

УДК 574.24

DOI 10.21685/2500-0578-2022-2-4

# ДИНАМИКА УСТОЙЧИВОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ *TARAXACUM OFFICINALE* WIGG. S. L. К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

**Д. И. Башмаков**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,  
Россия, 430005, Саранск, ул. Большевикская, 68

dimabashmakov@yandex.ru

**Аннотация.** Актуальность и цели. Токсичность ионов тяжелых металлов (ТМ) способствовала выработке механизмов гомеостаза и/или детерминант резистентности к ТМ у живых организмов. Показано, что в условиях загрязнения развитие толерантных к ТМ экотипов происходило относительно быстрыми темпами. Однако информации о скорости адаптаций растительных популяций к антропогенному загрязнению ТМ крайне мало. В работе была прослежена многолетняя динамика устойчивости локальных популяций *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. к антропогенному загрязнению почв ТМ в условиях геохимической аномалии с повышенным содержанием цинка и никеля в материнских породах. **Материалы и методы.** На пробных площадках, заложенных на различных по степени антропогенной нагрузки биотопах на территории Республики Мордовия (гг. Саранск и Рузаевка) и Нижегородской области (гг. Саров и Первомайск), были измерены концентрации ТМ в почвенных пробах, а также собраны семена одуванчика лекарственного. Семена проращивали в факторостатированных условиях на воде (контроль) или на средах, содержащих от 10 до 1 000 мкМ ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$ . Спустя 3 недели опыта измеряли чувствительные к ТМ адаптивные параметры растений. **Дескриптивный анализ** полученных данных проводили в программе MS Excel. Существенность различий между вариантами опыта оценивали по критерию Дункана при 5 % уровне значимости. Для оценки степени адаптации растений к ТМ использовали индекс адаптации ( $\text{ИА}_{\text{ТМ}}$ ), рассчитываемый как среднее геометрическое всех исследованных адаптационных эффектов ( $\text{АЭ}_i$ , % к водному контролю). **Результаты и выводы.** Семнадцатилетний мониторинг локальных популяций из разных локаций в Мордовии и Нижегородской области позволил сделать вывод, что сформированные популяции *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. находятся на разных стадиях адаптации к ТМ – от экады до эдафотипа. В большинстве исследованных локаций степень толерантности популяций повышалась с возрастанием концентраций ТМ в почвах биотопа. Однако практически на всех исследованных локациях степень адаптации локальных популяций одуванчика к ионам  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  была выше, чем к  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$ .

**Ключевые слова:** *Taraxacum officinale* Wigg. s. l., индекс адаптации, тяжелые металлы, геохимическая аномалия, экада, эдафотип

**Для цитирования:** Башмаков Д. И. Динамика устойчивости локальных популяций *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. к загрязнению почв тяжелыми металлами // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2022. Vol. 7 (2). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-2-4>

## DYNAMICS OF RESISTANCE OF LOCAL DANDELION POPULATIONS TO HEAVY METAL POLLUTION OF SOILS

**D. I. Bashmakov**

National Research Ogarev Mordovia State University, 68 Bol'shevistskaia street, Saransk, 430005, Russia

dimabashmakov@yandex.ru

**Abstract.** **Background.** The toxicity of heavy metals (HMs) ions contributed to the development of homeostasis mechanisms and/or determinants of resistance to HMs in living organisms. In contaminated environment, the development of HM-tolerant ecotypes occurred relatively fast. However, there is very little information about the adaptation rate of plant populations to anthropogenic pollution of HMs. The research traced the long-term dynamics of the local *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. populations resistance to anthropogenic soils pollution with

HMs in the conditions of a geochemical anomaly with an increased Zn and Ni content in the parent rocks. *Materials and methods.* The test sites were placed in biotopes, differing in the degree of anthropogenic load on the territory of the Mordovia Republic (Saransk-Ruzaevka urban agglomeration) and of the Nizhny Novgorod region (the cities of Sarov and Pervomaisk). At each test site HMs concentrations were measured in soil samples, and dandelion seeds were collected. The seeds were germinated under controlled conditions on water (control) or on media containing from 10 to 1,000  $\mu\text{M}$  of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  or  $\text{Pb}^{2+}$  ions. After 21 days of the experiment, the HM-sensitive adaptive parameters of plants were measured. Descriptive statistics was made in the MS Excel program. The significance of the differences between the experiment variants was assessed by the Duncan test at  $p \leq 0.05$ . To assess the plants adaptation degree to HMs, the adaptation index ( $IA_{\text{HM}}$ ) was used. *Results and conclusions.* Seventeen-year monitoring of local populations from different locations in Mordovia and the Nizhny Novgorod region allowed us to conclude that formed populations of *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. are in different stages (from oecads to edaphotypes) of adaptation to HMs. In most of the studied locations, the tolerance of populations increased if the soils HMs concentrations increased. However, in almost all the studied locations, the degrees of adaptation of local dandelion populations to  $\text{Ni}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  ions were higher than those to  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$ .

**Keywords:** *Taraxacum officinale* Wigg. s. l., adaptation index, heavy metals, geochemical anomaly, oecad, edaphotype

**For citation:** Bashmakov D.I. Dynamics of resistance of local dandelion populations to heavy metal pollution of soils. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022;7(2). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-2-4>

## Введение

Тяжелые металлы (ТМ) являются одним из главных природных токсикантов, с которыми растения все чаще встречаются в связи с нарастающим антропогенным воздействием на окружающую среду [1]. Токсичность ионов ТМ способствовала выработке механизмов гомеостаза и/или детерминант резистентности к ТМ у сталкивающихся с ними живых организмов [2]. У растений, произрастающих на загрязненных территориях, выявлены различия в генетической структуре [3]. Показано, что в условиях загрязнения развитие толерантных к ТМ экотипов происходило относительно быстрыми темпами [4, 5]. Однако информации о скорости адаптации растительных популяций к антропогенному загрязнению ТМ крайне мало [6, 7].

В работе была прослежена многолетняя динамика устойчивости локальных популяций *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. к антропогенному загрязнению почв тяжелыми металлами в условиях геохимической аномалии с повышенным содержанием цинка и никеля в материнских породах.

## Материалы и методы

*Район работ.* Исследования проводили на территории Республики Мордовия и Нижегородской области:

– Саранск (54°11' с. ш., 45°11' в. д.) – город в восточной части Центральной России на Приволжской возвышенности. Почвы: серые лесные, черноземы (выщелоченный и оподзолен-

ный), пойменные аллювиальные, урбанозем. Загрязнение почв обусловлено выбросами и сбросами транспортных организаций, предприятий свето- и электротехнической, приборостроительной, станко- и машиностроительной, химической, медицинской, лесной и деревообрабатывающей, пищевой промышленности и производства строительных материалов [8]. Таким образом, формирующиеся в пределах города зоны загрязнения отличаются полиэлементным составом, что определяет высокую степень суммарного загрязнения [9];

– Рузаевка (54°04'00" с. ш., 44°57'00" в. д.) – город-спутник Саранска. Почвы: серые лесные, выщелоченный чернозем, пойменные аллювиальные. Основными загрязнителями являются предприятия химической, машиностроительной, пищевой промышленности и транспорт. Станция Рузаевка – крупный железнодорожный узел Куйбышевской железной дороги на пересечении Транссибирской магистрали и Нижегородско-Харьковского хода с сортировочной станцией первого класса. В городских почвах отмечается аномальное содержание следующих элементов: Yb 4,0, Cu 3,5, Zn 2,7, Pb, Ba 2,4, Sc 2,3, Sn 2,1, Ni 1,6, Y 1,5 [10];

– Первомайск (54°52'00" с. ш., 43°48'00" в. д.) – город в Нижегородской области – расположен вдали от крупных автомагистралей, на территории размещена конечная железнодорожная станция Первомайск-Горьковский тупиковой ветки. Почвы: дерново-подзолистые, серые лесные, пойменные аллювиальные. Основным источником загрязнения природной среды тяжелыми металлами в городе и прилегающих к нему территориях – АО «Транспневматика» [11];

– Саров (54°56'00" с. ш., 43°19'00" в. д.) – российский федеральный ядерный центр, расположенный на границе Нижегородской области и Республики Мордовия. Почвы: дерново-подзолистые, пойменные аллювиальные. Основной вклад в выбросы загрязняющих веществ стационарными источниками вносит ТЭЦ города – 80 %. Среднегодовые учтенные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников составляют более 1413 т, в том числе свинца – 10,5 т. [12].

В ходе исследований согласно ГОСТ Р 53123–2008<sup>1</sup> заложены пробные площадки, располагающиеся в неодинаковых по степени загрязнения ТМ функциональных зонах исследованных городов. Отбор почвенных проб на площадках осуществляли методом «конверта» с глубины 0–10 см в середине вегетационного периода в соответствии с тем же ГОСТом.

**Объект исследований.** На пробных площадках были собраны семена одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* F. H. Wigg. s. l.) – многолетнего травянистого растения из семейства *Compositae Giseke*, имеющего огромное множество подвидов, разновидностей, экологических и физиологических рас; эксплорента, семена которого не имеют периода покоя и могут прорасти сразу после осыпания [13–15].

**Методика исследований.** Валовое количество ТМ в почве определяли рентгенофлуоресцентным методом на рентгенофлуорометре «Спектроскан» (НПО «Спектрон», Россия) [16] или по ГОСТ 2642.3–2014<sup>2</sup> на атомно-абсорбционном спектрометре серии AA-7000 (Shimadzu, Япония). Результаты определений массовой концентрации элементов пересчитывали в мг/кг воздушно-сухой массы почвы.

Проведенные ранее исследования дают основание предполагать, что загрязнение никелем и цинком имеет преимущественно природное, а свинцом и медью – антропогенное происхождение [17].

Семена одуванчика проращивали в факторостатированных условиях (фотопериод 16/8 ч (день/ночь), влажность воздуха ~ 70 %, освещенность люминесцентными лампами ~ 80  $\mu\text{M}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{c}^{-1}$ , температура 14–18 °C) на воде (контроль) или на средах, содержащих 10 мкМ/л или 1 мМ/л ионов ТМ (концентрации приблизительно соответствуют диапазону доступных растениям концентраций ТМ в почвенном растворе). Используются соли ТМ квалификации ч.д.а.:

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53123–2008 (ИСО 10381-5: 2005). КАЧЕСТВО ПОЧВЫ. Отбор проб. Часть 5. Руководство по изучению городских и промышленных участков на предмет загрязнения почвы : введ. 01.01.2010. М. : Стандартинформ, 2009. 40 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 2642.3–2014. Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения оксида кремния (IV) : введ. 01.01.2016. М. : Стандартинформ, 2015. 9 с.

$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{NiSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ . Спустя 3 недели опыта измеряли адаптивные физиологические и биохимические параметры молодых растений: всхожесть семян – по ГОСТ 12038–84<sup>3</sup>; длину подземных (главный корень) и надземных (побег) органов – линейкой или анализируя отсканированные изображения в программе Curvometer v.1.4 [18]; сухую и сырую массу и оводненность осевых органов – высушиванием до постоянной массы при 95–105 °C [18]. Биохимические адаптационные параметры измеряли с помощью спектрофотометров СФ-46 («ЛОМО», Россия) и UV-mini 1240 (Shimadzu, Япония): интенсивность перекисного окисления липидов – по накоплению малонового диальдегида (МДА) в цветной реакции с тиобарбитуровой кислотой при длине волны 532 нм с последующим расчетом содержания МДА по коэффициенту молярной экстинкции ( $\epsilon = 1,56 \times 10^5 (\text{M} \cdot \text{cm})^{-1}$ ) [19]; скорость генерации супероксидного аниона – по восстановлению адреналина в адренохром – при длине волны 480 нм, с последующим расчетом скорости генерации  $\text{O}_2^-$  по коэффициенту молярной экстинкции ( $\epsilon = 4020 (\text{M} \cdot \text{cm})^{-1}$ ) [19]; активность каталазы (КАТ) – при длине волны 240 нм – по падению оптической плотности за минуту, с последующим расчетом по коэффициенту молярной экстинкции ( $\epsilon = 39,4 (\text{mM} \cdot \text{cm})^{-1}$ ) [19].

Все опыты и анализы проводили не менее чем в трех повторениях. Дескриптивный анализ полученных данных проводили в программе MS Excel (лиц. OfficeProPlus 2013 RUS OLP NL Acdmс № 62526942). Существенность различий между вариантами оценивали по критерию Дункана при 5 % уровне значимости.

Для оценки устойчивости растений к ТМ использовали разработанный ранее индекс адаптации ( $\text{ИА}_{\text{ТМ}}$ ), рассчитываемый как среднее геометрическое всех исследованных адаптационных эффектов ( $\text{АЭ}_i$ , % к водному контролю):

$$\text{ИА}_{\text{ТМ}} = \left( \prod_{i=1}^n \text{АЭ}_i \right)^{1/n} \pm \text{GSD}, \text{ где } 6 \leq n \leq 8 -$$

количество учитываемых АЭ растений на данную концентрацию ТМ.

Значения  $\text{ИА}_{\text{ТМ}}$  (с учетом GSD) были эмпирически соотнесены с грациями зон экологической толерантности растений следующим образом:

- $\text{ИА}_{\text{ТМ}} \pm \text{GSD} > 100\%$  – витальная зона, очень высокая адаптация к ТМ;
- $\text{ИА}_{\text{ТМ}} \pm \text{GSD} \approx 100\%$  – оптимальная зона, высокая (хорошая) адаптация к ТМ;

<sup>3</sup> ГОСТ 12038–84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : № 4710 от 19.12.1984 : [с изм. № 1, 2 ; с поправкой]. М. : Издательство стандартов, 2004. 49 с.

- 80 % < ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 100 % – субоптимальная зона, удовлетворительная адаптация к ТМ;
- 50 % < ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 80 % – пессимальная зона, низкая адаптация к ТМ;
- 20 % < ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 50 % – сублетальная зона, адаптация к ТМ очень низка;
- ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 20 % – летальная зона (адаптация к ТМ отсутствует).

### Результаты и их обсуждение

Поскольку *Taraxacum officinale* имеет огромное количество подвидов, разновидностей и физиологических рас, на его примере удобно проследить сопряженность значений металлоустойчивости и загрязнения почвы ТМ (табл. 1).

Таблица 1

Индексы адаптации локальных популяций *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. из неодинаковых по величине суммарного загрязнения тяжелыми металлами почв биотопов к различным концентрациям металлов в тестируемой среде, %

Table 1

Adaptation indexes for local *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. populations from biotopes with different amounts of total heavy metal contamination of soils to different concentrations of the metals in the tested media, %

| ТМ                                       | Величина суммарного загрязнения металлами почв биотопа                     |                       |  |                       |   |                       |
|--|--|-----------------------|--|-----------------------|---|-----------------------|
|  | Относительно незагрязненные площадки<br>(0,5 < ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ < 3,0) |                       | Слабозагрязненные площадки<br>(3,0 < ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ < 6,0) |                       | Загрязненные промышленные площадки<br>(6,0 < ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ < 12,0) |                       |
|  | ИА <sub>10 МРМ</sub> ТМ  | ИА <sub>1 ММ</sub> ТМ | ИА <sub>10 МРМ</sub> ТМ  | ИА <sub>1 ММ</sub> ТМ | ИА <sub>10 МРМ</sub> ТМ   | ИА <sub>1 ММ</sub> ТМ |
| <b>Саранск, Республика Мордовия</b>      |  |                       |  |                       |   |                       |
|  | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 1,76  |                       | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 3,49                                      |                       | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 11,07  |                       |
| Zn                                       | 90 ± 15  | 22 ± 7                | 58 ± 3   | 22 ± 3                | 148 ± 5   | 68 ± 12               |
| Ni                                       | 97 ± 4   | 55 ± 12               | 67 ± 3   | 17 ± 2                | 156 ± 10  | 61 ± 14               |
| Cu                                       | 72 ± 4   | 23 ± 1                | 54 ± 13  | погибли               | 101 ± 11  | 56 ± 7                |
| Pb                                       | 96 ± 9   | 92 ± 13               | 59 ± 2   | 16 ± 2                | 94 ± 9  | 53 ± 5                |
| <b>Рузаевка, Республика Мордовия</b>     |  |                       |  |                       |   |                       |
|  | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 2,91  |                       | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 3,63                                      |                       | Нет площадок  |                       |
| Zn                                       | 93,2 ± 15,0  | 80,1 ± 6,2            | 110,7 ± 22,8   | 76,1 ± 8,0            | –   |                       |
| Ni                                       | 66,6 ± 10,4  | 40,2 ± 9,2            | 83,8 ± 19,5  | 55,8 ± 8,5            |   |                       |
| Cu                                       | 90,0 ± 3,0   | 62,1 ± 5,2            | 100,2 ± 10,7   | 77,3 ± 1,7            |   |                       |
| Pb                                       | 26,4 ± 7,6   | 18,8 ± 8,2            | 36,6 ± 9,4   | 30,9 ± 8,6            |   |                       |
| <b>Первомайск, Нижегородская область</b> |  |                       |  |                       |   |                       |
|  | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 0,97  |                       | Нет площадок   |                       | Нет площадок  |                       |
| Zn                                       | 77 ± 1   | 39 ± 12               | –  |                       | –   |                       |
| Ni                                       | 107 ± 8  | 32 ± 14               |  |                       |   |                       |
| Cu                                       | 95 ± 21  | 31 ± 8                |  |                       |   |                       |
| Pb                                       | 94 ± 9   | 56 ± 2                |  |                       |   |                       |
| <b>Саров, Нижегородская область</b>      |  |                       |  |                       |   |                       |
|  | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 1,71  |                       | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 5,83                                      |                       | ΣK <sub>ОДК</sub> ТМ = 7,36   |                       |
| Zn                                       | 104 ± 4  | 83 ± 3                | 101 ± 3  | 88 ± 2                | 138 ± 5   | 110 ± 3               |
| Ni                                       | 94 ± 3   | 78 ± 4                | 94 ± 2   | 82 ± 3                | 131 ± 4   | 105 ± 3               |
| Cu                                       | 115 ± 5  | 90 ± 2                | 106 ± 2  | 89 ± 2                | 108 ± 3   | 87 ± 2                |
| Pb                                       | 97 ± 3   | 78 ± 4                | 90 ± 3   | 76 ± 3                | 114 ± 3   | 99 ± 1                |

#### Условные обозначения

Степень адаптации проростков к уровню ТМ в среде выращивания:

- витальная зона, очень высокая адаптация – ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD > 100 %;
- оптимальная зона, высокая (хорошая) адаптация – ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD ≈ 100 %;
- субоптимальная зона, удовлетворительная адаптация – 80 % < ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 100 %;
- пессимальная зона, низкая адаптация – 50 % < ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 80 %;
- сублетальная зона, адаптация очень низка – 20 % < ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 50 %;
- летальная зона (адаптация отсутствует) – ИА<sub>ТМ</sub> ± GSD < 20 %;
- площадки с таким загрязнением в городе отсутствуют.

Исследования показали, что под влиянием почвенно-грунтовых условий в промышленных зонах г. Саранска сформировалась локальная популяция одуванчика лекарственного, толерантная к небольшим концентрациям эссенциальных ТМ, в относительно чистых биотопах – популяции, имеющие хороший потенциал адаптации к Ni и Pb, а в слабозагрязненных локациях устойчивость популяций ко всем исследованным ТМ была крайне низка. Растения из среднезагрязненного района г. Рузаевки отличались высокой устойчивостью как к небольшим, так и к сублетальным концентрациям ТМ, однако степень адаптации к эссенциальным ТМ (особенно  $Zn^{2+}$  и  $Cu^{2+}$ ) была выше. При действии 1 мМ эссенциальных ТМ ИА растений из незагрязненного биотопа снижались до категорий «очень низкая» и «низкая», а у растений с загрязненной площадки – оставались на уровне удовлетворительной или низкой адаптации. В относительно незагрязненном биотопе в г. Первомайске обнаружена локальная популяция, имеющая высокую степень адаптации к небольшим концентрациям и очень низкую – к 1 мМ исследованных ТМ. Растения

из локальных популяций одуванчика в г. Сарове, произрастающие на незагрязненных почвах, характеризовались очень высокой и высокой степенью адаптации к небольшим и удовлетворительной и низкой – к высоким концентрациям ТМ. В то же время особи, выросшие из семян с промплощадки близ ТЭЦ (загрязненный биотоп), отличались очень высокой и высокой степенью адаптации во всех вариантах опыта (исключением были только растения, экспонированные с 1 мМ ионов  $Cu^{2+}$ ).

Как видно из табл. 2, степень адаптации локальных популяций одуванчика к Zn и Ni более тесно (на уровне значимости 95–99 %) коррелировала с величиной суммарного загрязнения почв биотопов. На всех исследованных территориях величины ИА у растений одуванчика как с загрязненных, так и с относительно чистых биотопов были более высокими по отношению к Ni и Zn и низкими – к Pb и Cu, что, вероятно, обусловлено неодинаковой продолжительностью влияния естественных и техногенных аномалий этих ТМ в почвах на механизмы формирования адаптации растений.

Таблица 2

Теснота связи индексов адаптации растений к ТМ и суммарного загрязнения почв биотопа металлами, оцененная по коэффициенту корреляции (r) Пирсона

Table 2

The correlation between the indexes of plant adaptation to heavy metals and the total biotope soils contamination with metals, estimated by the Pearson correlation coefficient (r)

| Уровень ТМ в среде      | Zn      | Ni      | Cu   | Pb    |
|-------------------------|---------|---------|------|-------|
| ИА <sub>10 мкМ</sub> ТМ | 0,782** | 0,728** | 0,28 | 0,257 |
| ИА <sub>1 мМ</sub> ТМ   | 0,434*  | 0,429*  | 0,29 | 0,117 |

Примечание: \* – корреляция существенна при  $p = 95\%$ ; \*\* – корреляция существенна при  $p = 99\%$ .

Полученные данные позволяют предполагать существование в неодинаковых по уровню загрязнения экотопах локальных популяций одуванчика не только с неодинаковой степенью адаптации к пониженным и повышенным концентрациям ТМ, а также существование на одной и той же территории растений, различающихся устойчивостью к ионам различных ТМ.

Все категории устойчивых растений имеют преимущества при произрастании на загрязненной ТМ почве по ряду причин: 1) на этих участках мало конкурирующих видов; 2) высокое накопление ТМ в надземных органах удерживает травоядных от питания гипераккумуляторами [20]; 3) гипераккумуляторы уничтожают конкурентоспособные растения путем дальнейшего загрязнения окружающей почвы

вследствие опада загрязненных ТМ листьев [5, 20].

В условиях антропогенного загрязнения почв ТМ неустойчивые индивидуумы достаточно быстро элиминируют, устойчивые отбираются, и популяция приобретает потенциал для адаптации. Однако формирование устойчивости во многом зависит от продолжительности жизненного цикла растения. Так, молекулярный анализ показал, что воздействие ТМ в течение более 30 лет не влияло на генетическую структуру популяций древесных хвойных и лиственных пород [21–24], но привело к развитию металлоустойчивых экотипов у некоторых травянистых видов [25].

Многолетний мониторинг локальных популяций рудеральных растений из разных локаций в Республике Мордовия и Нижегородской

области позволил сделать ряд обобщений о формировании устойчивых к загрязнению ТМ

популяций, находящихся на разных стадиях адаптации – от экады до эдафотипа (табл. 3).

Таблица 3

Динамика устойчивости к ТМ локальных популяций *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. за период с 1998 по 2015 г. в связи со степенью загрязнения почв тяжелыми металлами

Table 3

Dynamics of local *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. populations resistance to heavy metals for the period from 1998 to 2015 due to the degree of soil contamination with heavy metals

| ТМ  | Степень загрязнения почвы к концу периода наблюдений                                  |                         |                       |   |                         |                       |
|---|---|-------------------------|-----------------------|---|-------------------------|-----------------------|
|   | Незагрязненные и слабозагрязненные площадки<br>( $1 < \Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} < 6$ ) |                         |                       | Загрязненные промышленные площадки<br>( $6 < \Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} < 12$ ) |                         |                       |
|   | Динамика<br>$K_{\text{ОДК ТМ}}$   | ИА <sub>10 мкм</sub> ТМ | ИА <sub>1 мм</sub> ТМ | Динамика<br>$K_{\text{ОДК ТМ}}$   | ИА <sub>10 мкм</sub> ТМ | ИА <sub>1 мм</sub> ТМ |
| <b>Саранск, Республика Мордовия (продолжительность наблюдений – 17 лет)</b> |   |                         |                       |   |                         |                       |
|   | $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} = 1,76$   |                         |                       | $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} = 10,34$  |                         |                       |
| Zn  |   | +                       | –                     |   | +                       | +                     |
| Ni  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| Cu  |   | +                       | +                     |   | –                       | +                     |
| Pb  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| <b>Саранск, Республика Мордовия (продолжительность наблюдений – 17 лет)</b> |   |                         |                       |   |                         |                       |
|   | $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} = 3,49$   |                         |                       | $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} = 11,07$  |                         |                       |
| Zn  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| Ni  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| Cu  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| Pb  |   | +                       | +                     |   | ?                       | ?                     |
| <b>Саров, Нижегородская область (продолжительность наблюдений – 10 лет)</b> |   |                         |                       |   |                         |                       |
|   | $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} = 1,71$   |                         |                       | $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}} = 7,36$   |                         |                       |
| Zn  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| Ni  |   | +                       | +                     |   | +                       | +                     |
| Cu  |   | +                       | +                     |   | +                       | –                     |
| Pb  |   | ?                       | +                     |   | +                       | –                     |

Примечание. Величины суммарного загрязнения почв ( $\Sigma K_{\text{ОДК ТМ}}$ ) на пробных площадках приведены на конечный год исследования.

## Условные обозначения

 Динамика ИА<sub>ТМ</sub> за годы исследования:

– положительная; – без изменений; – отрицательная.

## Динамика загрязнения почв пробной площадки за время наблюдений:

– положительная; – без изменений; – отрицательная.

## Стадия адаптации локальной популяции:

– экады; – эдафотипы; – не удалось идентифицировать.

Локальные популяции с нестабильными, динамичными уровнями ИА<sub>ТМ</sub>, меняющимися вслед за изменениями концентрации ТМ в почвах биотопа, можно отнести к экадам. Таковой была, например, экада одуванчика лекарственного из загрязненного участка г. Сарова, особи в которой отличались лабильной устойчивостью к ионам Cu<sup>2+</sup> и Pb<sup>2+</sup>, но постепенно повышали уровень адаптации к Zn<sup>2+</sup> и Ni<sup>2+</sup>.

К группе эдафотипов были отнесены локальные популяции, отличающиеся стабильной устойчивостью к ТМ, не изменяющейся, не-

смотря на положительную или отрицательную динамику общего уровня загрязнения почвы биотопа (например, эдафотипы одуванчика как из слабозагрязненных местообитаний, так и с промплощадок г. Саранска, а также из незагрязненного биотопа в г. Сарове). Кроме того, в ряде местообитаний устойчивость к ТМ локальных популяций *Taraxacum officinale* изменялась вопреки динамике загрязнения почв отдельными ТМ, что наводит на мысль о формировании сопутствующей устойчивости растений к ТМ, а также о неоднозначной зависимости степени

адаптации локальных популяций от загрязнения почв ТМ.

### Заключение

Семнадцатилетний мониторинг локальных популяций из разных локаций в Мордовии и Нижегородской области позволил сделать вывод, что сформированные популяции *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. находятся на разных стадиях адаптации к ТМ – от экады (локальные популяции с нестабильными, динамичными уровнями

адаптации) до эдафотипа (локальные популяции со стабильным уровнем адаптации или уровнем адаптации, возрастающим вопреки изменениям суммарного загрязнения почв ТМ).

В большинстве исследованных локаций чем больше концентрации ТМ в почвах биотопа, тем выше толерантность популяции. Но все же корреляция индексов адаптации с загрязнением почв никелем и цинком теснее. И практически на всех исследованных площадках степень адаптации локальных популяций одуванчика к ионам  $Ni^{2+}$  и  $Zn^{2+}$  была выше, чем к  $Pb^{2+}$  и  $Cu^{2+}$ .

### Список литературы

1. Alloway B. J. Heavy metals and metalloids as micronutrients for plants and animals // Heavy Metals in Soils. Whiteknights : Springer, 2013. P. 195–209.
2. Чакраборти Р., Рой П. Микробная геномика как комплексный инструмент для создания биосенсоров на токсичные микроэлементы в окружающей среде // Микроэлементы в окружающей среде: биогеохимия, биотехнология и биоремедиация / под ред. М. Н. В. Прасада, К. С. Саджвана, Р. Найди ; пер. с англ. к.б.н. Д. И. Башмакова и д.б.н. А. С. Лукаткина. М. : Физматлит, 2009. С. 198–248.
3. Vandelight K. K., Nkongolo K. K., Mehes M., Beckett P. Genetic analysis of *Pinus banksiana* and *Pinus resinosa* populations from stressed sites contaminated with metals in Northern Ontario (Canada) // Journal of Chemical Ecology. 2011. Vol. 27. P. 369–380.
4. Ernst W. H. O. Evolution of metal tolerance in higher plants // For. Snow Landsc. Res. 2006. Vol. 80, № 3. P. 251–274.
5. Mehes-Smith M., Nkongolo K., Cholewa E. Coping Mechanisms of Plants to Metal Contaminated Soil // Environmental Change and Sustainability. Intech. 2013. Chapter 3. P. 53–90.
6. Жуйкова Т. В. Реакция ценопопуляций и травянистых сообществ на химическое загрязнение среды : автореф. дис. ... д-ра. биол. наук : 03.00.16. Екатеринбург, 2009. 40 с.
7. Позолотина В. Н., Антонова Е. В., Шималина Н. С. Адаптация *Plantago major* L. к длительному радиационному и химическому воздействию // Экология. 2016. № 1. С. 3–13.
8. Меркулов П. И., Ямашкин А. А., Масляев В. Н. Антропогенное воздействие на географическую оболочку : учеб. пособие. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1994. 116 с.
9. Буренков Э. К., Янин Е. П., Кижаккин С. А. [и др.] Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды г. Саранска. М. : ИМГРЭ, 1993. 115 с.
10. Город Рузаевка // Многоликая Мордовия. URL: [http://geo.mrsu.ru/\\_M\\_M\\_/q\\_%D0%F3%E7%E0%E5%E2%EA%E0.htm](http://geo.mrsu.ru/_M_M_/q_%D0%F3%E7%E0%E5%E2%EA%E0.htm) (дата обращения: 16.04.2022).
11. Первомайск. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Первомайск\\_\(Нижегородская\\_область\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Первомайск_(Нижегородская_область)) (дата обращения: 02.02.2022).
12. Саров. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Саров> (дата обращения: 18.05.2022).
13. Ермакова И. М. Одуванчик лекарственный // Биологическая флора Московской области / под ред. В. Н. Павлова, Т. А. Работнова, В. Н. Тихомирова. М. : Изд-во МГУ, 1990. Вып. 8. С. 210–230.
14. The Plant List. URL: <http://www.theplantlist.org/> (дата обращения: 08.06.2022).
15. Маевский П. Ф. Флора средней полосы Европейской части России. 11-е изд. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2014. 635 с.
16. Методика выполнения измерений массовой концентрации ТМ в биологических объектах на рентгенофлуорометре «Спектроскан». СПб., 1994. 23 с.
17. Башмаков Д. И. Экофизиологические аспекты металломики высших растений. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 309 с.
18. Лукаткин А. С., Башмаков Д. И., Шаркаева Э. Ш. [и др.]. Большой практикум по ботанике, физиологии и экологии растений / под общ. ред. А. С. Лукаткина. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 330 с.
19. Лукаткин А. С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2002. 208 с.
20. Maestri E., Marmiroli M., Visioli G., Marmiroli N. Metal tolerance and hyperaccumulation: costs and trade-offs between traits and environment // Environmental Experimental Botany. 2010. Vol. 68. P. 1–13.
21. Dobrzaniecka S., Nkongolo K. K., Michael P. [et al.]. Genetic Analysis of Black Spruce (*Picea mariana*) Populations from Dry and Wet Areas of a Metal-Contaminated Region in Ontario (Canada) // Water Air and Soil Pollution. 2011. Vol. 215. P. 117–125.
22. Vandelight K. K., Nkongolo K. K., Mehes M., Beckett P. Genetic analysis of *Pinus banksiana* and *Pinus resinosa* populations from stressed sites contaminated with metals in Northern Ontario (Canada) // Journal of Chemical Ecology. 2011. Vol. 27. P. 369–380.

23. Narendrula R., Nkongolo K. K., Beckett P., Spiers G. Total and bioavailable metals in two contrasting mining regions (Sudbury in Canada and Lubumbashi in DR-Congo): relation to genetic variation in plant populations // *Chemistry and Ecology*. 2012. Vol. 29. P. 111–127.
24. Nkongolo K. K., Narendrula R., Mehes-smith M. [et al.]. Genetic Sustainability of fragmented conifer populations from stressed areas in Northern Ontario (Canada): Application of molecular markers // *Forest Ecosystems More than just trees* / J. A. Blanco, Y.-H. Lo. Intech Open, 2012. P. 315–336.
25. Cox R. M., Hutchinson T. C. Multiple metal tolerances in the growth *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. from the Sudbury smelting area // *New Phytol.* 1980. Vol. 84, № 4. P. 631–647.

## References

1. Alloway B.J. Heavy metals and metalloids as micronutrients for plants and animals. *Heavy Metals in Soils*. Whiteknights: Springer, 2013:195–209.
2. Chakraborti R., Roy P. Microbial genomics as a comprehensive tool for creating biosensors for toxic trace elements in the environment. *Mikroelementy v okruzhayushchey srede: biogeokhimiya, biotekhnologiya i bioremediatsiya* = Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology and bioremediation. Moscow: Fizmatlit, 2009:198–248. (In Russ.)
3. Vandeligt K.K., Nkongolo K.K., Mehes M., Beckett P. Genetic analysis of *Pinus banksiana* and *Pinus resinosa* populations from stressed sites contaminated with metals in Northern Ontario (Canada). *Journal of Chemical Ecology*. 2011;27:369–380.
4. Ernst W.H.O. Evolution of metal tolerance in higher plants. *For. Snow Landsc. Res.* 2006;80(3):251–274.
5. Mehes-Smith M., Nkongolo K., Cholewa E. Coping Mechanisms of Plants to Metal Contaminated Soil. *Environmental Change and Sustainability*. Intech. 2013;(chap.3):53–90.
6. Zhuykova T.V. *Reaktsiya tsenopopulyatsiy i travyanistykh soobshchestv na khimicheskoe zagryaznenie sredy* = Response of cenopopulation and herbaceous communities to chemical pollution of the environment. DSc abstract. Ekaterinburg, 2009:40. (In Russ.)
7. Pozolotina V.N., Antonova E.V., Shimalina N.S. Major L. Plantago's adaptation to long-term radiation and chemical exposure. *Ekologiya* = Ecology. 2016;(1):3–13. (In Russ.)
8. Merkulov P.I., Yamashkin A.A., Maslyaev V.N. *Antropogennoe vozdeystvie na geograficheskuyu obolochku: ucheb. posobie* = Anthropogenic impact on the geographic shell: study guide. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 1994:116. (In Russ.)
9. Burenkov E.K., Yanin E.P., Kizhupkin S.A. [et al.] *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka sostoyaniya okruzhayushchey sredy g. Saranska* = Ecological and geochemical assessment of the state of the environment in Saransk. Moscow: IMGRE, 1993:115. (In Russ.)
10. The town of Ruzaevka. *Mnogolikaya Mordoviya* = Many faces of Mordovia. Available at: [http://geo.mrsu.ru/\\_M\\_M\\_/q\\_%D0%F3%E7%E0% E5%E2%EA%E0.htm](http://geo.mrsu.ru/_M_M_/q_%D0%F3%E7%E0% E5%E2%EA%E0.htm) (accessed 16.04.2022). (In Russ.)
11. *Pervomaysk*. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Pervomaysk\\_\(Nizhegorodskaya\\_oblast'\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Pervomaysk_(Nizhegorodskaya_oblast')) (accessed 02.02.2022). (In Russ.)
12. *Sarov*. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Sarov> (accessed 18.05.2022). (In Russ.)
13. Ermakova I.M. Dandelion officinalis. *Biologicheskaya flora Moskovskoy oblasti* = Biological flora of the Moscow region. Moscow: Izd-vo MGU, 1990;(8):210–230. (In Russ.)
14. *The Plant List*. Available at: <http://www.theplantlist.org/> (accessed 08.06.2022).
15. Maevskiy P.F. *Flora sredney polosy Evropeyskoy chasti Rossii. 11-e izd.* = Flora of the middle zone of the European part of Russia. 11th ed.. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014:635. (In Russ.)
16. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii TM v biologicheskikh ob"ektakh na rentgenofluorometre «Spektroskan»* = Method for measuring the mass concentration of HM in biological objects on the X-ray fluorometer "Spektroskan". Saint Petersburg, 1994:23. (In Russ.)
17. Bashmakov D.I. *Ekofiziologicheskie aspekty metallomiki vysshikh rasteniy* = Ecophysiological Aspects of Metalomics of Higher Plants. LAP Lambert Academic Publishing, 2012:309. (In Russ.)
18. Lukatkin A.S., Bashmakov D.I., Sharkaeva E.Sh. [et al.]. *Bol'shoy praktikum po botanike, fiziologii i ekologii rasteniy* = Big workshop on botany, physiology and ecology of plants. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2015:330. (In Russ.)
19. Lukatkin A.S. *Kholodovoe povrezhdenie teplolyubivyykh rasteniy i okislitel'nyy stress* = Cold damage to heat-loving plants and oxidative stress. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2002:208. (In Russ.)
20. Maestri E., Marmiroli M., Visioli G., Marmiroli N. Metal tolerance and hyperaccumulation: costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental Experimental Botany*. 2010;68:1–13.
21. Dobrzeniecka S., Nkongolo K.K., Michael P. [et al.]. Genetic Analysis of Black Spruce (*Picea mariana*) Populations from Dry and Wet Areas of a Metal-Contaminated Region in Ontario (Canada). *Water Air and Soil Pollution*. 2011;215:117–125.
22. Vandeligt K.K., Nkongolo K.K., Mehes M., Beckett P. Genetic analysis of *Pinus banksiana* and *Pinus resinosa* populations from stressed sites contaminated with metals in Northern Ontario (Canada). *Journal of Chemical Ecology*. 2011;27:369–380.



23. Narendrula R., Nkongolo K.K., Beckett P., Spiers G. Total and bioavailable metals in two contrasting mining regions (Sudbury in Canada and Lubumbashi in DR-Congo): relation to genetic variation in plant populations. *Chemistry and Ecology*. 2012;29:111–127.
24. Nkongolo K.K., Narendrula R., Mehes-smith M. [et al.]. Genetic Sustainability of fragmented conifer populations from stressed areas in Northern Ontario (Canada): Application of molecular markers. *Forest Ecosystems More than just trees*. Intech Open, 2012:315–336.
25. Cox R.M., Hutchinson T.C. Multiple metal tolerances in the growth *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. from the Sudbury smelting area. *New Phytol.* 1980;84(4):631–647.