

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА ПРОЦЕСС ВЕГЕТАЦИИ ТОПИНАМБУРА

Григорьев А.А.<sup>1</sup>, Бородихин А.С.<sup>1</sup>, Руденко О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ «Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», Россия (350072, г. Краснодар, Тополиная аллея, д. 2), e-mail: angrig05@mail.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия (350072 г. Краснодар, ул. Московская, д. 2), e-mail: olga\_ned@mail.ru

---

Исследуется один из перспективных методов восстановления земель, загрязненных тяжелыми металлами - фиторемедиация, т.е. выращивание культур, склонных к аккумуляции ТМ в корнях и надземной части растений. Приведены результаты регрессионного анализа экспериментальных данных о зависимости физических характеристик топинамбура, выращенного в целях фиторемедиации, от содержания в почве свинца, кадмия, ртути, мышьяка. Предложены зависимости высоты побегов к концу периода вегетации, биомассы надземной части и клубней топинамбура от начального загрязнения почвы указанными тяжёлыми металлами. Получены статистически надежные математические модели, описывающие тесноту связи между содержанием в почве свинца, кадмия, мышьяка и физическими характеристиками топинамбура в конце вегетации.

---

Ключевые слова: тяжелые металлы, топинамбур, биомасса, регрессионный анализ.

## ASSESSMENT OF INFLUENCE OF EXTENT OF POLLUTION OF THE SOIL HEAVY METALS ON PROCESS OF VEGETATION OF THE GIRASOL

Grigoriev A.A.<sup>1</sup>, Borodikhin A.A.<sup>1</sup>, Rudenko O.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FGBMU "Krasnodar Research Institute of Storage and Processing of Agricultural Production", Krasnodar, Russia (350072, Krasnodar, Topolinaya Avenue, 2), e-mail: angrig05@mail.ru

<sup>2</sup>FGBOU VPO "Kuban State Technological University", Krasnodar, Russia (350072, Krasnodar, Moskovskaya St., 2), e-mail: olga\_ned@mail.ru

---

One of perspective methods of restoration of the lands polluted by heavy metals - a fitoremediation, i.e. cultivation of the cultures inclined to accumulation of TM in roots and elevated part of plants is investigated. Results of the regression analysis of experimental data about dependence of physical characteristics of the girasol which is grown up for a fitoremediation on the contents are given in the soil of lead, cadmium, mercury, arsenic. Dependences of height of escapes by the end of the period of vegetation, biomass of elevated part and tubers of a girasol from initial pollution of the soil are offered by the specified heavy metals. Statistically reliable mathematical models describing narrowness of communication between the contents in the soil of lead, cadmium, arsenic and physical characteristics of a girasol at the end of vegetation are received.

---

Keywords: heavy metals, artichoke, biological mass, regression analysis.

Одной из ключевых современных проблем является антропогенное загрязнение окружающей среды. В ряду многочисленных загрязнителей особое место занимают тяжелые металлы (ТМ), которые при высоких концентрациях оказывают токсичное действие практически на все живые организмы. Сельскохозяйственная продукция, выращенная на землях, загрязненных свинцом, кадмием, ртутью, мышьяком, вследствие их транслокации из почвы в растение может содержать эти химические элементы в концентрациях, превышающих предельно допустимые. В этом случае сельхозпродукция перестает быть пригодной для использования на пищевые и кормовые цели. Загрязнение почв тяжелыми металлами характерно практически для всех промышленно развитых районов России. Тяжелыми металлами загрязнено около 3,6 млн га сельскохозяйственных угодий [6].

Одним из перспективных методов восстановления земель, загрязненных тяжелыми металлами, считается фиторемедиация, т.е. выращивание культур, склонных к аккумуляции ТМ в корнях и надземной части растений. К такой культуре можно отнести топинамбур, который обладает всеми необходимыми свойствами фитоаккумулятора [1-4]. Важным моментом является то, что эта сельскохозяйственная культура имеет достаточно развитую надземную и подземную биомассу.

При проведении экспериментальных работ было отмечено визуально значимое влияние содержания тяжелых металлов в почве на процесс вегетации топинамбура, что позволяет предположить зависимость процесса фиторемедиации почвы топинамбуром от степени ее загрязнения тяжелыми металлами, и связано это может быть с угнетением развития растения. В предлагаемой вниманию статье приведены результаты регрессионного анализа экспериментальных данных с целью выявления зависимости физических характеристик топинамбура, выращенного в целях фиторемедиации, от содержания в почве свинца, кадмия, ртути, мышьяка. Приведены уравнения регрессии, описывающие зависимость высоты побегов к концу периода вегетации, биомассы надземной части и клубней топинамбура от начального загрязнения почвы указанными тяжёлыми металлами.

#### **Объекты и методы исследований**

Для проведения эксперимента был выбран раннеспелый топинамбур (лат. *Heliánthus tuberosus*) - вид клубненосных растений рода Подсолнечник семейства Астровые (*Asteraceae*). Работа была выполнена на базе ФГБНУ «КНИИХП» в 2013 году на участках различной степени загрязнения тяжелыми металлами. Агротехнические приемы для выращивания топинамбура, а также методики качественного и количественного определения состояния почв экспериментальных участков и степени загрязнения топинамбура описаны в работе [4].

Планировался эксперимент для идентификации множественной линейной регрессионной модели ( $1 \leq i \leq 5$ ) [8-9]:  $y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$ , (1)

где исходные данные нормированы в диапазон от 0 до 1, в частности безразмерные факторы-

$$\text{аргументы (табл. 1-2): } x_1 = \frac{Pb - 4,03}{123,97}, x_2 = \frac{Hg - 0,02}{8,38}, x_3 = \frac{Cd - 0,12}{3,88}, x_4 = \frac{As - 0,08}{7,92} \quad (2)$$

и безразмерные зависимые переменные («выход» или «отклик», табл. 1-2):

$$y_1 = \frac{H - 158}{41}, y_2 = \frac{Mc - 10,42}{6,69}, y_3 = \frac{M - 1,8}{2,1}, y_4 = \frac{Mk - 2,29}{3,5}, y_5 = \frac{S - 4,76}{5,6} \quad (3)$$

Результатом проведения эксперимента (табл. 1) являются данные о содержании тяжелых металлов в почве (расчетная величина) и физические характеристики топинамбура в завершающей фазе вегетации. Поскольку факторные переменные и отклик в модели

регрессии будут иметь различные единицы измерения, то необходимо провести предварительную обработку данных, позволяющую исключить влияние на результаты анализа величин измерения.

**Таблица 1**

Экспериментальные данные

№ варианта	Содержание ТМ в почве мг/кг				Н, см; у <sub>1</sub>	Мс, г; у <sub>2</sub>	М, кг; у <sub>3</sub>	Мк, кг; у <sub>4</sub>	S, кг; у <sub>5</sub>
	Pb, x <sub>1</sub>	Hg, x <sub>2</sub>	Cd, x <sub>3</sub>	As, x <sub>4</sub>					
Контроль	4,03	0,02	0,12	0,08	198	16,09	2,6	5,07	7,67
1	32	4,2	3,0	8,0	196	17,11	3,8	5,73	9,53
2	64	2,1	4,0	6,0	199	15,63	3,9	6,46	10,36
3	96	8,4	1,0	4,0	180	13,28	2,6	3,92	6,52
4	128	6,3	2,0	2,0	158	10,42	1,8	2,96	4,76

В данной работе применялось приведение полученных данных к единичному масштабу путем нормировки каждой переменной на диапазон разброса ее значений (табл. 2):

$$Y_i = \frac{X_i - \min_i}{\max_i - \min_i}, \quad (4)$$

где  $X_i$  – исходные значения  $i$ -го ( $1 \leq i \leq 5$ ) вектора признака;  $Y_i$  – безразмерные значения признака от 0 до 1;  $\max_i$ ,  $\min_i$  – максимальные и минимальные исходные значения признака.

**Таблица 2**

Нормированные экспериментальные данные

№ варианта	Содержание ТМ в почве, мг/кг				Н, см; у <sub>1</sub>	Мс, г; у <sub>2</sub>	М, кг; у <sub>3</sub>	Мк, кг; у <sub>4</sub>	S, кг; у <sub>5</sub>
	Pb, x <sub>1</sub>	Hg, x <sub>2</sub>	Cd, x <sub>3</sub>	As, x <sub>4</sub>					
Контроль	-	-	-	-	0,975	0,847	0,380	0,602	0,519
1	0,225	0,498	0,742	1	0,926	1	0,952	0,791	0,851
2	0,483	0,248	1	0,747	1	0,778	1	1	1
3	0,741	1	0,226	0,494	0,536	0,427	0,380	0,274	0,314
4	1	0,749	0,484	0,242	0	0	0	0	0

$H$  – средняя высота растений,  $Mс$  – средняя масса одного клубня,  $M$  – масса надземной части растений,  $Mк$  – масса клубней,  $S=M+Mк$  – суммарная биомасса растений.

Концентрации элементов в почве была выбрана для оценки влияния на вегетацию растения каждого элемента в отдельности их сочетаний. Следует отметить, что при окончательной постановке эксперимента допущена сильная парная корреляция между вносимыми концентрациями свинец-ртуть, кадмий-мышьяк, что изначально снижает значимость получаемых регрессионных соотношений. Планировалось применение моделей типа ridge-регрессии.

**Результаты математической обработки экспериментальных данных**

Линейный множественный регрессионный анализ данных таблицы 2 в пакете Statistica v.10 (StatSoft Inc., USA) показал, что часть параметров регрессии (1) практически нулевые, т.е. часть факторов-аргументов из вектора  $x=\{Pb, Hg, Cd, As\}$  не оказывает влияния на выход – координаты вектора  $y=\{H, Mc, M, Mk, S=M+Mk\}$ . Поэтому были применены модели ridge-регрессии и метода пошагового включения линейного регрессионного анализа. Применение модели ridge-регрессии при  $\lambda$ -параметре  $10^{-3}$  дало следующие безразмерные соотношения, интерполирующие данные таблицы 2:

$$y_1 = 0,975 - 0,714x_1 - 0,261x_2 - 0,029x_3 + 0,416x_4 \quad (5)$$

$$y_2 = 0,847 - 0,771x_1 - 0,135x_2 - 0,105x_3 + 0,523x_4 \quad (6)$$

$$y_3 = 0,389 - 0,421x_1 - 0,151x_2 + 0,311x_3 + 0,570x_4 \quad (7)$$

$$y_4 = 0,603 - 0,440x_1 - 0,373x_2 + 0,309x_3 + 0,365x_4 \quad (8)$$

$$y_5 = 0,520 - 0,414x_1 - 0,280x_2 + 0,301x_3 + 0,426x_4 \quad (9)$$

с индексами корреляции соответственно  $R=0,93$ ;  $R=0,99$ ;  $R=0,94$ ;  $R=0,95$ . Увеличение  $\lambda$ -параметра ridge-регрессии приводит к значительным, вплоть до смены знака, изменениям величин параметров регрессий (5)-(9), что свидетельствует о низкой статистической значимости полученных уравнений.

С такими же индексами корреляции, но более статистически значимые безразмерные соотношения даёт метод пошагового включения переменных, заключающийся в выборе из всего возможного набора факторных переменных именно тех, которые оказывают существенное влияние на результативную переменную. Использование этого метода позволило получить следующие статистически значимые регрессионные уравнения:

- для средней высоты растений:

$$y_1 = 1,003 - 0,995x_1 + 0,352x_3 \quad (10)$$

с индексом корреляции  $R=0,93$ ; уровнем значимости по критерию Фишера  $p_F < 0,13$  и уровнями значимости параметров модели по критерию Стьюдента соответственно  $p_{a0}=0,04$ ;  $p_{a1}=0,07$  и  $p_{a3}=0,34$ ;

- для средней массы одного клубня:

$$y_2 = 0,916 - 0,966x_1 + 0,343x_3 \quad (11)$$

$R=0,96$ ;  $p_F < 0,067$  и  $p_{a0}=0,02$ ;  $p_{a1}=0,03$  и  $p_{a3}=0,2$ ;

- для надземной части растений:

$$y_3 = 0,467 - 0,685x_1 + 0,838x_3 \quad (12)$$

$R=0,93$ ;  $p_F < 0,13$  и  $p_{a0}=0,15$ ;  $p_{a1}=0,13$  и  $p_{a3}=0,09$ ;

- для общей массы клубней:

$$y_4 = 0,601 - 0,805x_1 + 0,665x_3 \quad (13)$$

$R=0,95$ ;  $p_F < 0,09$  и  $p_{a0}=0,06$ ;  $p_{a1}=0,06$  и  $p_{a3}=0,09$ ;

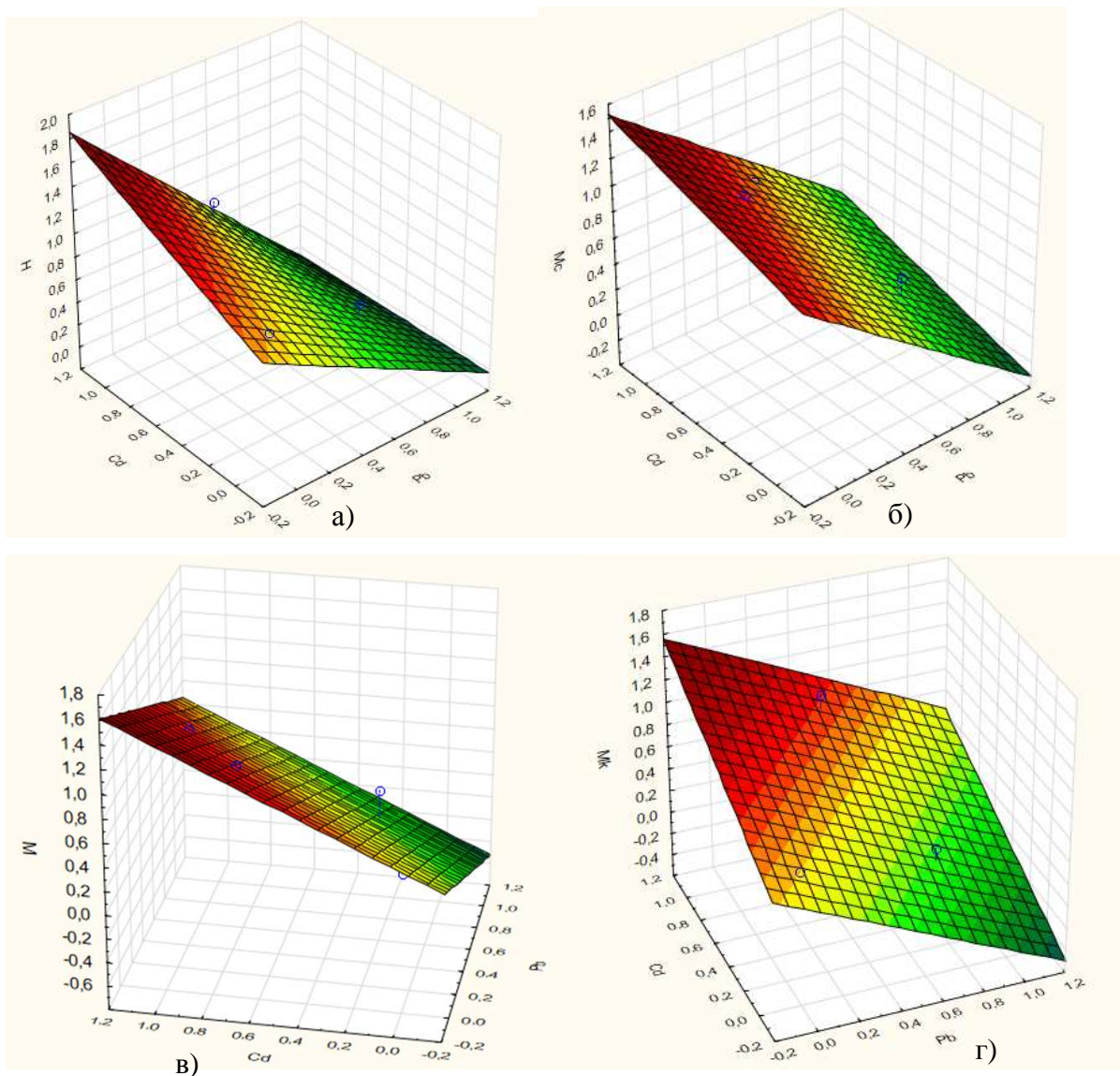
- для суммарной биомассы растений:

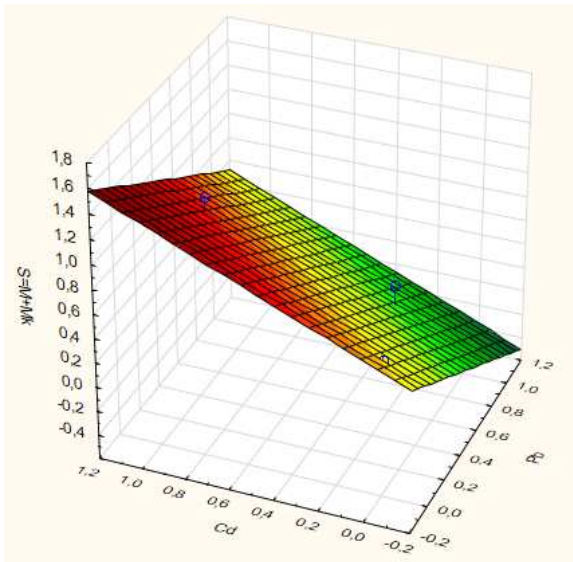
$$y_5 = 0,551 - 0,760 \cdot x_1 + 0,730 \cdot x_3 \quad (14)$$

$R = 0,95$ ;  $p_F < 0,09$  и  $p_{a0} = 0,07$ ;  $p_{a1} = 0,07$  и  $p_{a3} = 0,08$ .

Геометрическое представление полученных уравнений регрессии в виде поверхностных откликов приведено на рис. 1.

Очевидно, что присутствие в почве свинца и кадмия по-разному влияет на процесс вегетации топинамбура.





д)

Рис. 1. Поверхности отклика (10)-(14) от загрязнений Pb и Cd, полученные методом пошагового включения: а) - для  $y_1=N$ =средняя высота растений; б) -  $y_2=M_c$ =средняя масса одного клубня; в) -  $y_3=M$ =масса надземной части растений; г) -  $y_4=M_k$ =масса клубней; д) -  $y_5=S=M+M_k$ =суммарная биомасса растений

Увеличение в почве концентрации свинца оказывает угнетающее действие на все наблюдаемые физические параметры растения: высоту побегов и массу надземной части, среднюю и общую массу клубней, а также общую биомассу растения в конце вегетационного периода. Полученные результаты согласуются с литературными данными [5]. Кроме кадмия, обнаружено стимулирующее действие на массу надземной части растения мышьяка, что подтверждается моделью, представленной ниже.

$$y_3 = 0,508 - 0,5x_1 + 0,798x_3 + x_4, \quad (15)$$

с индексом корреляции  $R=0,956$  и уровнями значимости параметров модели по критерию Стьюдента соответственно  $p_{a0}=0,087$ ;  $p_{a1}=0,14$  и  $p_{a3}=0,07$ . Надежной корреляционной зависимости физических параметров надземной части, клубней и общей биомассы топинамбура в конце вегетационного периода от содержания в почве ртути в концентрациях эксперимента не установлено.

### Выводы

1. В интервале концентраций, принятых в эксперименте, увеличение в почве количества свинца привело к угнетению, а увеличение содержания кадмия и мышьяка – к стимулированию развития топинамбура. Достоверного влияния содержания в почве ртути на физические характеристики топинамбура в конце вегетационного периода не установлено.
2. Получены статистически надежные математические модели, описывающие тесноту связи между содержанием в почве свинца, кадмия, мышьяка и физическими характеристиками топинамбура в конце вегетации.

3. Очевидно, что фиторемедиационные свойства топинамбура на землях, загрязненных свинцом, будут снижаться с увеличением концентрации тяжелого элемента вследствие его угнетающего действия на развитие и, как следствие, произойдет уменьшение общей биомассы растения.

### Список литературы

1. Гилева Ю.А., Ковалева Л.В., Леонович Н.А., Пирогова С.Ю., Гончарова Н.Н., Недвецкая Г.Б. Распределение тяжелых металлов в топинамбура, выращенном на загрязненных почвах // Вестник Иркутского университета. Спец. вып. : материалы ежегод. науч.- теорет. конф. молодых ученых. - Иркутск, 2001. - С. 184.
2. Григорьев А.А., Руденко О.В., Сова Ю.А. О проблемах имитационного моделирования фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами : матер. 2-й Междунар. научно-практич. конф. «Технические науки – основа современной инновационной системы» (25 марта 2013 г.). – Йошкар-Ола : Коллоквиум, 2013. – С. 83-86.
3. Григорьев А.А., Руденко О.В., Сова Ю.А., Бородихин А.С. Применение нейронных сетей для решения задач прогнозирования поглощения тяжелых металлов растениями : матер. 3-й Междунар. научно-практич. конф., посвящ. 20-летнему юбилею ГНУ «КНИИХП» Россельхозакадемии «Инновационные пищевые технологии в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья» (23-24 мая 2013 г.). – Краснодар : КНИИХПСП, 2013. – С. 259-263.
4. Григорьев А.А., Бородихин А.С., Руденко О.В., Сова Ю.А. Постановка эксперимента по идентификации модели гипераккумуляции тяжелых металлов топинамбуром при фиторемедиации почв // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. - URL: [www.science-education.ru/113-10923](http://www.science-education.ru/113-10923).
5. Казнина Н.М. Влияние свинца и кадмия на рост, развитие и некоторые другие физиологические процессы однолетних злаков (ранние этапы онтогенеза) : дисс. к.б.н. / Карельский научный центр Российской академии наук, Институт биологии. - Петрозаводск, 2003. - 143 с.
6. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Минсельхоз РФ, Россельхозакадемия. - М., 2008. - 69 с.

**Рецензенты:**

Усатиков С.В., д.ф.-м.н., профессор ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар;

Величко С.В., д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар.