

Видно, что самая прохладная станция – это АМС в Аэропорте М-2, практически во все сезоны года там температура воздуха ниже всех остальных АМС, но отчетливо проявляется различие летом, где разница с АМС ул. Бобруйская почти на 2 °С в июле. Более теплая, за счет южной стороны пригорода, по сравнению с АМС в Аэропорте М-2 является АМС в пос. Самохваловичи, где разница с центром города составляет около 1,5 °С в июле. В зимний и весенний период амплитуда между пригородом и городом сокращается до 1 °С. Осенью – до 1–2 °С в зависимости от месяца.

В итоге, наиболее теплые районы г. Минска по данным АМС относительно схожи с данными спутниковых снимков поверхностной температуры, так как не учитывают свойства подстилающей поверхности. Теплые зоны – центр города и промышленные территории. Наименее теплые – север города, лесопарковые территории и водные объекты. Амплитуда разницы температуры воздуха пригорода и центра города достигает 2 °С летом, и 1 °С – зимой. Если сравнивать с исследованиями ГОТ г. Минска 70-х годов, то современные значения ГОТ выше примерно 0,5 °С. Это и логично, так как площадь и население г. Минска возросло за 50 лет. Можно утверждать, что данные АМС не вызывают полной уверенности в их качестве измерений, так как могут быть ошибочными. Но с другой стороны, при полном отсутствии данных температуры воздуха в городе, эти станции являются относительным показателем климата города Минска. Опираясь на международный опыт в исследованиях городского климата, можно утверждать, что такого рода данные тоже используются в исследованиях ГОТ. Таким образом, дальнейшие экспериментальные измерения температуры воздуха в городских условиях помогут повысить степень изученности данной проблемы в Беларуси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов, О.А., Васильев, В.А., Кобышева, Н.В., Раевский, А.Н., Смекалова, Л.К., Школьный, Е.П. Климатология. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
2. Ландсберг, Г.Е. Климат города. - Л.: Гидрометеиздат, 1983. - 248 с.
3. Оке, Т. R. (1976). The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. – Atmosphere, N 14, p.268–277.
4. Гольберг, М. А. Климат Минска / М. А. Гольберг. – Мн.: Выш. шк., 1976. – 288 с.
5. Шлендер, Т.В., Жуковская, Н.В., Бурченко, Г.Д., Прокопчик, Е.А., Чумаков, Е.А. Изучение теплового загрязнения г. Минска в летнее и зимнее время года по данным спутника Landsat-8. Сборник материалов 21 международной научной конференции «Сахаровские чтения 2021: экологические проблемы XXI века», Минск, Беларусь, 20–21 мая 2021, стр. 375–378

### ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБНОСТИ *LEMNA MINOR* L. К ГИПЕРАККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ STUDYING THE ABILITY OF *LEMNA MINOR* L. TO HYPERACCUMULATE OF HEAVY METALS

**Ю. В. Жильцова<sup>1,2</sup>, Б. Б. Меликов<sup>1,2</sup>, А. В. Васильева<sup>1,2</sup>**  
**Y. V. Zhyltsova<sup>1,2</sup>, B. B. Melikov<sup>1,2</sup>, A. V. Vasilieva<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь  
gebeg@iseu.by, Zhyltsova@mail.ru

<sup>1</sup>Belarusian State University, BSU, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

В работе в результате проведенных экспериментов по культивированию растения *Lemna minor* в условиях различной степени загрязнения среды тяжёлыми металлами ( $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ ) проанализированы физиологические показатели: средняя удельная скорость (темп) роста, ингибирование темпа роста и уменьшение урожайности. Установлена максимальная концентрация цинка (0,16 мг/л), в которой способно существовать растение *L. minor*, перспективное с точки зрения использования его в фиторемедиации объектов окружающей среды. Максимальная концентрация меди, в которой способно существовать растение *L. minor*, не было достигнуто.

In the work, as a result of the experiments on the cultivation of the plant *Lemna minor* under conditions of varying degrees of environmental pollution with heavy metals ( $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$ ), physiological indicators were

analyzed: the average specific growth rate, growth rate inhibition, and yield reduction. The maximum concentration of zinc (0.16 mg/l), in which the plant *L. minor* is able to exist, is promising from the point of view of its use in phytoremediation of environmental objects. The maximum concentration of copper, in which the plant *L. minor* is able to exist, has not been reached.

**Ключевые слова:** медь, цинк, культивирование растений, ряска малая, накопление тяжёлых металлов, биоремедиация, фиторемедиация.

**Keywords:** copper, zinc, plant cultivation, duckweed, accumulation of heavy metals, bioremediation, phytoremediation.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-190-193>

Загрязнение тяжёлыми металлами – одна из актуальных проблем охраны окружающей среды в мире. Высшие водные растения обладают способностью накапливать различные загрязняющие вещества, в связи с чем растения-аккумуляторы и гипераккумуляторы используют в фиторемедиации почв и водных объектов. Растения ряски *L. minor* способны аккумулировать целый ряд химических элементов (Cr, Ti, Fe, Zn, Ni, Cu, Mn, Pb, Cd) более эффективно, чем многие другие пресноводные организмы [1, 2]. Несмотря на перспективность использования ряски *L. minor* в фиторемедиации объектов окружающей среды и большое количество исследований во всём мире [1, 2], остаются недостаточно изученными вопросы о максимальных концентрациях тяжёлых металлов, в которых растение *L. minor* способно существовать. В связи с этим, целью нашей работы являлось определить допустимую нагрузку тяжёлых металлов (на примере  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ ) на *L. minor* в условиях модельных лабораторных систем.

В соответствии с данной целью были поставлены следующие задачи исследования:

- 1) Культивировать растения *L. minor* в условиях различной степени загрязнения среды тяжёлыми металлами.
- 2) Определить физиологические показатели растения *L. minor* в условиях различной степени загрязнения среды тяжёлыми металлами.

В августе 2021 года на Цнянском водохранилище (53.965 с.ш., 27.577 в.д.) были отобраны растения подсемейства Рясковые *Lemna minor* L.

Рясковые (*Lemnaceae*) являются водными, свободноплавающими растениями, обычно многолетние. Для рода *Lemna* характерно наличие листеца с 1 корешком, редко без него. У *Lemna minor* L. (Ряска малая) листецы округлые, яйцевидные, эллиптические, одиночные или соединённые небольшими группами, плавающие на поверхности. Обитает в стоячих и медленно текущих водах. Встречается часто и по всей территории Республики Беларусь [3].

Растения были доставлены в лабораторию физико-химических методов исследования МГЭИ им. А. Д. Сахарова.

Так как отобранные растения были загрязнены, то проводились процедуры по ликвидации загрязнения. Для удаления посторонних загрязняющих организмов применялась поверхностная стерилизация [4, с. 13], которая включала следующие этапы: 1. промывание в проточной воде; 2. погружение от 30 с до 5 мин в 0,5%-ный раствор гипохлорита натрия; 3. повторное промывание в дистиллированной воде; 4. помещение растений в питательную среду.

Культивирование растений проводилось согласно ГОСТ 32426-2013 [4]. Освещение производилось светодиодной лампой в диапазоне фотосинтеза (400–700 нм), температура в экспериментальных емкостях поддерживалась терморегулятором в диапазоне  $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Для культивирования использовали модифицированную культивационную среду для выращивания ряски (Шведский институт стандартов, SIS) [4, с. 14], содержащую следующие химические вещества в соответствующих концентрациях: нитрат натрия  $\text{NaNO}_3$  – 85 мг/л, калиевая соль ортофосфорной кислоты  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 13,4 мг/л, гептагидрат сульфата магния (магний сернокислый семиводный)  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 75 мг/л, кальций хлористый двухводный  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 36 мг/л, карбонат натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 20 мг/л, кислота борная  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 1 мг/л, хлорид марганца четырёхводный  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  – 0,2 мг/л, молибдат натрия двухводный  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 0,01 мг/л, сульфат цинка семиводный  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0,05 мг/л, сульфат меди пятиводный  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 0,005 мг/л, нитрат кобальта шестиводный  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 0,01 мг/л, железа (III) хлорид гексагидрат  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 0,84 мг/л, динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты двухводная  $\text{Na}_2 \cdot \text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 1,4 мг/л. Таким образом, готовая среда содержит следующие элементы в соответствующих концентрациях: Na – 32 мг/л, N – 14 мг/л, K – 6 мг/л, P – 2,4 мг/л, Mg – 7,4 мг/л, S – 9,8 мг/л, Ca – 9,8 мг/л, Cl – 17,5 мг/л, C – 2,3 мг/л, B – 0,17 мг/л, Mn – 0,056 мг/л, Mo – 0,004 мг/л, Zn – 0,011 мг/л, Cu – 0,0013 мг/л, Co – 0,002 мг/л, Fe – 0,17 мг/л.

До начала проведения эксперимента растения *Lemna minor* L., содержались в культивационной среде более 8 недель, что соответствует требованиям методики, и в течение которых был достигнут необходимый удельный темп роста растений ( $0,275 \text{ день}^{-1}$ ) [4, с. 3].

Известно, что предельно допустимые концентрации меди и цинка в воде поверхностных водных объектов определяются по природному фоновому содержанию. Так, для водотоков Республики Беларусь природное фоновое содержание меди в воде составляет от 0,0038 мг/л до 0,0045 мг/л, а для водоёмов – 0,0035 мг/л. Фоновое содержание цинка в воде составляет от 0,012 мг/л до 0,016 мг/л в водотоках и 0,010 мг/л в водоёмах Республики Беларусь [5]. Приведённые фоновые концентрации цинка сравнимы с концентрацией цинка в используемой модифицированной культивационной среде для выращивания ряски, а концентрации меди в 2,7 раз выше. Согласно [4, с.5], в эксперименте использовали не менее 5 концентраций, взятых в геометрической прогрессии с фактором

разведения между тестовыми концентрациями не выше 3,2. Поэтому для определения допустимых нагрузок тяжёлых металлов на *L. minor* растения культивировали в условиях модельных лабораторных систем в водной среде со следующими концентрациями металлов:  $\text{Cu}^{2+}$  0,002 мг/л; 0,004 мг/л; 0,008 мг/л; 0,016 мг/л; 0,032 мг/л и 0,064 мг/л;  $\text{Zn}^{2+}$  0,02 мг/л; 0,04 мг/л; 0,08 мг/л; 0,16 мг/л; 0,32 мг/л и 0,64 мг/л. Таким образом, видно, что значения концентраций меди в воде 0,004 мг/л и 0,002 мг/л были на уровне ПДК и ниже в 2 раза соответственно, остальные – выше ПДК. Значения концентраций цинка в воде культивационной среды сравнимы с фоновым содержанием цинка в воде водоёмов. Выбранные экспериментальные концентрации – в 2, 4, 8, 16, 32 и 64 раза выше.

Растения культивировали в течение 7 дней в четырёхкратной повторности. По истечении этого времени проводилась оценка среднего удельного темпа роста, ингибирование темпа роста и уменьшение урожайности *Lemna minor* L. Рост растений в загрязнённой культивационной среде сравнивали с контролем – рост *Lemna minor* L. в культивационной среде без добавления ионов металлов в аналогичных условиях.

Среднюю удельную скорость (темп) роста рассчитывали в виде логарифмического увеличения количества пластинок *Lemna minor* L. в течение 7 суток воздействия загрязнителя (ионов тяжёлых металлов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ ) – с помощью формулы (1) для каждой параллели опытных и контрольной групп:

$$\mu_{i-j} = \frac{\ln(N_j) - \ln(N_i)}{t}, \quad (1)$$

где  $\mu_{i-j}$  – средняя удельная скорость роста растения *Lemna minor* L. за 7 дней проведения эксперимента, день<sup>-1</sup>;

$N_j$  – количество пластинок *Lemna minor* L. в тесте или в контрольном сосуде на 7-е сутки;

$N_i$  – количество пластинок *Lemna minor* L. или живой вес *Lemna minor* L. в тесте или в контрольном сосуде в начале эксперимента;

$t$  – период времени, здесь 7 дней.

Вычисление ингибирования темпа роста  $\%I_r$  осуществлялось по формуле:

$$\%I_r = \frac{(\mu_k - \mu_c)}{\mu_c} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $\%I_r$  – процент ингибирования среднего темпа роста;

$\mu_c$  – средняя удельная скорость роста *Lemna minor* L. в группе тестируемой концентрации,

$\mu_k$  – средняя удельная скорость роста *Lemna minor* L. в группе контроля,

Влияние на урожайность определяли по следующей формуле:

$$\%I_y = \frac{N_k - N_c}{N_k} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $\%I_y$  – уменьшение урожайности *Lemna minor* L., %;

$N_k$  – количество пластинок *Lemna minor* L. в контрольном сосуде в конце периода воздействия загрязнителя;

$N_c$  – количество пластинок *Lemna minor* L. в тесте в конце периода воздействия загрязнителя.

Полученные результаты проведённых экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средняя удельная скорость (темп) роста, ингибирование темпа роста и уменьшение урожайности *Lemna minor* L. при воздействии различных концентраций металлов,  $p=0,95$

Показатель, %	Концентрация $\text{Cu}^{2+}$ , мг/л (ПДК [0,0035 мг/л – 0,0045 мг/л])						
	Контроль 0,0013 мг/л	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,064
Средняя удельная скорость роста, день <sup>-1</sup>	0,275 ± 0,022	0,248 ± 0,028	0,241 ± 0,015	0,243 ± 0,015	0,234 ± 0,022	0,224 ± 0,035	0,225 ± 0,017
Ингибирование темпа роста, %	-	11,3 ± 13,2	14,3 ± 7,2	13,4 ± 7,1	17,9 ± 11,4	23,8 ± 8,7	22,2 ± 9,5
Уменьшение урожайности, %	-	21,6 ± 14,7	27,2 ± 13,4	25,5 ± 13,3	33,9 ± 2,9	44,5 ± 4,1	41,9 ± 3,3
Показатель, %	Концентрация $\text{Zn}^{2+}$ , мг/л (ПДК [0,010 мг/л – 0,016 мг/л])						
	Контроль 0,011 мг/л	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64
Средняя удельная скорость роста, день <sup>-1</sup>	0,275 ± 0,022	0,233 ± 0,025	0,229 ± 0,018	0,229 ± 0,020	0,219 ± 0,021	0,210 ± 0,024	0,198 ± 0,019
Ингибирование темпа роста, %	-	17,8 ± 2,2	21,0 ± 5,3	20,4 ± 9,8	26,2 ± 2,2	31,4 ± 11,4	39,3 ± 12,1
Уменьшение урожайности, %	-	33,7 ± 4,0	39,4 ± 8,2	38,4 ± 8,3	48,9 ± 9,7	58,2 ± 10,0	71,9 ± 10,4

Таким образом, выяснено, что все исследованные концентрации вызывали значимый ( $p=0,95$ ) эффект ингибирования темпов роста *Lemna minor* L. в сравнении с контролем. Уменьшение средней удельной скорости роста растений в случае воздействия ионами меди происходит на уровне предельно допустимых концентраций и ниже (0,002 мг/л и 0,004 мг/л), что говорит о высокой чувствительности растений *Lemna minor* L. к содержанию ионов меди в воде.

При концентрации цинка 0,16 мг/л и выше наблюдается уменьшение урожайности ряски в 2 раза и выше. Кроме того, у растений, культивированных в воде с добавлением цинка в концентрациях 0,16 мг/л, 0,32 мг/л и 0,64 мг/л наблюдалось обесцвечивание молодых пластинок. Следовательно, нами предлагается рассматривать концентрацию цинка в воде 0,16 мг/л как максимальную концентрацию цинка, в которой способно существовать растение *L. minor*, перспективное с точки зрения использования его в фиторемедиации объектов окружающей среды.

При культивировании *Lemna minor* L. в водной среде с различными концентрациями меди не наблюдалось видимых признаков изменения окраски молодых пластинок растений. Максимальное уменьшение урожайности и ингибирование темпа роста изменялось в пределах  $44,5 \pm 4,1$  % и  $23,8 \pm 8,7$  % соответственно. Максимальная концентрация меди, в которой способно существовать растение *L. minor* не было достигнуто. Для решения данной задачи требуется проведение дальнейших экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Combination of aquatic species and safeners improves the remediation of copper polluted water / I. Panfili [et al.] // The Science of the Total Environment – 2017. – Vol. 601–602. – P. 1263–1270.
2. Ольшанская, Л.Н. Извлечение металлов из вод фитосорбентом рясковой малой (*Lemna minor*) / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда // Техногенная и природная безопасность: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Саратов, 20–21 апреля 2017 г. / Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. – 2017. – С. 77–80.
3. Парфенов В. И. Определитель высших растений Беларуси / В.И. Парфенов. – 1999. – С. 471.
4. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Испытание ряски на угнетение роста : ГОСТ 32426-2013 ; введ. Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 05.11.2013 № 61-П) – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2013. – 20 с.
5. Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов : Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 30.03.2015 № 13 ; Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь : 25.04.2015, 8/29808. – 17 с.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОКРАСОЧНОГО ПОЛИМОРФИЗМА СИНАНТРОПНОГО СИЗОГО ГОЛУБЯ (*Columba livia* L.) В Г. МИНСКЕ

### CURRENT STATUS OF PAINTING POLYMORPHISM THE SYNANTHROPIC ROCK DOVE (*Columba livia* L.) IN THE CITY OF MINSK

И. М. Хандогий<sup>1,2</sup>

I. Khandohiy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь  
gebeg@iseu.by, handogiy@mail.ru

<sup>1</sup>Belarusian State University, BSU, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

В статье рассматриваются особенности окрасочного полиморфизма сизого голубя в условиях разнотипных городских ландшафтов разных административных центров г. Минска. Анализ экологии синантропного сизого голубя урбанизированных территорий столицы позволил выявить пространственную структуру по отношению к жилищным городским кварталам, зависящей от этажности жилой и времени жилой застройки, а также ярко выраженное доминирование черно-чеканной морфы. Делается вывод, что в городе Минске представлены основные окрасочные морфы сизого голубя. Отмечено абсолютное доминирование темноокрашенных особей (черно-чеканные – 65 %, черные – 5 %), далее по убыванию номинальная сизая окраска – 30 %, коричневые – 5 % и пегие – 6 % учетных особей. Выявлено абсолютное преобладание во всех административных районах черно-чеканных особей, которые максимально представлены в Заводском и Фрунзенском районах – 71 и 69 % соответственно.