

**Ефремов И.В.**

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

E-mail: bgd@mail.osu.ru

## **ОЦЕНКА РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Одной из задач экологии является контроль загрязнений тяжелыми металлами почв и растений в различных промышленных регионах. Включаясь в пищевую цепь через культурные растения, тяжелые металлы представляют собой реальную угрозу здоровью человека, учитывая способность металлов накапливаться в тканях и органах. Важной задачей экологической науки является исследование миграционных свойств тяжелых металлов в различных почвенно-растительных системах и разработка на этой основе прогностических моделей поведения тяжелых металлов в природной среде.

Миграцию тяжелых металлов я рассматриваю как вероятностный процесс, в котором элементы распределяются между почвой и растением в зависимости от свойств почв и растений. На основе полученных экспериментально значений содержания подвижных форм тяжелых металлов в компонентах почвенно-растительных систем, рассчитаны риски загрязнения почв и растений. Математически обоснованы и рассчитаны интегральный и дифференциальный показатели миграционных свойств тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Полученные результаты позволяют прогнозировать распределение тяжелых металлов между почвой, корневой системой и надземной частью растений. Они также позволяют проводить классификацию миграционных свойств почвенно-растительных систем.

На основе полученных результатов подтвердилось выдвинутое предположение о селективности миграционных свойств тяжелых металлов в различных системах почва-растение. Полученные данные о риске загрязнения почв и растений тяжелыми металлами позволяют прогнозировать фиторемедиацию загрязненных земель, позволяют определить норму негативного воздействия на почву и растения, провести ранжирование почвенно-растительных систем по миграционной способности.

**Ключевые слова:** Тяжелые металлы, почвенно-растительные системы, моделирование, миграционные свойства тяжелых металлов, риск загрязнения, интегральная оценка миграционных свойств тяжелых металлов.

**Efremov I.V**

Orenburg state university, Orenburg, Russia

E-mail: bgd@mail.osu.ru

## **ASSESSMENT OF THE RISK OF CONTAMINATION OF SOIL AND PLANT SYSTEMS WITH HEAVY METALS UNDER ANTHROPOGENIC INFLUENCE**

One of the tasks of ecology is to control heavy metal pollution of soils and plants in various industrial regions. By entering the food chain through cultivated plants, heavy metals pose a real threat to human health, given the ability of metals to accumulate in tissues and organs. An important task of environmental science is to study the migration properties of heavy metals in various soil and plant systems and to develop on this basis predictive models of heavy metals behavior in the natural environment.

In this paper, the author on the basis of analytical studies on the content of mobile forms of heavy metals in the components of various soil and plant systems, calculated the risks of soil and plant pollution by the previously proposed method. The integral and differential indices of migration properties of heavy metals are mathematically justified.

On the basis of the results, the proposed assumption about the selectivity of the migration properties of heavy metals in different soil-plant systems was confirmed. The obtained data about the risk of contamination of soils and plants with heavy metals allows to predict the phyto-remediation of contaminated land, allow us to determine the rate of negative impact on soil and plants hold ranking soil-plant systems on migration ability.

**Keywords:** Heavy metals, soil and plant systems, modeling, migration properties of heavy metals, pollution risk, integrated assessment of migration properties of heavy metals

Одним из важнейших санитарно-гигиенических показателей токсичности почв и произрастающих на ней растений является содержание подвижных форм тяжелых металлов. Миграционные свойства этих веществ являются определяющим фактором самоочищения почв, при котором происходит вынос этих веществ в более глубокие почвенные горизонты. С другой стороны это приводит к загрязнению грунтовых вод. Миграция тяжелых металлов зависит также и от водного режима почв, количества выпавшей влаги в весенне-осенний периоды.

Тяжелые металлы, которые прочно связаны с почвенными частицами оказывают незначительное отрицательное влияние на почву. Однако, отмечается, что тяжелые металлы, содержащиеся в органической или коллоидной частицах почвы значительно снижают биологическую активность, замедляют аммонификацию и нитрификацию, имеющие большое значение для физико-химического баланса в почве. Это приводит к деградации гумуса и, как следствие, потере плодородия почв. Значительное влияние на подвижность тяжелых металлов оказывает рН почвы, гранулометрический состав, содержание органических веществ окислительно-восстановительный потенциал, а также ряд других факторов [4], [8], [9], [13], [14], [21], [24].

Так, например, рН почвенной среды определяет направленность и скорость биохимических и химических реакций в почве, а следовательно и доступность тяжелых металлов растениями. Увеличение рН почвы до щелочной приводит к уменьшению поглощения из почвы растениями меди, кобальта, цинка, марганца, но способствует поглощению молибдена. Снижение рН почвы до кислой среды способствует увеличению содержания доступных для растений элементов [2], [5], [7], [20], [22], [29].

Одной из особенностей тяжелых металлов является их устойчивость к процессам естественного разрушения и, попадая в почву, они остаются фактором постоянного влияния. Условно, резюмирую этот совсем краткий обзор о миграционных свойствах растений можно отметить несколько важных для дальнейшего рассмотрения выводов: миграция тяжелых металлов в системе почва-растение зависит от физико-химических и агрохимических свойств почв, вида растительности на рассматриваемом

типе почв, а также физико-технических свойств самих тяжелых металлов и их форме нахождения в почве.

Мы будем рассматривать в дальнейшем систему, состоящую из трех компонентов: почва (а именно, прикорневая почва), корневая система растений, надземная часть растений. Отметим также, что компоненты системы являются взаимосвязанными друг с другом, а саму систему можно отнести к саморегулирующей, сформированной в процессе эволюции как системы в целом, так и отдельных ее компонентов [10], [11], [18], [23], [24], [25]. Для разработки методов количественной оценки миграционных свойств металлов в различных почвенно-растительных системах, автором предложена гипотеза, заключающаяся в том, что, растения, произрастающие на различных типах почв, образуют различные почвенно-растительные системы, отличающиеся друг от друга, в том числе и миграционными свойствами тяжелых металлов. При этом предполагается, что тяжелые металлы распределяются по компонентам системы с определенной вероятностью, зависящей от свойств почв и растений. Необходимо разработать модель, позволяющую прогнозировать миграционные способности тяжелых металлов в различных почвенно-растительных системах. В работах [1], [2], [12], [14], [15], [16], [26], [27], [28] предложена вероятностная модель, в которой состояние компонентов почвенно-растительных систем рассматривается как вероятностный процесс с конечным числом состояний и непрерывным временем. Для идентификации параметров модели проведены экспериментальные исследования по определению содержания тяжелых металлов в пробах почв и растений [8], [9], [10], [19], [20], [29], [30].

Материалы и методы. Для исследования почвенно-растительного покрова Оренбургской области выбирались участки с одинаковым водным режимом, сходными погодными условиями. На выбранных участках были отобраны пробы почв и растений по стандартным методикам. Были отобраны пробы следующих подтипов почв: чернозем обыкновенный (далее ч.о.), чернозем типичный (ч.т.), чернозем южный (ч.ю.) и почва темно-каштановая неполноразвитая (т.к.п.) [7], [13], [17], [18], [28], [30]. На каждом подтипе

почв отбирались пробы следующих растений: *Salvia officinalis* L., *Onopordium acanthium* L., *Cichorium intybus* L., *Artemisia vulgaris* L., *Achillea millefolium* L., *Taraxacum officinale* L., *Trifolium pratense* L., *Glycyrrhiza glabra* L.. В пробах почв и растений определялась концентрация подвижных форм тяжелых металлов атомно-абсорбционным методом согласно стандартным методикам.

В работах [1], [2], [3], [5] предложено использовать следующее соотношение для оценки миграционной способности тяжелых металлов в различных почвенно-растительных комплексах:

$$I = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3,$$

где  $\lambda_1$  - интенсивность перехода вещества из почвы в корневую систему;  $\lambda_2$  - интенсивность перехода вещества из корневой системы в надземную часть растения;  $\lambda_3$  - интенсивность перехода вещества из надземной части растения в почву.

### Результаты и обсуждение

Риск загрязнения надземной части растений. На основе рассчитанных интенсивностей определены риски загрязнения почвы, надземной части растений и корневой системы. В целом риск загрязнения надземной части растений тяжелыми металлами незначителен для большинства почвенно-растительных систем. Вместе с тем, риск загрязнения молибденом надземной части *T. pratense* на черноземе обыкновенном достигает 0,75 или 75 %. Максимальной вероятностью загрязнения медью надземной части растений отмечена у *O. acanthium* – 0,27 (почва темно-каштановая неполноразвитая). Для других почвенно-растительных систем вероятность загрязнения *O. acanthium* медью значительно меньше и не превышает нескольких процентов. Минимум риска загрязнения надземной части растений медью отмечено для *S. officinalis* на черноземе южном.

Вероятность загрязнения цинком также невелика и составляет величину от 0,005 для *G. glabra* на черноземе южном до 0,1 для *A. vulgaris* на черноземе обыкновенном.

Риск загрязнения свинцом максимален для *T. officinale* – 0,07 (почва темно-каштановая), а минимален у *S. officinalis* – 0,0002 (чернозем южный).

Максимальная вероятность загрязнения никелем *O. acanthium* на черноземе обыкновенном (0,059). Минимальное - у *A. millefolium* на черноземе типичном (0,0041), хотя на черноземе обыкновенном составляет 0,038. Риск загрязнения хромом, ванадием надземной части растений очень низкий и не превышает долей процента. Наибольший риск загрязнения молибденом наблюдается на типичном черноземе у *S. officinalis*, *O. acanthium*, *C. intybus* на черноземе типичном. По серебру максимальное значение риска загрязнения наблюдается у *C. intybus* – 0,4 и *A. millefolium* – 0,37 (чернозем южный), на других типах почв риск загрязнения *C. intybus* в 10 и более раз ниже. Риски загрязнения барием и цирконием наземной части растений статистически незначимы и составляют доли процента. Наибольшее значение риска загрязнения марганцем наблюдается у надземной части *O. acanthium* – 0,025 (чернозем обыкновенный).

Риск загрязнения корневой системы. Максимум и минимум вероятности загрязнения цинком корневой системы отмечено у *C. intybus*, *O. acanthium*, *T. officinale* на черноземе обыкновенном (0,66) и черноземе типичном (0,07) соответственно.

Вероятность накопления свинца в корнях отмечено у *S. officinalis* на черноземе южном (0,98). Другие типы почв имеют разброс по риску загрязнения свинцом изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,96.

Как видно из результатов, одни почвенно-растительные системы с одним и тем же растением характеризуются максимальным значением риска, а на других почвенно-растительных системах с тем же растением – минимальное. Это связано с влиянием почвенных факторов, характерных для каждого типа почв на накопление микроэлементов в растениях.

Наибольшее значение риска загрязнения серебром отмечается у *S. officinalis*, *O. acanthium* – 1,0 (чернозем южный), *O. acanthium*, *C. intybus*, *A. vulgaris*, *A. millefolium* – 1,0 (почва темно-каштановая). Из результатов анализа видно, что молибден и серебро очень интенсивно накапливаются в корневой системе растений.

Максимальный риск загрязнения марганцем наблюдается у *A. millefolium* – 0,45 (по-

чва темно-каштановая неполноразвитая), а минимальный у *S. intybus* – 0,03 (чернозем южный).

Анализ данных по риску загрязнения растений показал, что основное количество микроэлементов содержащихся в почве аккумулируется в корневой системе растений и лишь небольшая доля – в надземной части растений.

Риск загрязнения почвы .

Для почвенно-растительных систем:

– почва темно-каштановая + *S. officinalis*, риск загрязнения почвы медью высок (0,38);

– почва темно-каштановая + *A. vulgaris*, *A. millefolium* риск загрязнения медью минимален (0,05).

Значительная вероятность загрязнения почвы цинком отмечена на темно-каштановой почве, черноземе типичном (0,92), если значительная часть почвы содержит *T. pratense*.

Риск загрязнения почвы свинцом меньше, чем риск загрязнения этим элементом корневой системы. В то же время, если на черноземе обыкновенном и темно- каштановом произрастают *S. intybus*, *S. officinalis*, *A. vulgaris*, *A. millefolium*, то риск загрязнения почвы может достигать 0,7–0,8.

Риск загрязнения почвы хромом варьирует от 0,05 (*A. millefolium* на темно-каштановой почве) до 0,95 для *S. officinalis*, произрастающего на почвах темно-каштановой и черноземе обыкновенном .

Риск загрязнения почвы никелем высок для почвы для всех типов почв и растений. Так, для почвенно-растительных систем: почва темно-каштановая неполноразвитая + *S. officinalis*, *O. acanthium* и *S. intybus*, риск достигает почти сто процентов. Риск загрязнения почв барием лежит в диапазоне от 0,01 до 0,94. Значительный риск загрязнения соответствует темно-каштановой почве.

Наибольший риск загрязнения молибденом наблюдается на почвенно-растительной системе *T. officinale* + чернозем обыкновенный + *S. officinalis* (0,39).

Серебро практически не поглощается почвой и риск загрязнения почвы этим металлом составляет тысячные доли процента. Сравнительный анализ рисков загрязнения почвенно-растительных систем тяжелыми металлами показывает, что наименьший риск загрязнения

тяжелыми металлами характерен для надземной части растений.

Для интегральной оценки почвенно-растительных комплексов предложен показатель, учитывающий физико-химические свойства почв и растений. В качестве такого критерия выбран соотношение (1). В таблицах 1, 2 (фрагменты) приведены рассчитанные средние дифференциальные показатели, характеризующие распределение металлов в почвенно-растительных системах для меди и цинка по компонентам системы (почве, корням, надземной части растений). Прежде всего, при анализе таблиц следует отметить, что дифференциальный показатель *I* характеризует степень распределения тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Так, если  $I=3$  – означает равномерное распределение тяжелого металла в компонентах- почва, корневая система, надземная часть растения.

Чем ближе величина *I* к трём, тем более равномерное распределение тяжелых металлов характерно для почвенно-растительной системы. Как следует из анализа таблиц относительно равномерным распределением в рассмотренных почвенно-растительных системах характеризуются цинк, кадмий, кобальт, никель, ртуть. Значительной неоднородностью распределения в почвенно-растительных системах характеризуются медь, марганец, никель, хром. В таблице 3 приведены результаты расчета комплексного показателя, характеризующего миграционные способности тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Расчет проводился для каждого металла и последующим нахождением среднеквадратичного значения для каждой почвенно-растительной системы. Расчетная формула:

$$Int = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2} / N$$

где *I* – дифференциальный показатель для *i*-металла; *N* – число элементов (тяжелых металлов), по которым проводилось суммирование.

Содержание тяжелых металлов в почвенно-растительных системах определяется направлением и степенью развитости процесса почвообразования, особенностью поведения тяжелых металлов в ландшафте, физико-химическими свойствами почв и растений. Валовые формы тяжелых металлов малоподвижны из-за их со-

### Технические науки

единений с другими элементами и органическими веществами. Растениям доступны только водорастворимые соединения тяжелых металлов. На основе вероятностного моделирования получены количественные характеристики накопления тяжелых металлов в почве, корнях и надземной части растений. Интегральный показатель определяет степень равномерности распределения тяжелых металлов между корнями, почвой и надземной частью растения. Большие значения этого показателя свидетельствуют о значительной неоднородности распределения

тяжелого металла среди корней, почвы и надземной части растения.

К первой группе можно отнести почвенно-растительные системы с равномерным распределением тяжелых металлов по компонентам системы, это: ч.ю.+ *S. intybus*, ч.т.+ *S. officinalis*, ч.ю.+ *A. millefolium*, ч.о.+ *S. officinalis*, ч.т.+ *O. acanthium*, ч.о.+ *G. glabra*, ч.ю.+ *A. vulgaris*, ч.о.+ *C. intybus*, ч.о.+ *A. vulgaris*, ч.ю.+ *G. glabra*, ч.о.+ *O. acanthium*.

Ко второй группе относятся почвенно-растительные системы с промежуточным зна-

Таблица 1 – Дифференциальный показатель (средние значения) загрязнения почвенно-растительной системы медью (фрагмент)

Почва	<i>S. officinalis</i>	<i>O. acanthium</i>	<i>C. intybus</i>	<i>A. millefolium</i>	<i>A. vulgaris</i>	<i>T. pratense</i>	<i>T. officinale</i>
Чернозем обыкновенный	18,33	17,36	32,04	13,85	15,4	30,42	20,63
Чернозем типичный	11,38	21,77	30,8	48,63	39,95	35,46	38,22
Чернозем южный	11,18	23,23	24,43	26,3	58,64	26,46	22,26
Почва темно-каштановая	8,19	42,72	37,86	93,01	15,75	46,57	47,37

Таблица 2 – Дифференциальный показатель загрязнения почвенно-растительной системы цинком (фрагмент)

Почва	<i>S. officinalis</i>	<i>O. acanthium</i>	<i>C. intybus</i>	<i>A. millefolium</i>	<i>A. vulgaris</i>	<i>T. pratense</i>	<i>T. officinale</i>
Чернозем обыкновенный	7,57	6,25	9,96	7,14	4,47	7,29	8,15
Чернозем типичный	9,34	5,12	3,04	6,19	11,74	5,07	4,16
Чернозем южный	8,41	6,35	5,92	6,91	5,55	8,94	4,07
Почва темно-каштановая	5,25	9,39	5,89	5,4	7,75	8,14	6,78

Таблица 3 – Комплексный показатель (фрагмент)

Почва	+ <i>S. officinalis</i>	+ <i>O. acanthium</i>	+ <i>C. intybus</i>	+ <i>A. millefolium</i>	+ <i>A. vulgaris</i>	+ <i>T. pratense</i>	+ <i>T. officinale</i>
Чернозем обыкновенный	174,2	29	58,2	82,5	32,2	37,6	28
Чернозем обыкновенный	71,6	57,4	37,8	95,3	182,8	60,8	48,2
Чернозем южный	25,9	41,2	53,3	187,8	182,2	34	53,1
Чернозем южный	45,7	52,9	81	45,2	29,2	36,2	175,6
Чернозем южный	61,4	212,1	54,5	31,9	63	28,8	41,2

чением интегрального показателя: т.к.п.+ *T. pratense*, т.к.п.+ *T. officinale*, т.к.п.+ *A. millefolium*, т.к.п.+ *A. vulgaris*, т.к.п.+ *C. intybus*, т.к.п.+ *O. acanthium*, т.к.п.+ *S. officinalis*, ч.т.+ *G. glabra*, ч.т.+ *T. pratense*, ч.т.+ *T. officinale*, ч.т.+ *A. millefolium*, ч.т.+ *A. vulgaris*, ч.о.+ *T. pratense*.

К третьей группе относятся почвенно-растительные системы характеризующиеся большой неоднородностью распределения тяжелых металлов по компонентам системы. К этой группе относятся: ч.ю.+ *S. officinalis*, ч.ю.+ *T. pratense*, ч.т.+ *C. intybus*, ч.ю.+ *T. officinale*, ч.о.+ *T. officinale*, ч.ю.+ *O. acanthium*, ч.о.+ *A. millefolium*.

### Выводы

1. На основе проведенных аналитических исследований проб почв, корней и надземной части растений получены данные об интенсивностях переходов тяжелых металлов по компонентам системам отмечены металлы, которые накапливаются в корневой системе: это медь, молибден, серебро. Металлы, которые накапливаются в надземной части растений: это – марганец, в *O. acanthium*, *C. intybus* (чернозем южный); *S. officinalis*, *C. intybus* (почва темно-каштановая); *C. intybus*, *T. officinale*, *T. pratense* (чернозем типичный); *C. intybus*, *A. vulgaris* (чернозем обыкновенный). Кроме этого следует отметить накопление в надземной части некоторых растений сразу несколько тяжелых металлов например: - *S. officinalis* на почве темно-каштановой накапливает никель, ванадий, титан, цирконий, марганец; *A. vulgaris* на черноземе обыкновенном накапливает цинк, никель, хром, ванадий, титан, цирконий, марганец. Практически все металлы накапливаются в почвенном покрове. Только серебро и молибден на некоторых почвенно-растительных системах аккумулируются в растении.

2. Риск загрязнения компонентов почвенно-растительных систем тяжелыми металлами значительно отличается для наземной части растений, корневой системы и почвы.

В целом риск загрязнения надземной части растений тяжелыми металлами незначителен

для большинства почвенно-растительных систем. Вместе с тем, риск загрязнения молибденом надземной части *T. pratense* на черноземе обыкновенном достигает 0,75 или 75 %. На отдельных почвенно-растительных системах отмечено высокий риск загрязнений надземной части растений медью и серебром.

Риск загрязнения корневой системы растений варьирует от нескольких процентов до значительных величин, достигающих почти ста процентов для отдельных металлов и почвенно-растительных систем.

Риск загрязнения почвы так же лежит в диапазоне от нескольких процентов до ста. Исключение составляют молибден и серебро, которые в почве практически не аккумулируются, за исключением отдельных почвенно-растительных систем.

3. На основе рассчитанных рисков загрязнения почвенно-растительных систем тяжелыми металлами для характеристики неоднородности распределения конкретного металла по компонентам системы предложен дифференциальный показатель. Если дифференциальный показатель равен трем, то тяжелый металл равномерно распределен в корнях, почве и наземной части растений. Чем сильнее этот показатель отличается от трех, тем более неравномерно распределен металл по компонентам. На основе проведенного ранжирования почвенно-растительных систем можно выделить ряд почвенно-растительных систем, в которых металлы распределены в значительной степени неоднородно.

4. Для комплексной оценки неравномерности распределения металлов по компонентам почвенно-растительной системы предложен интегральный показатель, который характеризует неоднородность распределения всех в совокупности металлов по компонентам почвенно-растительной системы.

Выделено три группы почвенно-растительных систем с равномерным, промежуточным и неравномерным распределением металлов по компонентам.

15.04.2018

### Список литературы:

1. Моделирование почвенно-растительных систем (монография) Ефремов И.В. М:Издательство ЛКИ, 2008. - 152 с. ISBN 978-5-382-00712-0.
2. Оценка миграции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах Ефремов И.В. Кузьмин О. Н. Ежемесячный общественный научно-технический журнал «Экология и промышленность России». - Москва, январь, 2010. – С. 36 – 38.

3. Нормирование антропогенного влияния на почвенно-растительные системы Ефремов И.В., Кузьмин О. Н., Колобова Е. А., Савченкова Е. Э., Перекрестова Е. Н., Кушнарева О. П. *Естествознание и гуманизм* Том 6, № 1. Сборник научных трудов «Современный мир, природа и человек». – Томск, 2010. – С. 55 – 56.
4. Вероятностное моделирование процессов взаимодействия компонентов системы почва-растение Ефремов И.В., Колобова Е. А., Кузьмин О. Н., Савченкова Е. Э., Перекрестова Е. Н., Кушнарева О. П. *Естествознание и гуманизм* Том 6, № 1. Сборник научных трудов «Современный мир, природа и человек». – Томск, 2010. – С. 65 – 67.
5. Нормирование антропогенной нагрузки территорий природно-технических систем Ефремов И.В., Кузьмин О. Н., Колобова Е. А., Савченкова Е. Э. Международная научная конференция «Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации». – Оренбург: ГОУ ОВПОГУ, 2010. – С. 1 – 3.
6. Моделирование антропогенной нагрузки на природно-технические системы Ефремов И.В., Кузьмин О.Н., Колобова Е.А., Дудоров В.Е. I Международная научно-практическая конференция: сборник научных статей «Экологические проблемы природных и антропогенных территорий». - Чебоксары: типография «Новое время», 2011. - С. 167 – 168.
7. Моделирование процессов взаимодействия компонентов системы почва-растение Ефремов И.В., Кузьмин О.Н., Дудоров В.Е. I Международная научно-практическая конференция: сборник научных статей «Экологические проблемы природных и антропогенных территорий». - Чебоксары: типография «Новое время», 2011. - С. 168 – 169 ISBN 978-5-4246-0057-9.
8. Моделирование процессов миграции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах Ефремов И.В., Кузьмин О.Н., Колобова Е.А. Научно производственный журнал № 1. «Аграрная Россия». - Москва: изд-во «Фолиум», 2011.- С. 13 – 20.
9. Математическое моделирование миграции радионуклидов в почвенно-растительных комплексах Оренбуржья Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Ефремова Е.Г., Савченкова Е.Э., Гафарова К.Я. *Вестник оренбургского государственного университета*. 2005. № 9 (47). С. 129-133.
10. Биофизический мониторинг и экологический статус систем «почва-растение» при антропогенном воздействии (монография) Ефремов И.В. Н. Новгород: изд-во ВГИПУ, 2011. – 248 с. ISBN 978-5-88820-637-9.
11. Способ получения калийно-фосфорного удобрения Ефремов И.В., Савченкова Е.Э. патент на изобретение RU 2314318 12.04.2006.
12. Устройство для регистрации замедленной флуоресценции Ефремов И.В., Межуева Л.В., Быкова Л.А. Патент на изобретение RU 2220413 11.06.2002.
13. Замедленная флуоресценция и химические свойства почв при термической обработке (на примере почв Оренбургской области) Ефремов И.В., Савченкова Е.Э. *Экологические системы и приборы*. Изд-во научно-технической литературы «Научтехлитиздат»- журнал № 3. - Москва, 2011. – С. 10 – 18.
14. Технология утилизации выбуренной породы Ефремов И.В., Гамм А.А., Гамм Т.А. *Вестник оренбургского государственного университета*. 2011. № 6 (125). С. 181-184.
15. Особенности получения воды методом конденсации на территории Оренбургской области Солопова В.А., Ефремов И.В., Ямбулатов И.И. *Вестник оренбургского государственного университета*. 2015. № 6 (181). С. 172-177.
16. Температурный режим прокаливания и обжига твердых отходов бурения для рекультивации Ефремов И.В., Гамм А. А., Гамм Т. А. Научно-производственный журнал № 3 «Аграрная Россия». - Москва: изд-во «Фолиум», 2012. – С. 5 – 7.
17. Моделирование процессов миграции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах Ефремов И.В., Кузьмин О.Н., Колобова Е.А. *Аграрная Россия*. 2011. № 1. С. 13-20.
18. Технология утилизации отходов при добыче нефти и газа Ефремов И.В., Гамм А. А., Гамм Т. А. *Экология и промышленность России*. - Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2012.- С. 19 – 21.
19. Radziemska, M., Fronczyk, J. (2015). Level and contamination assessment of soil along an expressway in an ecologically valuable area in central Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 13372-13387.
20. Rijkenberg, M.J., Depree, C.V. (2010). Heavy metal stabilization in contaminated road-derived sediments. *Science of the Total Environment*, 408, 1212-1220.
21. Taseli, B.K., Gokcay C.F., Gurol A. (2008). Influence of nickel (II) and chromium (VI) on the laboratory scale rotating biological contactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(9), 1033-1039.
22. Varol, M. (2011). Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 355-364.
23. Wang, A.S., Angle, J.S., Chaney, R.L., Delorme, T.A., Reeves, R.D. (2006). Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil*, 281(1-2), 325-337.
24. Warren, R.S., Birch, P. (1987). Heavy metal levels in atmospheric particulates, roadside dust and soil along a major urban highway. *Science of Total Environment*, 59, 233-256.
25. Wei, B., Jiang, F., Li, X., Mu, S. (2009) Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China. *Microchemical Journal*, 93, 147-152.
26. Wilson, B., Lang, B., Pyatt, F.B. (2012). The dispersion of heavy metals in the vicinity of Britannia Mine, British Columbia, Canada. *Ecotoxicol Environ Saf*, 60, 269-276.
27. Wong, J.W.C., Selvam, A. (2006). Speciation of heavy metals during composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere*, 63, 980-986.
28. Yang, Z., Lu, W., Long, Y., Bao, X., Yang, Q. (2011). Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 108, 27-38.
29. Yu, H., Ni, S.J., He, Z.W., Zhang, C.J., Nan, X., Kong, B., Weng, Z.Y. (2014). Analysis of the spatial relationship between heavy metals in soil and human activities based on landscape geochemical interpretation. *Journal of Geochemical Exploration*, 146, 136-148.
30. Zhang, F., Yan, X., Zeng, C., Zhang, M., Shrestha, S., et al. (2005). Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9, 1715-1731.

**References:**

1. Eftremov I.V. Modelirovanie pochvenno-rastitel'nyh sistem (monografiya) [Modeling of soil and plant systems] Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2008, 152 p. ISBN 978-5-382-00712-0.
2. Eftremov I.V. Kuz'min O. N. Ocenka migracii tyazhelyh metallov v pochvenno-rastitel'nyh sistemah Ezhemesyachnyj obshchestvennyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Ekologiya i promyshlennost' Rossii» [Monthly public scientific and technical journal «Ecology and industry of Russia»] - Moscow, January, 2010. pp. 36 – 38.
3. Eftremov I.V, Kuz'min O. N., Kolobova E. A., Savchenkova E. E., Perekrestova E. N., Kushnareva O. P. Normirovanie antropogennogo vliyaniya na pochvenno-rastitel'nye sistemy Estestvoznaniye i gumanizm Tom 6, № 1. [Collection of scientific works «the modern world,

- nature and man»]. Tomsk, 2010. pp. 55 – 56.
4. Efremov I.V., Kolobova E. A., Kuz'min O. N., Savchenkova E. E., Perekrestova E. N., Kushnareva O. P. Veroyatnostnoe modelirovanie processov vzaimodejstviya komponentov sistemy pochva-rastenie Estestvoznaniye i gumanizm Tom 6, № 1. [Collection of scientific works «the Modern world, nature and man»]. Tomsk, 2010. pp. 65 – 67.
  5. Efremov I.V., Kuz'min O. N., Kolobova E. A., Savchenkova E. E. Normirovanie antropogennoj nagruzki territorij prirodno-tekhnicheskikh sistem Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Nauka i obrazovanie: fundamental'nye osnovy, tekhnologii, innovacii» [International scientific conference «Science and education: fundamentals, technologies, innovations»]. Orenburg: Orenburg State University, 2010. pp. 1 – 3.
  6. Efremov I.V., Kuz'min O.N., Kolobova E.A., Dudorov V.E. Modelirovanie antropogennoj nagruzki na prirodno-tekhnicheskije sistemy I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya: sbornik nauchnyh statej «Ekologicheskie problemy prirodnyh i antropogennyh territorij». [I international scientific and practical conference: collection of scientific articles «Ecological problems of natural and anthropogenic territories»]. Cheboksary, tipografiya «Novoe vremya», 2011. pp. 167 – 168.
  7. Efremov I.V., Kuz'min O.N., Dudorov V.E. Modelirovanie processov vzaimodejstviya komponentov sistemy pochva-rastenie I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya: sbornik nauchnyh statej «Ekologicheskie problemy prirodnyh i antropogennyh territorij». [I international scientific and practical conference: collection of scientific articles «Ecological problems of natural and anthropogenic territories»] Cheboksary, tipografiya «Novoe vremya», 2011. pp. 168 – 169. ISBN 978-5-4246-0057-9.
  8. Efremov I.V., Kuz'min O.N., Kolobova E.A. Modelirovanie processov migracii tyazhelyh metallov v pochvenno-rastitel'nyh sistemah Nauchno proizvodstvennyj zhurnal № 1. «Agrarnaya Rossiya». [Scientific and production journal No. 1. «Agrarian Russia»]- Moscow. «Folium», 2011. pp. 13 – 20.
  9. Efremov I.V., Rahimova N.N., Efremova E.G., Savchenkova E.E., Gafarova K.YA. Matematicheskoe modelirovanie migracii radionuklidov v pochvenno-rastitel'nyh kompleksah Orenburzh'ya Vestnik orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. [Vestnik of the Orenburg state University] 2005. № 9 (47). pp. 129-133.
  10. Efremov I.V. Biofizicheskij monitoring i ekologicheskij status sistem «pochva-rastenie» pri antropogennom vozdeystvii (monografiya) [Biophysical monitoring and ecological status of soil-plant systems under anthropogenic impact (monograph)]. N. Novgorod, VGIPU, 2011. p. 248. ISBN 978-5-88820-637-9.
  11. Efremov I.V., Savchenkova E.E. Sposob polucheniya kalijno-fosfornogo udobreniya Patent na izobretenie RUS 2314318 12.04.2006 [The patent for invention RUS 2314318 12.04.2006].
  12. Efremov I.V., Mezhuva L.V., Bykova L.A. Ustrojstvo dlya registracii zamedlennoj fluorescencii Patent na izobretenie rus 2220413 11.06.2002. [The patent for invention RUS 2314318 12.04.2006].
  13. Efremov I.V., Savchenkova E.E. Zamedlennaya fluorescenciya i himicheskie svoystva pochv pri termicheskoj obrabotke (na primere pochv Orenburgskoj oblasti) Ekologicheskie sistemy i pribory. Izd-vo nauchno- tekhnicheskij literatury «Nauchtekhlitizdat»- zhurnal № 3. [Ecological systems and devices. Publishing house of scientific technical literature «Nauchtekhlitizdat» magazine № 3]. Moscow, 2011. pp. 10 – 18.
  14. Efremov I.V., Gamm A.A., Gamm T.A. Tekhnologiya utilizacii vyburennoj porody Vestnik orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. [Bulletin of the Orenburg state University] 2011. № 6 (125). pp. 181-184.
  15. Solopova V.A., Efremov I.V., YAnbulatov I.I. Osobennosti polucheniya vody metodom kondensacii na territorii Orenburgskoj oblasti Vestnik orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. [Bulletin of the Orenburg state University]. 2015. № 6 (181). pp. 172-177.
  16. Efremov I.V., Gamm A. A., Gamm T. A. Temperaturnyj rezhim prokalivaniya i obzhiga tverdyh othodov bureniya dlya rekultivacii Nauchno-proizvodstvennyj zhurnal № 3 «Agrarnaya Rossiya». [Scientific and production journal No. 3 «Agrarian Russia»]. - Moscow: Folium publishing house, 2012. pp. 5 – 7.
  17. Efremov I.V., Kuz'min O.N., Kolobova E.A. Modelirovanie processov migracii tyazhelyh metallov v pochvenno-rastitel'nyh sistemah Nauchno-proizvodstvennyj zhurnal № 3 «Agrarnaya Rossiya». [Scientific and production journal «Agrarian Russia»]. 2011. № 1. pp. 13-20.
  18. Efremov I.V., Gamm A. A., Gamm T. A. Tekhnologiya utilizacii othodov pri dobyche nefi i gaza Ekologiya i promyshlennost' Rossii. [Ecology and industry of Russia.]. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2012. pp. 19 – 21.
  19. Radziemska, M., Fronczyk, J. (2015). Level and contamination assessment of soil along an expressway in an ecologically valuable area in central Poland. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12, 13372-13387.
  20. Rijkenberg, M.J., Depree, C.V. (2010). Heavy metal stabilization in contaminated road-derived sediments. Science of the Total Environment, 408, 1212-1220.
  21. Taseli, B.K., Gokcay C.F., Gurol A. (2008). Influence of nickel (II) and chromium (VI) on the laboratory scale rotating biological contactor. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 35(9), 1033-1039.
  22. Varol, M. (2011). Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. Journal of Hazardous Materials, 195, 355-364.
  23. Wang, A.S., Angle, J.S., Chaney, R.L., Delorme, T.A., Reeves, R.D. (2006). Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspa caerulescens*. Plant Soil, 281(1-2), 325-337.
  24. Warren, R.S., Birch, P. (1987). Heavy metal levels in atmospheric particulates, roadside dust and soil along a major urban highway. Science of Total Environment, 59, 233-256.
  25. Wei, B., Jiang, F., Li, X., Mu, S. (2009) Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China. Microchemical Journal, 93, 147-152.
  26. Wilson, B., Lang, B., Pyatt, F.B. (2012). The dispersion of heavy metals in the vicinity of Britannia Mine, British Columbia, Canada. Ecotoxicol Environ Saf, 60, 269-276.
  27. Wong, J.W.C., Selvam, A. (2006). Speciation of heavy metals during composting of sewage sludge with lime. Chemosphere, 63, 980-986.
  28. Yang, Z., Lu, W., Long, Y., Bao, X., Yang, Q. (2011). Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China. Journal of Geochemical Exploration, 108, 27-38.
  29. Yu, H., Ni, S.J., He, Z.W., Zhang, C.J., Nan, X., Kong, B., Weng, Z.Y. (2014). Analysis of the spatial relationship between heavy metals in soil and human activities based on landscape geochemical interpretation. Journal of Geochemical Exploration, 146, 136-148.
  30. Zhang, F., Yan, X., Zeng, C., Zhang, M., Shrestha, S., et al. (2005). Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas. International Journal of Environmental Research and Public Health, 9, 1715-1731.

#### Сведения об авторе:

**Ефремов Игорь Владимирович**, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета, доктор биологических наук, профессор

E-mail: ephremov56@yandex.ru

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13