

Научная статья

УДК 631.41

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-272-282>

EDN: FILZTN



Оценивание распределения вещества в системе почва–растение (на примере агрокультур)

Л.И. Белых✉, С.С. Тимофеева

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Информативное оценивание распределения биогенных и загрязняющих веществ в системе почва–растение является теоретической и прикладной задачей в биогеохимии, агрохимии, экологической биотехнологии. Точечные, средние и экстремальные значения концентраций вещества в растении (C_p) и в почве (C_s), коэффициенты биологического поглощения ($K_{ab}=C_p/C_s$) не характеризуют особенности распределения вещества в системе. Цель работы – изучение влияния концентрации в почве вещества на распределение его между растением и почвой. С помощью описания содержания в растении вещества от его концентрации в почве функциями $C_p=f(C_s)$, $K_{ab}=f(C_s)$ предложены методические подходы к количественному оцениванию процесса распределения. Первый подход – аппроксимация зависимостей по линейным или адсорбционным степенным функциям Фрейндлиха и Ленгмюра $C_p=f(C_s)$, из которых определяются концентрационные показатели вида a , 1K_p , K_p , C_∞ . С их помощью оцениваются механизм и интенсивность накопления вещества растением. Второй подход включает получение степенной функции $K_{ab}=f(C_s)$ или ее линеаризованной формы $\lg K_{ab}=f(\lg C_s)$ с расчетом из них стандартизированных коэффициентов K_{ab} – чувствительных при низких (1, 10) и предельных при высоких (100, 1000) концентрациях вещества в почве. На примере различных по физико-химическим и биологическим свойствам веществ – бенз(а)пирена, фтора и цинка – показано определение показателей для оценки абсолютного и относительного накопления веществ агрокультурами, проведены сравнения растений между собой, рассмотрены возможные механизмы распределения веществ и их интенсивность.

Ключевые слова: система почва–растение, агрокультура, распределение вещества, концентрационные показатели, стандартизированные коэффициенты поглощения

Для цитирования: Белых Л.И., Тимофеева С.С. Оценивание распределения вещества в системе почва–растение (на примере агрокультур) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 2. С. 272–282. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-272-282>. EDN: FILZTN.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Estimation of substance distribution in the soil-plant system (on the example of crop species)

Larisa I. Belykh✉, Svetlana S. Timofeeva

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Assessment of the distribution of nutrients and pollutants in the soil-plant system is a relevant theoretical and applied task in biogeochemistry, agrochemistry and environmental biotechnology. Pointwise, average and extreme values of the concentration of the studied substance in the plant (C_p) and in the soil (C_s), as well as biological absorption coefficients ($K_{ab}=C_p/C_s$), do not characterize the distribution of the studied substance in the system. This work investigates the effect of substance concentration in a soil on its distribution between the plant and the soil. The use of the $C_p=f(C_s)$ and $K_{ab}=f(C_s)$ functions for describing the substance content in the plant depending on its concentration in the soil, allowed us to propose approaches to quantitative assessment of the distribution process. The first approach consists in the approximation of dependences by Freundlich and Langmuir linear or adsorption power functions $C_p=f(C_s)$, on which basis the concentration parameters of a , 1K_p , K_p , C_∞ are determined. These parameters are used to study the mechanism and intensity of substance accumulation by a plant. The second approach includes obtaining a power function $K_{ab}=f(C_s)$ or its linear representation $\lg K_{ab}=f(\lg C_s)$ and calculating standardized coefficients K_{ab} . These coefficients are sensitive at low (1, 10) and limiting at high (100, 1000) concentrations of the studied substance in the soil. The example of benz(a)pyrene, fluorine and zinc, i.e., substances different in terms of their physical, chemical and biological properties, was applied to demonstrate the process of determining the absolute and relative accumulation of the substances by different crop species. A comparison of different plants was conducted; possible mechanisms of the distribution of the studied substances and their intensity are considered.

Keywords: Soil-plant system, crop species, substance distribution, concentration indices, standardized absorption coefficients

© Белых Л.И., Тимофеева С.С., 2023

For citation: Belykh L.I., Timofeeva S.S. Estimation of substance distribution in the soil-plant system (on the example of crop species). *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):272-282. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-272-282>. EDN: FILZTN.

ВВЕДЕНИЕ

Первичным звеном трофической цепи и основой функционирования биосферы является система среда обитания (почва, воздух, вода) – растение, которая участвует в биогеохимическом круговороте биогенных (питательных) и загрязняющих веществ [1–4]. Несмотря на многочисленные исследования, например, системы почва–растение [5–9], методология количественного оценивания в ней сложных процессов поглощения и накопления, превращения, биологической активности веществ недостаточно информативна. Хотя изучение закономерностей распределения в объектах системы вещества очень важно для установления механизма и интенсивности его накопления растением [10–15], для оценивания потенциала самоочищения почв от загрязнителей, сравнения растений и их органов между собой, сравнения поглощаемых соединений, данные оценки необходимы для решения теоретических и прикладных задач биогеохимии, геоботаники, агрохимии, почвоведения, физиологии растений, экологической биотехнологии.

Во многих работах [1, 2, 5, 16–20] проводятся исследования факторов, влияющих на распределение вещества между почвой и растением. Определяющим фактором выделяют концентрацию вещества в почве, особенно в условиях загрязнения биосферы. Для количественного оценивания распределения вещества в системе почва–растение, как правило, применяются точечные, средние, экстремальные значения содержания вещества в сопряженных почве (C_p) и растении (C_r). Часто используют коэффициенты биологического поглощения ($K_6 = C_r/C_p$) и их экстремумы. Эти соответственно абсолютные и относительные показатели имеют высокие коэффициенты вариации и не точны для понимания механизма распределения вещества, для проведения сравнительных оценок.

Целью работы было изучение влияния концентрации в почве вещества на распределение его между растением и почвой, моделирование и количественное оценивание этого процесса по показателям, учитывающим концентрации вещества в объектах системы почва–растение.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования были почвы верхнего слоя (0–10, 10–20, 20–30 см) и произрастающие на них агрокультуры, отобранные на территории Южного Прибайкалья различной степени техногенной нагрузки. После общепринятой для почв и растений подготовки проб, измельчения и просеивания через сито Ø 0,25 мм в образцах определяли бенз(а)пирен (Б(а)П), элементы фтора (F) и цинк (Zn), которые различаются по физико-химическим, биологическим свойствам и имеют как биогенное, так и антропогенное происхождение.

Выделение из почв и растений Б(а)П проводили путем ультразвуковой экстракции смесью н-гексан:хлороформ (1:1). Методом тонкослойной хроматографии на незакрепленном слое оксида алюминия очищали экстракт. После определяли Б(а)П с помощью низкотемпературной люминесценции, измеряя интенсивности квазилинейчатых спектров при температуре кипения жидкого азота на флуоресцентном спектрофотометре Hitachi 650-10S (Hitachi High-Tech Science Corporation, Япония) способом добавок стандартных растворов, приготовленных на основе ГСО 7515 (Россия) по аттестованным методикам^{1,2}. Валовые содержания элементов фтора F и цинка Zn определяли соответственно ионселективным методом с помощью фторид электрода ЭЛИТ-221 (НПК «НИКО АНАЛИТ», Россия) и рентгенофлуоресцентным методом анализа на спектрометре VRA-30 (Carl Zeiss AG, Германия). Концентрации веществ выражали на воздушно-сухую массу объекта.

Погрешность определения при доверительной вероятности $P = 95\%$ составляла у Б(а)П от 50 до 12% для диапазона концентраций 0,5–2500 мкг/кг, у элемента F – от 30 до 20% для диапазона концентраций 1–30 мг/кг, у элемента Zn составляла 15,6% для всего исследуемого диапазона концентраций. Пределы обнаружения Б(а)П, фтора и цинка соответствовали 0,05; 0,75 и 1 мг/кг.

Экспериментально полученные и литературные данные [1, 21–25] определения веществ в растении и почве аппроксимировали функциями, моделирующими адсорбционные процессы по уравнениям Фрейндлиха и Ленгмюра, и степенными функциями, полученными в Excel. Из функций определяли параметры.

Статистическую значимость линейных функций оценивали с помощью коэффициента корреляции (r_{xy}) для числа степеней свободы $f = n - 2$, где n – количество проб и уровня значимости – α по стандартным Excel программам. Значимость коэффициентов r_{xy} определяли по табличным значениям двустороннего критерия при заданных α и f . По программе Excel проводили достоверную аппроксимацию степенных функций $C_p = f(C_r)$, $K_6 = f(C_r)$, из которых находили концентрационные параметры и стандартизированные коэффициенты K_6 .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По функциям $C_p = f(C_r)$ и $K_6 = f(C_r)$ изучали закономерности соответственно абсолютного и относительного концентрационного распределения вещества в системе почва–растение.

Концентрационные (абсолютные) показатели. На примере травосмеси, надземных и подземных органов агрокультур показано, что с увеличением в почве содержания вещества возрастает их накопление в растительных тканях с различной интенсивностью. Кривые со-

¹ Методика определения массовой концентрации бенз(а)пирена в пробах почв и донных отложений методом низкотемпературной люминесценции. Свидетельство об аттестации № 224.03.04.018/2008. Екатеринбург: ФГУП «УНИИМ».

² Методика определения массовой концентрации бенз(а)пирена в пробах растительных материалов методом низкотемпературной люминесценции. Свидетельство об аттестации № 224.11.04.019/2008. Екатеринбург: ФГУП «УНИИМ».

держания веществ в растениях (рис. 1–3, а) отличались разнообразием чаще с тенденцией снижения интенсивности накопления. В случае травосмеси, произрастающей на непахотных и пахотных загрязненных почвах, проявились соответственно вогнутая (увеличение C_p) и выпуклая (уменьшение C_p) степенные формы кривых (см. рис. 1, а). Зависимости уменьшения интенсивности накопления C_p отмечены для цинка и зерна пшеницы (см. рис. 2, а), а также для Б(а)П, фтора, цинка и клубней картофеля (см. рис. 3, а). Для некоторых частей растений зависимость накопления вещества линейная, например, для цинка и стеблей пшеницы (см. рис. 2, а).

Из рассмотренных примеров кривых можно качественно и количественно характеризовать механизм, например, интенсивного или предельного накопления растением вещества в зависимости от его содержания в почве. Показателями распределения вещества могут быть параметры формально аппроксимированных функций – линейных (1), параболических изотерм адсорбции Фрейндлиха (2) и Ленгмюра (3) в виде их линеаризованных форм:

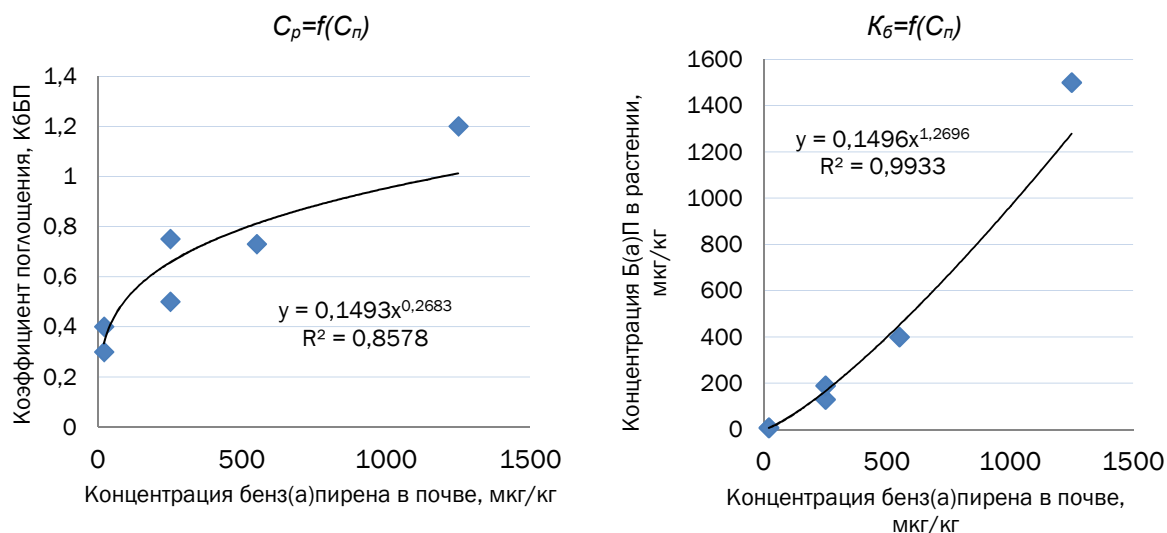
$$C_p = axC_n + b \quad (y = axX + b), \quad (1)$$

$$C_p = K_p x C_n^m \Rightarrow \lg C_p = m \lg C_n + \lg K_p (y = axX + b), \quad (2)$$

$$C_p = C_\infty x \frac{C_n}{\beta + C_n} \Rightarrow \frac{1}{C_p} = \left(\frac{\beta}{C_\infty} \right) x \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_\infty} (y = axX + b), \quad (3)$$

где C_p и C_n – концентрации вещества соответственно в растении и почве; a – тангенс угла наклона прямой, характеризующий интенсивность накопления растением вещества из почвы и соответствующий коэффициенту K_p ; b – отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат и показывающий концентрацию вещества в растении при $C_n = 0$; m – параметр, определяющий кривизну адсорбционной кривой, который в условиях $m < 1$ имеет выпуклую направленность параболы, а при $m > 1$ – вогнутую; соответствующие разным m параметры K_p и 1K_p показывают содержание в растении вещества при равновесной концентрации его в почве, равной единице ($C_n = 1$); β – параметр, равный отношению констант скоростей десорбции и адсорбции, т.е. равновесному процессу убыли и накопле-

Травосмесь на непахотной почве



Травосмесь на пахотной почве

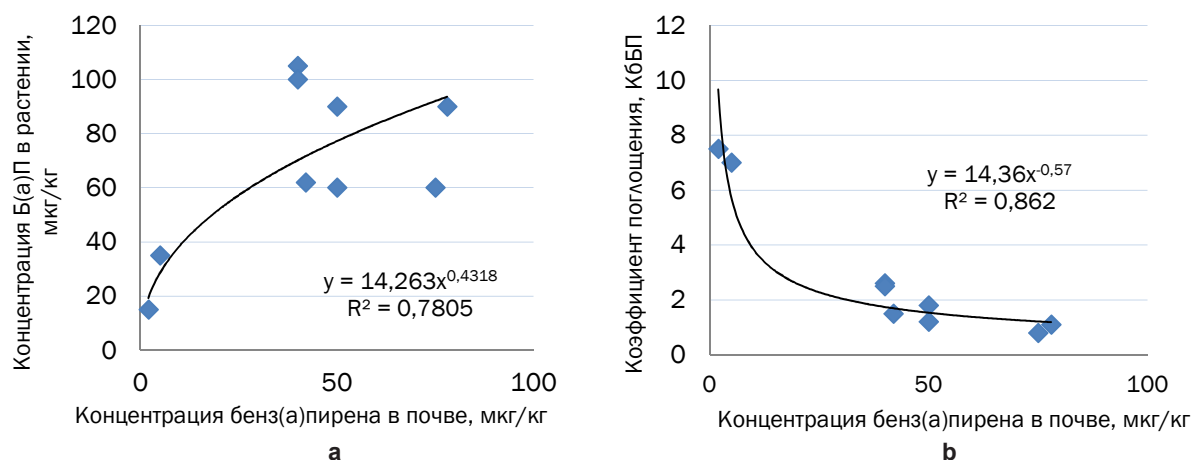


Рис. 1. Зависимости содержания (а) и коэффициентов биологического поглощения (б) травосмесью бенз(а)пирена от его концентрации в непахотной и пахотной почве

Fig. 1. Benzo(a)pyrene content (a) and grass mixture biological absorption coefficients (b) of benzo(a)pyrene versus its content in non-arable and arable soil

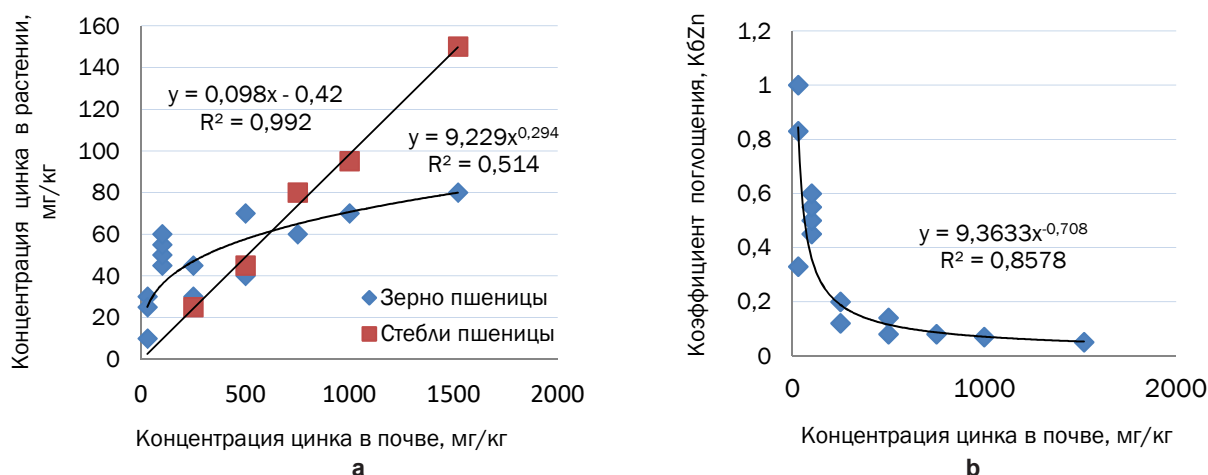


Рис. 2. Зависимости содержания (а) и коэффициентов биологического поглощения (б) зерном и стеблями пшеницы цинка от его концентрации в почве

Fig. 2. Zinc content (a) and zinc biological absorption coefficients (b) by wheat grain and stalks versus zinc concentration in soil

ния вещества растением; C_∞ – параметр, равный предельной концентрации вещества в растении при относительно больших концентрациях его в почве.

Параметры K_p , 1K_p , C_∞ , которые имеют размерность концентрации вещества в растении при определенных условиях, назвали *концентрационными показателями*. Параметр a , как и коэффициент K_p , безразмерный показатель.

Показатели рассчитывают из достоверно аппроксимированных степенных функций в Excel, представленных на рис. 1–3, а. Эти показатели можно также рассчитать из линеаризованных зависимостей $C_p = f(C_n)$ в логарифмическом виде (2) или в виде обратных величин (3) с оценкой их статистической значимости и погрешности. Применяя эти приемы обработки результатов для кривых накопления агрокультурами Б(а)П, фтора и цинка, получили статистически значимые функции, уравнения которых и их исходные данные приведены в табл. 1–3. Из линеаризованных уравнений рассчитали соответствующие концентрационные показатели, которые приведены в табл. 4–6. Следует отметить высокую сходимость значений показателей, полученных по степенным функциям в Excel и расчетным путем их линеаризации.

Анализ данных для травосмеси, произрастающей на непахотных загрязненных почвах, показал увеличение накопления Б(а)П, характеризующееся показателем 1K_p . Накопление Б(а)П по типу выпуклой адсорбционной кривой, характеризующей процесс показателем K_p , наблюдали для остальных исследуемых агрокультур. Следует отметить четко выраженную особенность уменьшения данного показателя в ряду от наземных органов растений (травосмесь, капуста) к подземным (клубни картофеля и корнеплоды свеклы). Концентрационные кривые для пшеницы и клубней картофеля на сильно загрязненных почвах описывались параболической функцией вида адсор-

бционной кривой Ленгмюра, которая количественно характеризуется показателем C_∞ – предельного накопления Б(а)П в растительных тканях. Данная предельная концентрация Б(а)П в зерне пшеницы по своему значению не превысила предельно допустимую концентрацию, принятую для зерновых и овощей³ – 1 мг/кг. Для клубней картофеля наблюдали два вида адсорбционных кривых: изотерма вида (2) для менее и изотерма вида (3) для более загрязненной почвы (см. табл. 1). Во втором случае имело место предельное накопление Б(а)П по показателю C_∞ (см. табл. 4). Предельное накопление Б(а)П несколько больше для зерна пшеницы, чем для клубней картофеля.

Накопление элемента фтора агрокультурами (см. табл. 5) характеризовалось показателями вида K_p и a . По показателю K_p накопление фтора больше в клубнях картофеля, чем в корнеплодах свеклы. Функция накопления в моркови была линейной.

Результаты накопления цинка в отдельных частях пшеницы и картофеля показали, что интенсивность распределения определяется показателями K_p и a , которые относились соответственно к репродуктивным и вегетативным органам агрокультур. Самое высокое значение K_p у цинка было для зерна пшеницы.

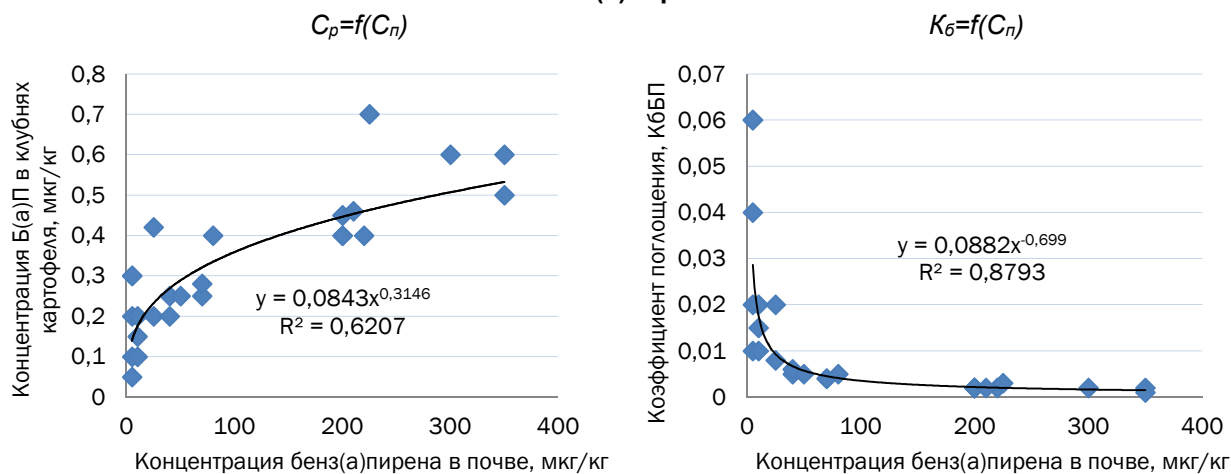
Накопление веществ корнеплодами моркови характеризовалось показателем a линейной зависимости (см. табл. 4–6) и давало следующий ряд уменьшения поступления: $Zn > F \gg B(a)P$.

Рассмотренные показатели 1K_p , K_p , C_∞ и a дают представление о возможном механизме и интенсивности накопления растением вещества с различным его содержанием в почве. Например, показатель C_∞ найден для репродуктивных органов, показатель a – вегетативных, а K_p указывает на промежуточное не очень интенсивное, но и не предельное состояние процесса накопления вещества в растении. Показатели позволяют давать более точные сравнительные

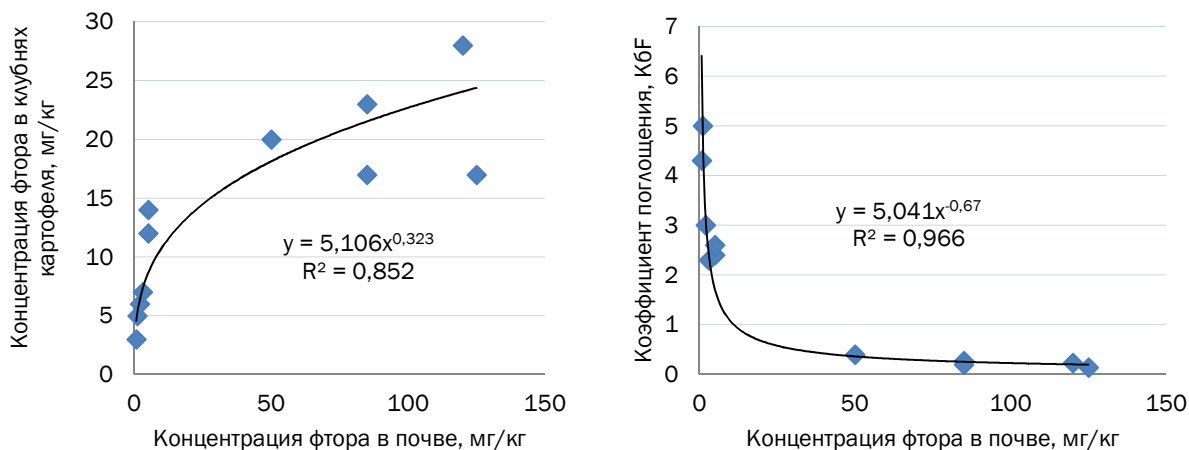
³СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

Клубни картофеля

Бенз(а)пирен



Фтор



Цинк

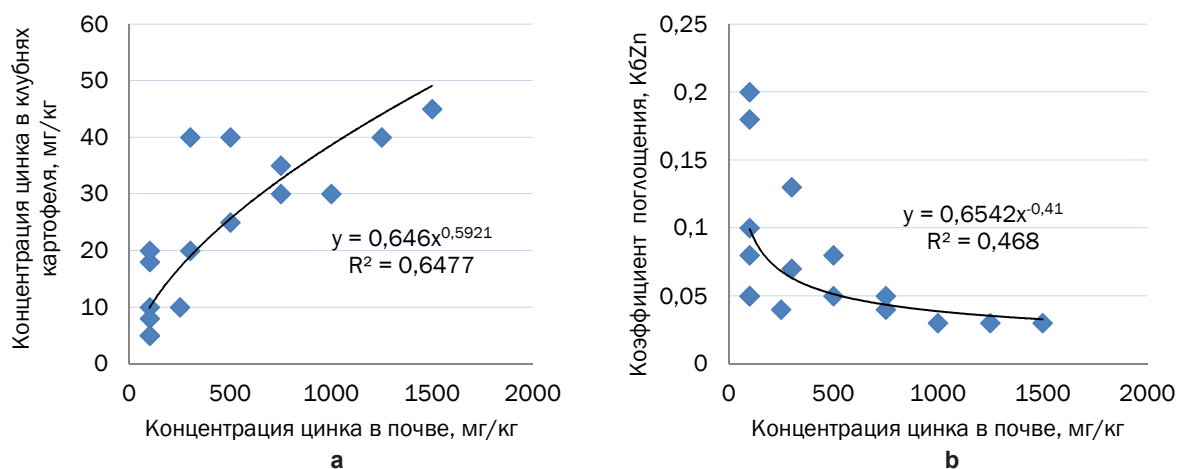


Рис. 3. Зависимости содержания (а) и коэффициентов биологического поглощения (б) клубнями картофеля бенз(а)пирена, фтора и цинка от их концентрации в почве

Fig. 3. Content (a) and coefficients of biological absorption (b) of benz(a)pyrene, fluorine and zinc by potato tubers versus their concentration in soil

Таблица 1. Содержание в растениях (C_p , мкг/кг), коэффициенты биологического поглощения ($K_{бп}$) бенз(а)пирена и их зависимости от его концентрации в почве (C_n , мкг/кг)
Table 1. Content in plants (C_p , μg/kg), biological absorption coefficients ($K_{бп}$) of benz(a)pyrene and their dependence on benz(a)pyrene concentration in soil (C_n , μg/kg)

Агрокультура	Переменные C_n , C_p и функции между ними			Переменные $K_{бп}$ и функции их от C_n	
	C_n	C_p	$C_p = f(C_n)$ (r_{xy} ; n – число проб; $\alpha = 0,05$)*	$K_{бп} = C_p / C_n$	$K_{бп} = f(C_n)$ (r_{xy} ; n – число проб; $\alpha = 0,05$)
Листья капусты [21]	20** (3,5–58)	0,10 (0,05–0,16)	$\lg C_p = (0,4 \pm 0,3) \times \lg C_n - (1,5 \pm 1,3)$ (+ 0,910; n=6)	0,007 (0,003–0,014)	$\lg K_{бп} = - (0,8 \pm 0,5) \times \lg C_n - (1,1 \pm 0,9)$ (– 0,952; n=6)
Пшеница [21, 22]	16 (2–66)	0,64 (0,4–1,0)	$1/C_p = (2,2 \pm 2,0) \times 1/C_n + (1,4 \pm 0,6)$ (+ 0,593; n=10; $\alpha = 0,10$)	0,11 (0,01–0,20)	$\lg K_{бп} = - (0,9 \pm 0,8) \times \lg C_n$ (– 0,948; n=9)
Клубни картофеля [21]	60 (1,2–220)	0,27 (0,05–0,70)	$\lg C_p = (0,3 \pm 0,1) \times \lg C_n - (1,0 \pm 0,2)$ (+ 0,720; n=24)	0,03 (0,003–0,13)	$\lg K_{бп} = - (0,7 \pm 0,3) \times \lg C_n - (1,0 \pm 0,5)$ (– 0,950; n=24)
Клубни картофеля [21]	70 (0,2–350)	0,20 (0,03–0,75)	$1/C_p = (4,6 \pm 3,5) \times C_n + (10 \pm 8)$ (+ 0,620; n=13)	0,02 (0,002–0,15)	$\lg K_{бп} = - (0,8 \pm 0,5) \times \lg C_n - (1,3 \pm 0,8)$ (– 0,925; n=13)
Корнеплоды свеклы [21]	22 (3,5–58)	0,11 (0,02–0,20)	$\lg C_p = (0,8 \pm 0,5) \times \lg C_n - (1,9 \pm 1,2)$ (+ 0,839; n=7)	0,006 (0,003–0,01)	$\lg K_{бп} = - (0,7 \pm 0,4) \times \lg C_n - (1,3 \pm 0,8)$ (– 0,909; n=7)

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3: * – коэффициент корреляции и уровень значимости ($<0,05$) для числа степеней свободы $f=n-2$, где n – число проб;

** – среднее арифметическое и диапазон значений (min – max).

Таблица 2. Содержание в растениях (C_p , мг/кг), коэффициенты биологического поглощения ($K_{бп}$) фтора и их зависимости от его концентрации в почве (C_n , мг/кг)

Table 2. Content in plants (C_p , mg/kg), biological absorption coefficients ($K_{бп}$) of fluorine and their dependence on fluorine concentration in soil (C_n , mg/kg)

Агрокультура	Переменные C_n , C_p и функции между ними			Переменные $K_{бп}$ и функции их от C_n	
	C_n	C_p	$C_p = f(C_n)$ (r_{xy} ; n – число проб; $\alpha = 0,05$)	$K_{бп} = C_p / C_n$	$K_{бп} = f(C_n)$ (r_{xy} ; n – число проб; $\alpha = 0,05$)
Зерно ячменя, овса, пшеницы [25]	19 (0,9–120)	4,4 (2,6–9,1)	статистически незначимо (н/з)	2,0 (0,02–6,8)	$\lg K_{бп} = - (0,9 \pm 0,6) \times \lg C_n + (0,6 \pm 0,5)$ (– 0,970; n=17)
Клубни картофеля [25]	38 (0,7–126)	15 (2,2–40)	$\lg C_p = (0,3 \pm 0,1) \times \lg C_n + (0,7 \pm 0,2)$ (+ 0,648; n=35)	2,6 (0,06–14)	$\lg K_{бп} = - (0,7 \pm 0,3) \times \lg C_n + (0,7 \pm 0,4)$ (– 0,867; n=35)
Корнеплоды свеклы [25]	42 (1–126)	15 (10–51)	$\lg C_p = (0,5 \pm 0,3) \times \lg C_n$ (+ 0,735; n=20)	0,8 (0,1–3,6)	$\lg K_{бп} = - (0,5 \pm 0,3) \times \lg C_n$ (– 0,629; n=20)
Корнеплоды моркови [25]	38 (1–104)	15 (1–50)	$C_p = (0,4 \pm 0,2) \times C_n$ (+ 0,873; n=17)	0,4	$K_{бп}$ – постоянные

оценки. Так, интенсивность накопления веществ в корнеплодах свеклы по показателям K_p снижается в ряду $Zn > F \gg B(a)P$. Выше приведены примеры сравнения растений.

Стандартизированные коэффициенты поглощения (относительные). Зависимости коэффициентов K_0 поглощения растениями $B(a)P$, фтора и цинка от их концентрации в почве представлены в виде кривых $K_0 = f(C_n)$ и их степенных функций (рис. 1–3, *b*), а также в виде линеаризованных форм $lg K_0 = f(lg C_n)$ (см. табл. 1–3).

В случае $B(a)P$ и травосмеси, произрастающей на непахотных, длительное время загрязняемых из атмосферы почвах, был «положительный» вид кривой, когда с увеличением концентрации вещества в почве значения K_{0BP} возрастали (см. рис. 1, *b* – непахотные почвы) и концентрационный показатель был вида 1K_p . В остальных случаях наблюдали «отрицательные» кривые, в которых коэффициенты K_{0BP} уменьшались до предельных значений $K_{0\infty}$ (см. рис. 1, *b* – пахотные почвы; рис. 2, *b*; 3 *b*). Линейные уравнения имели соответствующие знаки коэффициентов корреляции r_{xy} (см. табл. 1–3). «Отрицательные» зависимости указывают на механизмы уменьшения относительной интенсивности накопления вещества растением до минимальных предельных значений с увеличением концентрации вещества в почве. Зависимости коэффициентов K_0 от концентрации вещества в почве можно учесть путем стандартизации этих концентраций, например, целочисленными значениями: 1 (K_{01}); 10 (K_{010}); 100 (K_{0100}); 1000 (K_{01000}), соответствующими диапазону концентраций расчетной функции $lg K_0 = f(lg C_n)$. Из этих или степенных функций (см. рис. 1–3, *b*) рассчитаны стандартизированные коэффициенты K_0 для $B(a)P$, фтора и цинка (см. табл. 4–6).

Более чувствительными для оценивания распределения вещества в системе почва–растение являются стандартизированные показатели вида K_{01} , K_{010} , которые показывают максимальные изменения интенсивности поглощения (накопления) растениями вещества при его низких концентрациях в почве. При этом коэффициент K_{01} совпадает с концентрационным показателем K_p , т.е. $K_{01} = K_p$ или 1K_p . Для исследуемых веществ и растений данные показатели различались в пределах погрешностей их определения (см. табл. 4–6). Коэффициенты для больших концентраций вещества в почве вида K_{0100} , K_{01000} , обозначенные как $K_{0\infty}$, показывают относительные минимальные предельные накопления вещества в растении.

Для сравнительных оценок используются стандартизированные коэффициенты K_0 одного типа. Чувствительные K_{0BP} , K_{0F} , K_{0Zn} дали следующие ряды по интенсивности поглощения веществ: для зерна зерновых – $Zn > F > B(a)P$, для клубнеплодов – $F > Zn \gg B(a)P$. Предельные коэффициенты $K_{0\infty}$ менее пригодны для сравнительных оценок. Однако они показывают максимально возможную степень накопления вещества в растении относительно сильно загрязненных почв и могут характеризовать потенциал растений очищать почву от загрязнителей.

Таблица 3. Содержание в растениях (C_p , мг/кг), коэффициенты биологического поглощения (K_{0Zn}) цинка и их зависимости от его концентрации в почве (C_n , мг/кг)
Table 3. Content in plants (C_p , mg/kg), biological absorption coefficients (K_{0Zn}) of zinc and their dependence on zinc concentration in soil (C_n , mg/kg)

Агрокультура	Переменные C_n , C_p и функции между ними			Переменные K_{0Zn} и функции их от C_n	
	C_n	C_p	$C_p = f(C_n)$ (r_{xy} ; n – число проб; $\alpha = 0,05$)*	$K_{0F} = C_p / C_n$	$K_{0Zn} = f(C_n)$ (r_{xy} ; n – число проб; $\alpha = 0,05$)
Стебли пшеницы [1]	800 (250–1500)	80 (25–150)	$C_p = (0,10 \pm 0,08) \times C_n$ (+ 0,999; $n=5$)	0,10 (0,10–0,11)	K_{0Zn} – постоянные
Зерно пшеницы [1, 23, 24]	330 (43–1500)	50 (12–100)	$lg C_p = (0,3 \pm 0,2) \times lg C_n + (1,1 \pm 0,4)$ (+ 0,640; $n=19$)	0,40 (0,06–0,70)	$lg K_{0Zn} = - (0,7 \pm 0,5) \times lg C_n + (1,1 \pm 0,9)$ (– 0,919; $n=19$)
Стебли картофеля [23, 24]	625 (250–1000)	140 (70–200)	$C_p = (0,2 \pm 0,1) \times C_n$ (+ 0,999; $n=7$)	0,23 (0,20–0,28)	K_{0Zn} – постоянные
Клубни картофеля [1, 23, 24]	330 (47–1500)	22 (2–84)	$lg C_p = (0,5 \pm 0,3) \times lg C_n + (0,03 \pm 0,01)$ (+ 0,557; $n=26$)	0,14 (0,02–0,99)	$lg K_{0Zn} = - (0,3 \pm 0,2) \times lg C_n$ (– 0,529; $n=26$)
Корнеплоды свеклы [23, 24]	170 (18–440)	75 (15–150)	$lg C_p = (0,6 \pm 0,4) \times lg C_n + (0,6 \pm 0,2)$ (+ 0,839; $n=12$)	0,70 (0,17–1,82)	$n/3$
Корнеплоды моркови [23, 24]	185 (18–440)	17 (0,01–65)	$C_p = (0,10 \pm 0,09) \times C_n$ (+ 0,873; $n=11$)	0,10 (0,09–0,12)	K_{0Zn} – постоянные

Таблица 4. Концентрационные показатели и стандартизированные коэффициенты поглощения растениями бенз(а)пирена ($K_{6\text{БП}}$) с различным его содержанием в почве (по уравнениям рис. 1, 3, а и b, табл.1)

Table 4. Concentration indicators and standardized absorption coefficients of benzo(a)pyrene ($K_{6\text{БП}}$) by plants with its different content in soil (according to the equations of Fig. 1, 3, a and b, Tab. 1)

Растение и его орган	Концентрационные показатели, мкг/кг	Стандартизированные $K_{6\text{БП}}$ при		
		$C_n=1$	$C_n=10$	$C_n=100$
Травосмесь на непахотной почве	${}^1K_p = 0,15 \pm 0,5$	$0,15 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,4$
на пахотной почве	$K_p = 14 \pm 5$	14 ± 12	4 ± 3	$1,0 \pm 1,1$
Агрокультуры				
Капуста	$K_p = 0,2 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,3$	$0,06 \pm 0,05$	$0,01 \pm 0,01$
Пшеница	$C_\infty = 0,7 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,7$	$0,13 \pm 0,11$	$0,02 \pm 0,01$
Клубни картофеля (в почве до 220 мкг/кг)	$K_p = 0,10 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,05$	$0,02 \pm 0,01$	$0,004 \pm 0,003$
Клубни картофеля (в почве до 350 мкг/кг)	$C_\infty = 0,2 \pm 0,1$	$0,05 \pm 0,03$	$0,01 \pm 0,005$	$0,001 \pm 0,0005$
Свекла	$K_p \approx 0,10 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,15$	$0,05 \pm 0,04$	$0,010 \pm 0,009$
Морковь	$a^* = 0,05 \pm 0,03$	$\sim 0,05$	$\sim 0,05$	$\sim 0,05$

Примечание. * – здесь и далее безразмерный показатель.

Таблица 5. Концентрационные показатели и стандартизированные коэффициенты поглощения растениями фтора (K_{6F}) с различным его содержанием в почве (по уравнениям рис. 3 а и b, табл. 2)

Table 5. Concentration indicators and standardized absorption coefficients of fluorine uptake by plants (K_{6F}) with its different content in soil (according to the equations of Fig. 3 a and b, Tab. 2)

Агрокультура	Концентрационные показатели, мг/кг	Стандартизированные K_{6F} при		
		$C_n=1$	$C_n=10$	$C_n=100$
Зерно (ячмень, овес, пшеница)	н/з	$4,0 \pm 3,0$	$0,5 \pm 0,5$	$0,06 \pm 0,06$
Клубни картофеля	$K_p = 5,1 \pm 1,0$	$5,0 \pm 3,0$	$1,1 \pm 0,7$	$0,2 \pm 0,1$
Корнеплоды свеклы	$K_p = 1,0 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,4$	$0,3 \pm 0,2$	$0,10 \pm 0,07$
Корнеплоды моркови	$a = 0,4 \pm 0,2$	$\sim 0,4$	$\sim 0,4$	$\sim 0,4$

Таблица 6. Концентрационные показатели и стандартизированные коэффициенты поглощения растениями цинка (K_{6Zn}) с различным его содержанием в почве (по уравнениям рис. 2, 3 а и b, табл. 3)

Table 6. Concentration indicators and standardized absorption coefficients of zinc (K_{6Zn}) by plants with its different content in soil (according to the equations of Fig. 2, 3 a and b, Tab. 3)

Агрокультура	Концентрационные показатели, мг/кг	Стандартизированные K_{6Zn} при			
		$C_n=1$	$C_n=10$	$C_n=100$	$C_n=1000$
Стебли картофеля	$a = 0,20 \pm 0,10$	–	$0,20 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,04$
Стебли пшеницы	$a = 0,10 \pm 0,08$	–	$0,10 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,08$
Зерно пшеницы	$K_p = 13 \pm 5$	13 ± 11	$2,5 \pm 2,7$	$0,5 \pm 0,5$	$0,10 \pm 0,11$
Клубни картофеля	$K_p = 1,1 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,3$	$0,25 \pm 0,15$	$0,13 \pm 0,08$
Корнеплоды свеклы	$K_p = 4,0 \pm 1,0$	–	–	–	–
Корнеплоды моркови	$a = 0,10 \pm 0,09$	$\sim 0,1$	$\sim 0,1$	$\sim 0,1$	$\sim 0,1$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивание распределения вещества в системе почва–растение учитывает зависимость содержания в растении вещества (C_p) от его концентрации в почве (C_n). Предложен подход, включающий аппроксимацию этих зависимостей по линейным или степенным адсорбционным функциям (Фрейндлиха и Ленгмюра) $C_p = f(C_n)$, из которых определяют концентрационные

показатели вида a , 1K_p , K_p , C_∞ . С их помощью можно оценивать механизм и интенсивность накопления вещества растением. Второй подход включает получение зависимостей коэффициентов биологического поглощения вещества (K_6) от его концентрации в почве в виде степенной функции $K_6 = f(C_n)$ или ее линеаризованной формы $\lg K_6 = f(\lg C_n)$. Из полученных уравнений рассчитывают чувствительные и предель-

ные стандартизированные коэффициенты K_6 соответственно при низких (1, 10) и высоких (100, 1000) концентрациях вещества в почве. Из зависимостей $C_p=f(C_n)$ получены уравнения и концентрационные показатели накопления Б(а)П, фтора, цинка агрокультурами. Из зависимостей $IgK_6=f(IgC_n)$ определены стандартизированные коэффициенты K_6 , позволив-

шие сравнить интенсивности исследуемых веществ и активности различных растений между собой. Показатели отличаются точностью, чувствительностью, информативностью для изучения механизма и интенсивности накопления растением вещества, для оценки степени самоочищения почв от загрязняющих веществ, для проведения сравнительных оценок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
2. Попов А.И. Трофосистема почва-растение – основа функционирования экосистемы // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. N 7. С. 251–260.
3. Lekberg Y., Bever J.D., Bunn R.A., Callaway R.M., Hart M.M., Kivlin S.N., et al. Relative importance of competition and plant-soil feedback, their synergy, context dependency and implications for coexistence // Ecology Letters. 2018. Vol. 21, no. 8. P. 1268–1281. <https://doi.org/10.1111/ele.13093>.
4. Thakur M.P., van der Putten W.H., Wilschut R.A., (Ciska) Veen G.F., Kardol P., van Ruijven J., et al. Plant-soil feedbacks and temporal dynamics of plant diversity-productivity relationships // Trends in Ecology & Evolution. 2021. Vol. 36, no. 7. P. 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.03.011>.
5. Reinhart K.O., Bauer J.T., McCarthy-Neumann S., MacDougall A.S., Hierro J.L., Chiuffo M.C., et al. Globally, plant-soil feedbacks are weak predictors of plant abundance // Ecology and Evolution. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 1756–1768. <https://doi.org/10.1002/ece3.7167>.
6. Белых Л.И. Распределение полициклических ароматических углеводородов в системе почва-растение // Почвоведение. 2009. N 9. С. 1083–1089.
7. Canarini A., Kaiser C., Merchant A., Richter A., Wanek W. Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00157>.
8. Калманова В.Б. Анализ распределения свинца в системе почва-растительность г. Биробиджан // Фундаментальные исследования. 2014. N 8-7. С. 1605–1611.
9. Сиромля Т.И., Мяделец М.А., Охлопкова О.В., Качкин К.В. Химические элементы в системе почва-листья подорожника большого на территории г. Новосибирска // Современные проблемы науки и образования. 2014. N 6. С. 1368.
10. Page V., Feller U. Heavy metals in crop plants: transport and redistribution processes the whole plant level // Agronomy. 2015. Vol. 5, no. 3. P. 447–463. <https://doi.org/10.3390/agronomy5030447>.
11. Rutkowska B., Szulc W., Szychaj-fabisiak E., Pior N. Prediction of molybdenum availability to plants in differentiated soil conditions // Plant, Soil and Environment. 2017. Vol. 63, no. 11. P. 491–497. <https://doi.org/10.17221/616/2017-PSE>.
12. Ефремов И.В. Оценка риска загрязнения почвенно-растительных систем тяжелыми металлами при антропогенном воздействии // Вестник Оренбургского государственного университета. 2018. N 6. С. 132–139. <https://doi.org/10.25198/1814-6457-218-132>.
13. Noulas C., Tziouvalekas M., Karyotis T. Zinc in soils, water and food crops // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2018. Vol. 49. P. 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>.
14. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Мониторинг йода в системе «почва-растение» (обзор) // Вестник КрасГАУ. 2020. N 10. С. 101–108. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-10-101-108>.
15. Котельникова А.Д., Рогова О.Б., Столбова В.В. Лантаноиды в почве: поступление, содержание, влияние на растения, генотоксичность (обзор) // Почвоведение. 2021. N 1. С. 100–119. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21010056>.
16. De Long J.R., Heinen R., Steinauer K., Hannula S.E., Huberty M., Jongen R., et al. Taking plant-soil feedbacks to the field in a temperate grassland // Basic and Applied Ecology. 2019. Vol. 40. P. 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.08.001>.
17. Querejeta J.I., Ren W., Prieto I. Vertical decoupling of soil nutrients and water under climate warming reduces plant cumulative nutrient uptake, water-use efficiency and productivity // New Phytologist. 2021. Vol. 230, no. 4. P. 1378–1393. <https://doi.org/10.1111/nph.17258>.
18. Png G.K., Lambers H., Kardol P., Turner B.L., Wardle D.A., Laliberté E. Biotic and abiotic plant-soil feedback depends on nitrogen-acquisition strategy and shifts during long-term ecosystem development // Journal of Ecology. 2019. Vol. 107, no. 1. P. 142–153. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13048>.
19. Kempel A., Rindisbacher A., Fischer M., Allan E. Plant soil feedback strength in relation to large-scale plant rarity and phylogenetic relatedness // Ecology. 2018. Vol. 99, no. 3. P. 597–606. <https://doi.org/10.1002/ecy.2145>.
20. Wandrag E.M., Bates S.E., Barrett L.G., Catford J.A., Thrall P.H., van der Putten W.H., et al. Phylogenetic signals and predictability in plant-soil feedbacks // New Phytologist. 2020. Vol. 228, no. 4. P. 1440–1449. <https://doi.org/10.1111/nph.16768>.
21. Ильницкий А.П., Краснянская П.Н., Соленова Л.Г. Содержание бенз(а)пирена в сельскохозяйственных растениях // Растения и химические канцерогены. 1979. С. 139–142.
22. Дикун П.П., Калинина И.А. Фоновое содержание бенз(а)пирена в зерне // Растения и химические канцерогены. 1979. С. 113–115.
23. Лукин С.В. Закономерности накопления цинка в сельскохозяйственных растениях // Агрохимия. 1999. N 2. С. 380–390.
24. Волошин Е.И. Цинк в пахотных почвах Красноярского края // Агрохимия. 2002. N 5. С. 33–40.
25. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва-растение: монография. Красноярск: Красноярская городская типография, 2012. 146 с.

REFERENCES

1. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants; 2001. 331 p. (Russ. ed.: Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. Moscow: Mir; 1989. 439 p.).
2. Popov A.I. The plant–soil trophic system is a basis of ecosystem functioning. *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana*. 2012;(7):251-260. (In Russian).
3. Lekberg Y., Bever J.D., Bunn R.A., Callaway R.M., Hart M.M., Kivlin S.N., et al. Relative importance of competition and plant–soil feedback, their synergy, context dependency and implications for coexistence. *Ecology Letters*. 2018;21(8):1268-1281. <https://doi.org/10.1111/ele.13093>.
4. Thakur M.P., van der Putten W.H., Wilschut R.A., (Ciska) Veen G.F., Kardol P., van Ruijven J., et al. Plant–soil feedbacks and temporal dynamics of plant diversity–productivity relationships. *Trends in Ecology & Evolution*. 2021;36(7):651-661. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.03.011>.
5. Reinhart K.O., Bauer J.T., McCarthy-Neumann S., MacDougall A.S., Hierro J.L., Chiuffo M.C., et al. Globally, plant–soil feedbacks are weak predictors of plant abundance. *Ecology and Evolution*. 2021;11(4):1756-1768. <https://doi.org/10.1002/ece3.7167>.
6. Belykh L.I. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil–plant system. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2009;(9):1083-1089. (In Russian).
7. Canarini A., Kaiser C., Merchant A., Richter A., Wanek W. Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00157>.
8. Kalmanova V.B. Analysis of lead distribution in the soil–vegetation system in Biorbidzhan. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014;(8-7):1605-1611. (In Russian).
9. Siromlya T.I., Myadelets M.A., Okhlopko O.V., Kachkin K.V. Chemical elements in the soil–leaves of plantago major in the Novosibirsk. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;(6):1368. (In Russian).
10. Page V., Feller U. Heavy metals in crop plants: transport and redistribution processes the whole plant level. *Agronomy*. 2015;5(3):447-463. <https://doi.org/10.3390/agronomy5030447>.
11. Rutkowska B., Szulc W., Szychaj-fabisiak E., Pior N. Prediction of molybdenum availability to plants in differentiated soil conditions. *Plant, Soil and Environment*. 2017;63(11):491-497. <https://doi.org/10.17221/616/2017-PSE>.
12. Efremov I.V. Assessment of the risk of contamination of soil and plant systems with heavy metals under anthropogenic influence. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of the Orenburg State University*. 2018;(6):132-139. (In Russian). <https://doi.org/10.25198/1814-6457-218-132>.
13. Noulas C., Tziouvalekas M., Karyotis T. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2018;49:252-260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>.
14. Pobilat A.E., Voloshin E.I. Monitoring of iodine in the soil - plant system (review). *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KSAU*. 2020;(10):101-108. (In Russian). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-10-101-108>.
15. Kotelnikova A.D., Rogova O.B., Stolbova V.V. Lanthanides in the soil: routes of entry, content, effect on plants, and genotoxicity (a review). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2021;(1):100-119. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/s0032180x21010056>.
16. De Long J.R., Heinen R., Steinauer K., Hannula S.E., Huberty M., Jongen R., et al. Taking plant–soil feedbacks to the field in a temperate grassland. *Basic and Applied Ecology*. 2019;40:30-42. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.08.001>.
17. Querejeta J.I., Ren W., Prieto I. Vertical decoupling of soil nutrients and water under climate warming reduces plant cumulative nutrient uptake, water-use efficiency and productivity. *New Phytologist*. 2021;230(4):1378-1393. <https://doi.org/10.1111/nph.17258>.
18. Png G.K., Lambers H., Kardol P., Turner B.L., Wardle D.A., Laliberté E. Biotic and abiotic plant–soil feedback depends on nitrogen-acquisition strategy and shifts during long-term ecosystem development. *Journal of Ecology*. 2019;107(1):142-153. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13048>.
19. Kempel A., Rindisbacher A., Fischer M., Allan E. Plant soil feedback strength in relation to large-scale plant rarity and phylogenetic relatedness. *Ecology*. 2018;99(3):597-606. <https://doi.org/10.1002/ecy.2145>.
20. Wandrag E.M., Bates S.E., Barrett L.G., Catford J.A., Thrall P.H., van der Putten W.H., et al. Phylogenetic signals and predictability in plant–soil feedbacks. *New Phytologist*. 2020;228(4):1440-1449. <https://doi.org/10.1111/nph.16768>.
21. Il'nitskii A.P., Krasnyanskaya P.N., Solenova L.G. The content of benzo(a)pyrene in agricultural plants. *Rasteniya i khimicheskie kantserogeny*. 1979;139-142. (In Russian).
22. Dikun P.P., Kalinina I.A. Background content of benzo(a)pyrene in grain. *Rasteniya i khimicheskie kantserogeny*. 1979;113-115. (In Russian).
23. Lukin S.V. Patterns of zinc accumulation in agricultural plants. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*. 1999;(2):380-390. (In Russian).
24. Voloshin E.I. Zinc in arable soils of the Krasnoyarsk Territory. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*. 2002;(5):33-40. (In Russian).
25. Tandelov Yu.P. *Fluorine in the soil–plant system: monograph*. Krasnoyarsk: Krasnoyarskaya gorodskaya tipografiya; 2012. 146 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белых Лариса Ивановна,
д.х.н., старший научный сотрудник,
профессор кафедры промышленной экологии и БЖД,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larisa I. Belykh,
Dr. Sci. (Chemistry), Senior Researcher,
Professor,
Irkutsk National Research Technical University,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉belariv2000@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2990-0059>

Тимофеева Светлана Семеновна,
д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой промышленной экологии
и БЖД,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
timofeeva@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-8427-3732>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.03.2023.
Одобрена после рецензирования 12.04.2023.
Принята к публикации 30.05.2023.

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉belariv2000@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2990-0059>

Svetlana S. Timofeeva,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Head of the Department of Industrial Ecology
and Life Safety,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
timofeeva@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-8427-3732>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding
the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 03.03.2023.
Approved after reviewing 12.04.2023.
Accepted for publication 30.05.2023.