так и от специфических особенностей вида растений. На способность корневой системы растений поглощать ионы тяжелых металлов оказывают влияние корневые экссудаты, органические кислоты, сидерофоры и протоны [7]. В основном тяжелые металлы поступают в корневую систему в форме ионов. Растения в некоторой степени могут регулировать поглощение и перемещение ионов тяжелых металлов, используя механизмы контроля активности транспортных белков, образования комплексов и их последующего связывания, а также выделение органических лигандов через корневые волоски [7]. Так, у проростков *A. houstonianum* при отдельном внесении в почву ионов кобальта в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК наблюдалось достоверное увеличение концентрации данного металла в стеблях – на 19–23%, а в корневой системе – практически в два раза, по сравнению с растениями, выращенными на незагрязненной почве (рис. 1).

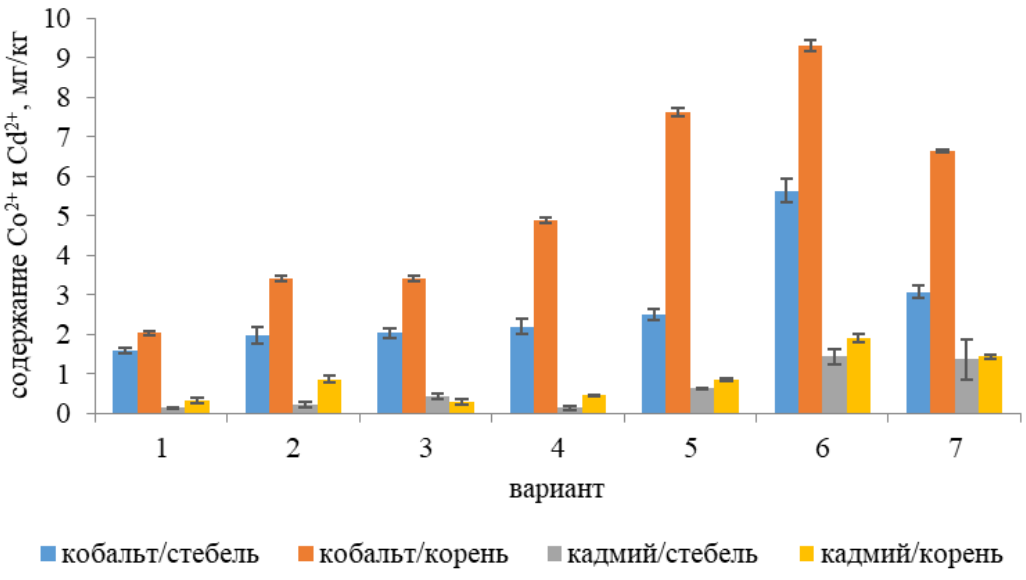


Рис. 1. Содержание ионов Co^{2+} и Cd^{2+} в вегетативных органах *Ageratum houstonianum* cv. *Blue Lagoon*

При совместном внесении в почву исследуемых загрязнителей содержание ионов кобальта в корневой системе проростков увеличилось в 4–5 раз (вариант 6, 7), а в надземной части растений – в 2–3 раза.

Известно, что ионы кобальта при низких концентрациях оказывают положительное влияние на рост высших растений, способствуют улучшению стабильности хлорофилла и активируют ферментативные процессы. Это, в свою очередь, способствует активации окислительного фосфорилирования, фотосинтеза, а также синтезу кобаламина [6, 7].

Поглощение ионов Co^{2+} корнями осуществляется с помощью механизмов активного и пассивного транспорта, однако молекулярные аспекты активного транспорта до сих пор не исследованы. Скорость поглощения кобальта из почвенного раствора и его транслокация в органах и тканях растений зависят от их видовых особенностей [8]. Например, у проростков *A. houstonianum* отмечено значительное накопление кобальта как в надземных, так и в подземных частях. При этом концентрация кобальта в корнях превышает таковую в побегах в несколько раз. Согласно имеющимся литературным данным [9], содержание Co^{2+} в сухом остатке растений варьирует от 0,05 до 11,6 мг/кг, что соответствует нашим наблюдениям. У проростков *P. tanacetifolia* прослеживалась подобная тенденция (рис. 2).

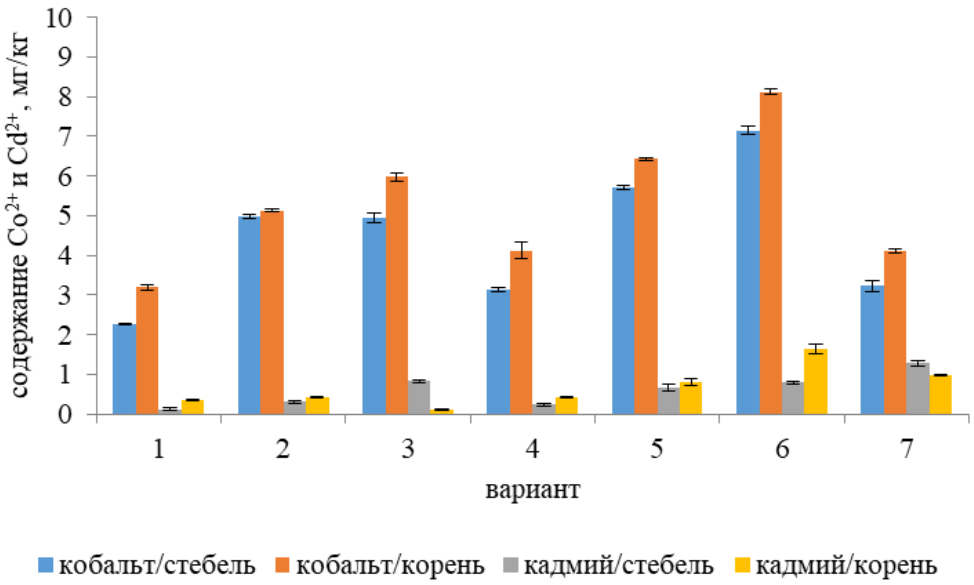


Рис. 2. Содержание ионов Co^{2+} и Cd^{2+} в вегетативных органах *Phacelia tanacetifolia* Benth.

При внесении в почву только ионов кобальта в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК (вариант 2, 3) концентрация данного металла в корневой системе увеличилась на 60–86 %, а в надземной части – практически в два раза по сравнению с контролем. При внесении в почву обоих токсикантов в концентрации 2 ПДК содержание ионов кобальта в корнях растений увеличилось в 2–3 раза, а в надземной части – в 3–4 раза.

Кобальт в малых концентрациях, как микроэлемент, играет важную роль в жизни растений, принимая участие в формировании металлоферментов. Высокие концентрации ионов кобальта приводят к окислительному стрессу, ингибированию ассимиляции и нарушению работы фотосинтетического аппарата растений, а также к дефициту ионов железа, возникающему на фоне избытка кобальта [9].

При загрязнении почвы ионами кобальта в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК было отмечено достоверное снижение содержания данного металла в корневой системе проростков *C. officinalis* на 7–27 %, а в стебле – на 19–32 % по сравнению с контролем. При внесении в почву обоих поллютантов в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК наблюдалась подобная тенденция, содержание ионов кобальта снижалось на 37 % по сравнению с контролем (рис. 3).

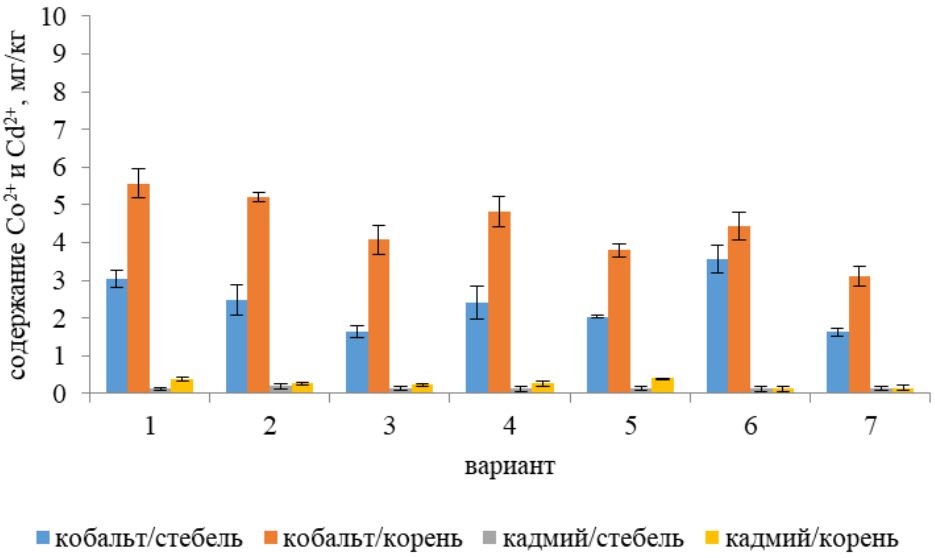


Рис. 3. Содержание ионов Co^{2+} и Cd^{2+} в вегетативных органах *Calendula officinalis* L.

Кадмий поступает в почвы техногенных регионов, в первую очередь, в результате деятельности промышленных предприятий и обладает высокой токсичностью, а также способностью активно перемещаться в пищевых цепочках, где он может накапливаться [10]. Проведенные исследования показали, что при внесении в почву только ионов кадмия в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК содержание данного металла в корнях проростков *A. houstonianum* увеличилось на 37–50 % (вариант 4, 5), а в надземной части – на 78 % (вариант 5). При внесении в почву обоих загрязнителей в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК (вариант 6, 7) концентрация ионов кобальта в корневой системе увеличилась практически в 2–3 раза по сравнению с контролем, причем содержание кадмия в корневой системе было больше, нежели в стебле (рис. 1). Возможно, высокое содержание кадмия в корневой системе связано с реализацией стратегий адаптации растений к избытку тяжелых металлов в почве, которые помогают растениям адаптироваться. К ним относятся хелатирование, размещение в вакуолях и других клеточных органеллах, а также выработка антиоксидантов. Хелатирующие компоненты растений помогут снизить токсичность металлов, уменьшая активность свободных ионов металлов в цитозоле, что, в свою очередь, снижает их реакционную способность и токсичность. Увеличение синтеза хелаторов (таких как органические кислоты, металлотионеины, фитохелатины, полифенолы, цистеин и глутатион) ведет к накоплению ионов тяжелых металлов в корнях, защищая тем самым генеративные и ассимилирующие органы от вредного воздействия свободных ионов тяжелых металлов [7].

Токсичность кадмия проявляется в ингибировании фотосинтетической активности и дыхания растений, нарушении процессов транспирации и фиксации углекислого газа, а также изменении проницаемости клеточных мембран [5]. Поскольку структура атома кадмия сходна со структурой атома цинка, он способен заменять его в активных центрах различных ферментов, что приводит к нарушению их функционирования [3]. В условиях загрязнения почвы только ионами кадмия в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК содержание данного металла в вегетативных органах проростков *P. tanacetifolia* увеличилось практически в 2–3 раза. При внесении в почву обоих поллютантов в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК (вариант 6, 7) концентрация кадмия в корнях увеличилась в 5–6 раз, а в надземной части – в 3–4 раза (рис. 2).

Абсолютно противоположная картина наблюдалась при изучении сорбционной способности проростков *C. officinalis*. При внесении в почву 1 ПДК и 2 ПДК ионов кадмия концентрация данного металла в корневой системе и в стеблях растений практически оставалась на уровне контрольных показателей (рис. 3). При внесении обоих металлов в почву в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК, их концентрация в надземной части растений сохранилась на уровне контроля, а в корне снизилась на 37 % (вариант 6).

Результаты расчета коэффициентов транслокации ионов кобальта и кадмия в системе почва-корень-стебель приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величины коэффициентов транслокации ионов кобальта и кадмия в почве и вегетативных органах проростков декоративных травянистых растений

КТЛ объектов исследования	Ион	
	Co^{2+}	Cd^{2+}
Ageratum houstonianum cv. Blue Lagoon		
почва/корень	0,24	0,39
корень/стебель	0,58	0,59
Phacelia tanacetifolia Benth.		
почва/корень	0,43	0,43
корень/стебель	0,89	0,69
Calendula officinalis L.		
почва/корень	1,0	0,93
корень/стебель	1,12	0,92

Результаты проведенных исследований позволили оценить степень накопления ионов кобальта и кадмия в корневой системе и надземных частях проростков изученных видов растений. Анализ полученных данных показал, что у проростков *A. houstonianum* и *P. tanacetifolia* концентрация металлов в корнях существенно выше, чем в побегах независимо от вида растения. Транслокационный фактор для данных растений существенно ниже единицы. Установлено, что по отношению к ионам кобальта и кадмия у проростков *C. officinalis* коэффициент транслокации приближен к 1, что свидетельствует о низкой концентрации ионов металлов в корневой системе и надземной части проростков. Очевидно, существует физиологический барьер, который ограничивает проникновение ионов металлов в вегетативные органы, природа которого до конца не исследована.

Выводы

Установлено, что при раздельном внесении в почву ионов кобальта и кадмия их концентрация в вегетативных органах *A. houstonianum* и *P. tanacetifolia* увеличивается практически в 2–3 раза, что свидетельствует о высокой сорбционной способности данных видов растений. Проростки *C. officinalis*, очевидно, формируют физиологический барьер, который препятствует поступлению ионов тяжелых металлов в ткани, особенно выраженный для вегетативных органов. У проростков *A. houstonianum* и *P. tanacetifolia* значение транслокационного коэффициента значительно меньше единицы. Это указывает на значительное превышение концентрации ионов кобальта и кадмия в корневой системе по сравнению с побегами.

Список литературы

1. *Высоцкий С. П., Фрунзе О. В.* Фитореабилитация близлежащих к автомобильным трассам территорий // Вестник Автомобильно-дорожного института Донецкого национального технического университета: международный научно-технический журнал. 2019. № 2(29). С. 59–65.

2. *Фрунзе О. В.* Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26. № 6. С. 92–98.

3. *Cui X., Xiaoqiang C., Siyu F., Yiqiang Y., Tingqiang L., Qijun N., Xiaoe Y., Zhenli H.* Potential mechanisms of cadmium removal from aqueous solution by Canna indica derived biochar // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 562. P. 517–525.

4. *Grigoletto T. L. B.* Lead in drinking water from Ribeirão Preto (SP): chemical, physical factors and possible correlations with the contamination of children // Dissertation (Master in Chemistry). University of São Paulo Paulo, São Paulo. 2011. 83 p.

5. *Hu R., Zhang Z., Lin L., Liao M., Tang Y., Liang D., Xia H., Wang J., Wang X., Lv X., Ren W.* Intercropping with hyperaccumulator plants decreases the cadmium accumulation in grape seedlings // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science. 2019. Vol. 69. No 4. P. 304–310.

6. *Junior A. M. D.* Dispersal pattern of airborne emissions from an aluminium smelter in Ouro Preto, Brasil, as expressed by foliar fluoride accumulation in eight plant species // Ecological Indicators. 2012. Vol. 8. No 5. P. 454–461.

7. *Kramer U.* Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils // Current Opinion in Biotechnology. 2008. Vol. 16. No 2. P. 133–141.

8. *Pilon-Smits E., Pilon M.* Phytoremediation of metals using transgenic plants // Critical Reviews in Plant Sciences. 2014. Vol. 21. No 5. P. 439–456.

9. *Sharma V., Naugraiya M. N., Tomar G. S.* Toxic effects of cobalt, chromium, lead and nickel chloride on growth performance of siris (*Albizia* spp.) // IJCS. 2018. Vol. 6. No 2. P. 2407–2410.

10. *Singh U. K.* Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India // Chemosphere. 2017. Vol. 174. P. 183–199.

Поступила в редакцию 27.01.2025 г.

Frunze O. V., Goretsky O. S. **Sorption capacity of some types of ornamental herbaceous plants under conditions of controlled soil contamination with cobalt and cadmium ions**. – The sorption capacity of cobalt and cadmium ions in the soil and organs of some species of ornamental herbaceous plants under conditions of controlled soil contamination with these ions in order to identify heavy metal hyperaccumulator species that can be used for landscaping and phytoremediation of soils in a technogenic region has been studied. The highest sorption capacity in seedlings of *Ageratum houstonianum cv. Blue Lagoon* and *Phacelia tanacetifolia L.* and the lowest in seedlings of *Calendula officinalis L.* was observed. It was found that the content of cobalt and cadmium ions in the root system significantly exceeds their concentration in the shoots.

Key words: cobalt, cadmium, ornamental herbaceous plants, translocation coefficient.

Фрунзе Оксана Валентиновна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры физиологии растений
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *hromyh82@mail.ru*
ORCID: 0000-0003-1082-7012
AuthorID: 1053340

Frunze Oksana Valentinovna
Candidate of Technical Sciences, Associate professor
Associate Professor of the Department of Plant Physiology, Donetsk State University,
Donetsk, DPR, Russian Federation.

Горецкий Олег Степанович
доктор биологических наук, профессор,
декан биологического факультета
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *fcl.bio.dean@mail.ru*
ORCID: 0009-0000-8259-0494
AuthorID: 1033968

Goretsky Oleg Stepanovich
Doctor of Biological Sciences, Professor,
Dean of the Faculty of Biology, Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russian Federation.