

Оригинальная статья / Original article
УДК 631.437.1/.5
DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-60-68

Профильное распределение и миграция тяжелых металлов в почвах Курской агломерации (модельные опыты)

Николай П. Неvedров 

Курский государственный университет, Курск, Россия

Контактное лицо

Николай П. Неvedров, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник НИЛ экомониторинга ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»; 305000 Россия, г. Курск, ул. Радищева, 33.

Тел. +79513145941

Email 9202635354@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1121-0671>

Формат цитирования

Неvedров Н.П. Профильное распределение и миграция тяжелых металлов в почвах Курской агломерации (модельные опыты) // Юг России: экология, развитие. 2020. Т.15, N 1. С. 60-68. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-60-68

Получена 13 мая 2019 г.

Прошла рецензирование 30 июля 2019 г.

Принята 26 сентября 2019 г.

Резюме

Цель. Лабораторная оценка особенностей пространственного распределения и миграции тяжелых металлов (ТМ) в модельных профилях почв различного генезиса по изменению электрокинетических свойств в почвенных растворах.

Материал и методы. Исследовались фоновые ненарушенные почвы лесопарковых ландшафтов и материковых пойменных лугов Курской агломерации. Опыт проводился в лабораторных условиях. Исследовалась краткосрочная временная динамика вертикального распределения и миграции внесенных ТМ в модельных почвенных колонках, являющихся имитациями почвенных профилей.

Результаты. Анализ кинетики почвенных растворов и лизиметрических вод контрольных и загрязненных почв показал, что модельный профиль темносерой типичной почвы отличался наименьшей способностью к извлечению ионов свинца из загрязненного почвенного раствора. Минимальная сорбционная способность по отношению к цинку характерна для профиля дерново-подзола песчаного иллювиально-железистого. Максимальная способность закреплять изучаемые ТМ (Zn и Pb) выявлена у чернозема выщелоченного среднесуглинистого.

Заключение. Динамика и кинетика свинца и цинка в рассмотренных почвах Курской агломерации имеют существенные отличия и зависят от ряда почвенных факторов. В изучаемых почвах характер пространственного распределения и интенсивность миграции свинца и цинка была обусловлена показателями емкости и контрастности внутрипочвенных геохимических барьеров. Торможение процессов вертикальной миграции Pb и Zn в почвах изучаемых модельных профилей отмечается как в гумусированных гумусово-аккумулятивных генетических горизонтах, так и в минеральных горизонтах с высокой контрастностью кислотно-основных и окислительно-восстановительных условий. Зоны выноса свинца и цинка формируются при значимом укрупнении гранулометрического состава и снижении показателя pH_{KCl} .

Ключевые слова

Почвенный профиль, тяжелые металлы, удельная электропроводность, вертикальная миграция, пространственное распределение тяжелых металлов.

Profile Distribution and Migration of Heavy Metals in the Soils of the Kursk Agglomeration (Model Experiments)

Nikolay P. Nevedrov 

Kursk State University, Kursk, Russia

Principal Contact

Nikolay P. Nevedrov, Cand. Biol. Sci.,
Research Scientist, Environmental Monitoring Scientific Research Laboratory,
Kursk State University; 33 Radishchev St,
Kursk, 305000 Russia.

Tel. +79513145941

Email 9202635354@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1121-0671>

How to cite this article

Nevedrov N.P. Profile distribution and migration of heavy metals in the soils of the Kursk agglomeration (model experiments). *South of Russia: ecology, development*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 60-68. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-60-68

Received 13 May 2019

Revised 30 July 2019

Accepted 26 September 2019

Abstract

Aim. Laboratory evaluation of the characteristics of spatial distribution and migration of heavy metals (HM) in model soil profiles of varied genesis through measurement of the electrokinetic potential of soil solutions.

Material and Methods. Undisturbed soils of forest parks landscapes and continental floodplain meadows of the Kursk agglomeration were studied. Experiments were carried out in laboratory conditions. The short-term temporal dynamics were studied of vertical distribution and migration of the introduced HMs in model soil columns which imitated soil profiles.

Results. Analysis of the kinetics of soil solutions and of lysimeter waters of control and polluted samples showed that the model profile of typical dark-gray soil has the least capacity to capture lead ions from polluted soil solutions. Minimum sorption capacity with respect to zinc was found to be characteristic of sod-podzol illuvial-ferruginous soil profiles. Maximum ability to deposit the HMs under analysis (Zn and Pb) was shown in leached chernozem medium loamy soils.

Conclusion. The dynamics and kinetics of lead and zinc in soils of the Kursk agglomeration differ significantly and depend on a number of soil factors. In the soils studied, the spatial distribution and the intensity of migration of lead and zinc were determined by the capacity and contrast indices of the internal soil geochemical barriers. Inhibition of the processes of vertical migration of Pb and Zn in the model soil profiles was observed in those rich in humusified humus-accumulative genetic horizons as well as in mineral horizons with highly contrasting acid-base and redox conditions. Adsorption zones of lead and zinc are formed with a significant increase in granulometric texture and a decrease in pH_{KCl} .

Key Words

Soil profile, heavy metals, electrical conductivity, vertical migration, spatial distribution heavy metals.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование комфортной и экологически безопасной городской среды неразрывно связано с мероприятиями по созданию новых и обслуживанию имеющихся зеленых ландшафтов на территориях городов. Как правило, озелененные кластеры городских территорий обеспечивают экологическую безопасность окружающей среды. Однако далеко не все природно-антропогенные и антропогенные урбоэкосистемы способны длительное время поддерживать экосистемный баланс и обеспечивать безопасность и комфортность среды для проживания горожан. Уязвимость к растущему антропогенному воздействию определяет долгосрочность функционирования урболандшафтов. Базовым компонентом экосистем являются почвы. В результате городского землепользования почвы претерпевают значительные трансформационные преобразования (механические, физические, химические). Городские почвы и почвенные конструкции должны в полной мере выполнять свои утилитарные функции [1; 2].

Остро стоит проблема загрязнения почв городов тяжелыми металлами. Сценарии трансформации, миграции и транслокации ТМ обусловлены качеством почвенного покрова, т.е. набором базовых параметров, определяющих особенности и модели поведения ТМ в системах «почва-раствор», «почва-растение». Закрепление постепенно и залпово поступающих масс ТМ на геохимических барьерах почв позволяет поддерживать стабильность функционирования экосистем и нивелировать негативное воздействие на окружающую среду в целом [3; 4].

Почвенный покров Курска пестр и разнообразен. Он сочетает в себе как городские почвы, базирующиеся на трансформированных предшественниках различного генезиса, так и фоновые почвы без кардинального антропогенного вмешательства в почвообразовательные процессы. Научкой накоплено определенное количество данных о территориях города с различным характером и степенью загрязнения почв ТМ. Неоднократно отмечалось, что тяжелые металлы – Pb, Cd и Zn считаются приоритетными загрязняющими для почв Курска [5; 6]. Однако данных, касающихся оценки интенсивности техногенной миграции загрязняющих почв тяжелых металлов, на сегодняшний день не столь много.

Миграция ТМ представляет собой конвективный массоперенос растворов в пористой среде, а также соотношение внутренних и внешних факторов миграции, которые определяются, с одной стороны, распре-

делением самого элемента между твердой (инертная форма) и жидкой (растворимая форма) фазами почвы, и, с другой стороны, физико-химическими свойствами и режимами почвенных растворов [7]. Профильное распределение ТМ обусловлено рядом факторов: динамическим химическим равновесием между компонентами почвы [8], физико-химическими свойствами жидкой фазы [9; 10], особенностями водной и биогенной миграции ТМ [11].

Учитывая высокую пространственную неоднородность и временную динамику почвенного компонента техногенных экосистем, оценка интенсивности миграционных процессов ТМ в почвах позволит моделировать устойчивые почвенные конструкции с оптимальным набором факторов ограничивающих миграцию ТМ.

Качественная и количественная оценка протекторных функций различных типов почв Курска позволит приблизиться к решению важнейших практических задач по созданию экологически безопасной городской среды в региональном центре. При разработке и создании почвенных конструкций городских ландшафтов необходимо учитывать не только свойства почв, благоприятствующие вегетации тех или иных видов растений, но и рассматривать моделируемую почвенную конструкцию как динамичную систему, депонирующую и обезвреживающую поступающие поллютанты, в том числе ТМ. Получение большого количества фактических данных о почвенных механизмах детоксикации загрязнений ТМ придаст импульс для разработки и принятия управленческих решений по формированию экологически устойчивых конструкторов.

Целью работы являлась лабораторная оценка особенностей пространственного распределения и миграции тяжелых металлов в модельных профилях почв различного генезиса по изменению электрокинетических свойств в почвенных растворах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались фоновые ненарушенные почвы лесопарковых ландшафтов и материковых пойменных лугов Курской агломерации. Опыт проводился в лабораторных условиях. Исследовалась краткосрочная временная динамика вертикального распределения и миграции внесенных ТМ в модельных почвенных колонках, являющихся имитациями почвенных профилей. Структура моделей лабораторных почвенных колонок представлена в таблице 1.

Таблица 1. Схема моделей почвенных колонок (профилей)

Table 1. Diagram of soil column models (profiles)

№ п/п	Тип почвы, локализация Soil type, location	Модель почвенного профиля / Model Soil profile			Вносимые вещества Introduced substances
		Слой 1 / Layer 1	Слой 2 / Layer 2	Слой 3 / Layer 3	
1	Дерново-подзол песчаный иллювиально-железистый, урочище «Горелый лес» Sod-podzols illuvial-ferruginous, forest park: Gorelii forest	Горизонт АУ гран. состав – песчаный, гумус – 1,7%, pH – 3,2, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon AY granulometric texture – sand, humus – 1,7%, pH – 3,2, bulk	Горизонт Е гран. состав – песчаный, гумус – 0,6%, pH – 3,9, насыпная плотность – 1,5 г/см ³ / Horizon E granulometric texture – sand, humus – 0,6%, pH – 3,9, bulk density	Горизонт Bf гран. состав – песчаный, гумус – 0,1%, pH – 4,6, насыпная плотность – 1,5 г/см ³ / Horizon Bf granulometric texture – sand, humus – 0,1%, pH – 4,6, bulk	Zn(NO ₃) ₂ Pb(NO ₃) ₂ контроль (дист. вода) background (distilled water)

2	Аллювиально- пойменная глееватая, пойма реки Сейм Alluvial gleyic soil, Flood-plain of Seim river	density – 1,2 g/cm ³ Горизонт AU гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 2,0%, pH – 6,1, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AU granulometric texture – medium loam, humus – 2,0%, pH – 6,1, bulk density – 1,1 g/cm ³	– 1,5 g/cm ³ Горизонт AEL гран. состав – легкосуглинистый, гумус – 0,8%, pH – 6,3, насыпная плотность – 1,3 г/см ³ / Horizon AEL granulometric texture – light loam, humus – 0,8%, pH – 6,3, bulk density – 1,3 g/cm ³	density – 1,5 g/cm ³ Горизонт Bg гран. состав – тяжелосуглинистый, гумус – 0,3%, pH – 6,5, насыпная плотность – 1,3 г/см ³ / Horizon Bg granulometric texture – clay loam, humus – 0,3%, pH – 6,5, bulk density – 1,3 g/cm ³	Zn(NO ₃) ₂ Pb(NO ₃) ₂ контроль (дист. вода) background (distilled water)
		Горизонт AU гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 5,8%, pH – 6,6, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AU granulometric texture – medium loam, humus – 5,8%, pH – 6,6, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт AB гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 2,9%, pH – 6,6, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AB granulometric texture – medium loam, humus – 2,9%, pH – 6,6, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт Bcah гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 0,5%, pH – 6,9, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon Bcah granulometric texture – medium loam, humus – 0,5%, pH – 6,9, bulk density – 1,2 g/cm ³	
		Горизонт AU гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 4,5%, pH – 5,2, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AU granulometric texture – medium loam, humus – 4,5%, pH – 5,2, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт AB гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 1,3%, pH – 5,9, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon AB granulometric texture – medium loam, humus – 1,3%, pH – 5,9, bulk density – 1,2 g/cm ³	Горизонт Bh гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 0,3%, pH – 4,0, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon Bh granulometric texture – medium loam, humus – 0,3%, pH – 4,0, bulk density – 1,2 g/cm ³	
		Горизонт AU гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 4,5%, pH – 5,2, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AU granulometric texture – medium loam, humus – 4,5%, pH – 5,2, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт AB гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 1,3%, pH – 5,9, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon AB granulometric texture – medium loam, humus – 1,3%, pH – 5,9, bulk density – 1,2 g/cm ³	Горизонт Bh гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 0,3%, pH – 4,0, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon Bh granulometric texture – medium loam, humus – 0,3%, pH – 4,0, bulk density – 1,2 g/cm ³	
3	Чернозем выщелоченный, лесомелиоративная полоса в южной части пригорода Курска Leached Chernozem, a forest melioration strip in the southern part of the Kursk suburbs	Горизонт AU гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 5,8%, pH – 6,6, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AU granulometric texture – medium loam, humus – 5,8%, pH – 6,6, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт AB гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 2,9%, pH – 6,6, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AB granulometric texture – medium loam, humus – 2,9%, pH – 6,6, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт Bcah гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 0,5%, pH – 6,9, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon Bcah granulometric texture – medium loam, humus – 0,5%, pH – 6,9, bulk density – 1,2 g/cm ³	Zn(NO ₃) ₂ Pb(NO ₃) ₂ контроль (дист. вода) background (distilled water)
4	Темно-серая типичная, урочище «Знаменская роща» Dark-grey typical soil, forest park : Znamen-skaya Grove	Горизонт AU гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 4,5%, pH – 5,2, насыпная плотность – 1,1 г/см ³ / Horizon AU granulometric texture – medium loam, humus – 4,5%, pH – 5,2, bulk density – 1,1 g/cm ³	Горизонт AB гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 1,3%, pH – 5,9, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon AB granulometric texture – medium loam, humus – 1,3%, pH – 5,9, bulk density – 1,2 g/cm ³	Горизонт Bh гран. состав – среднесуглинистый, гумус – 0,3%, pH – 4,0, насыпная плотность – 1,2 г/см ³ / Horizon Bh granulometric texture – medium loam, humus – 0,3%, pH – 4,0, bulk density – 1,2 g/cm ³	Zn(NO ₃) ₂ Pb(NO ₃) ₂ контроль (дист. вода) background (distilled water)

Предварительно просеянные через сито 2 мм воздушно-сухие образцы почв помещались в плотные полиэтиленовые сосуды диаметром 8 см. Мощность каждого моделируемого генетического горизонта составляла 6 см. В почвенные колонки с интервалом в 2 см устанавливались электроды из нержавеющей стали сечением 0,75 мм.

В опыте произведена попытка воссоздания климатического сценария июля 2018 года, при котором на территории Курска за 2 недели выпало около 180 мм осадков. При проведении лабораторного опыта моделируемые осадки распределялись неравномерно – 1-8 сутки – 80%, 9-12 сутки – 20%. Монометаллическое загрязнение почв осуществлялось путем ежедневного внесения растворенных Pb(NO₃)₂ и Zn(NO₃)₂ в суммарных дозах, соответствующих 4 ПДК по каждому ТМ. Контрольные почвенные колонки поливались равными объемами дистиллированной воды (табл. 1).

Ежесуточно после полива почвенных колонок послойно замерялось электрическое сопротивление с использованием аналогового омметра. Производился расчет электропроводности (ЕС) для каждого слоя. Динамику миграции ТМ и их распределение в системе «почва – раствор ТМ» оценивали по отклику электрокинетических кривых $EC_{загр}/EC_{контроль} = y(x, t)$, полученных на загрязненных ($EC_{загр}$) и незагрязненных ($EC_{контроль}$) моделях почвенного профиля, т.е. по характеристике изменения содержания ионных форм металлов в равновесном почвенном растворе по глубине (x) и по времени (t) [7].

Способность почв к извлечению ионов свинца и цинка из вносимого загрязненного фильтрационного раствора оценивали по отношению величин удельного электрического сопротивления (R) элюентов (лизиметрических вод) незагрязненного (контрольного) модельного почвенного профиля ($R_{контроль}$) к загрязненному ($R_{загр}$) на 12 сутки опыта.

Диагностика и классификация почв проводились согласно современным представлениям [12; 13]. Отбор проб почв проводился согласно ГОСТ 17.4.4.02-84. При обработке данных по электропроводности применяли методы математической статистики и использовали средства пакета Microsoft Office Excel.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подзол песчаный иллювиально-железистый имел преимущественно аккумулятивный характер распределения Zn. В течение всего расчетного периода исследования концентрация ионов Zn в почвенном растворе горизонта АУ (0-6 см) возрастала и на 10-12 сутки достигала своего максимума в слое 0-2 см. В подзолистом горизонте Е формировалась зона выноса элемента, где загрязнение равновесного почвенного раствора минимально или вовсе отсутствует. Постепенное увеличение количества Zn в почве, происходящее в результате его ежедневного внесения с поливающим раствором, а также уменьшение интенсивности промывного режима на 8 сутки приводило к образованию в иллювиально-железистом модельном горизонте подзола песчаного зоны загрязнения. Это обусловлено резкой контрастной сменой почвенных параметров модельного профиля,

тормозящих миграцию ТМ (повышение pH_{KCl} и содержания железистых минералов (рис. 1А).

При загрязнении почв свинцом его концентрации в почвенном растворе модельной почвенной колонки повышались по всему профилю. Отчетливых зон выноса элемента не наблюдалось. В течение первых двух суток ионы свинца достигали нижней границы модельного почвенного профиля (18 см). Более значимому загрязнению подвергались гумусово-аккумулятивный и подзолистый горизонты. При снижении интенсивности промывного режима в 8-12 сутки экспозиции опыта, отмечался стабильный рост загряз-

нения почвенного раствора гумусово-аккумулятивного горизонта ионами Pb^{2+} , на 10-12 сутки фиксировался рост загрязненности почвенного раствора уже на границе подзолистого и иллювиально-железистого горизонтов (рис. 1А).

В динамике, для изучаемого типа почв при исследуемом уровне загрязнения и объеме промывного режима характерна отчетливая вертикальная миграция свинца и цинка, интенсивность которой пропорциональна количеству поступающих в почву поллютантов (Pb, Zn) (рис. 1).

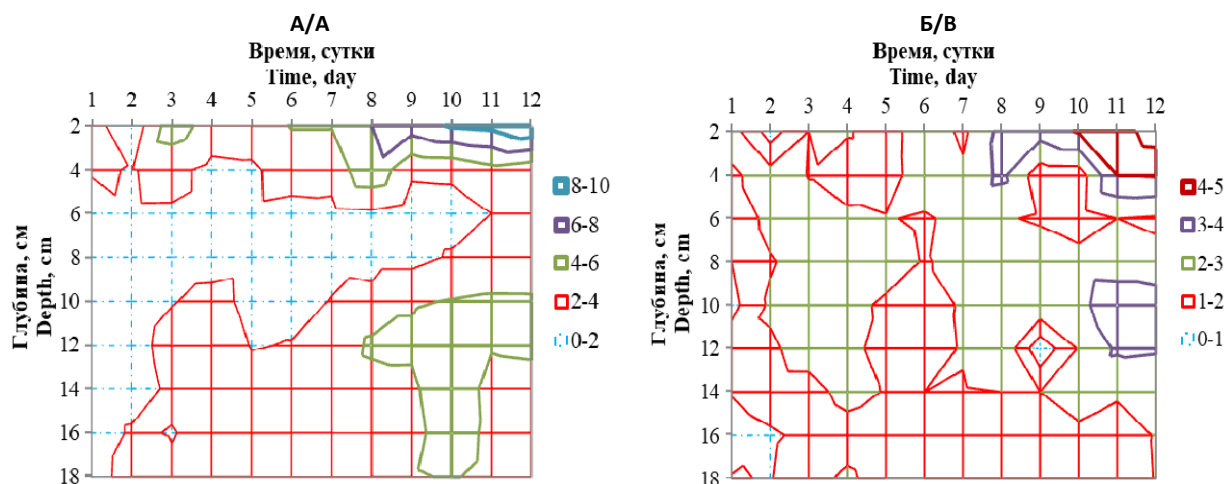


Рисунок 1. Временная динамика и пространственное распределение подвижных форм тяжелых металлов в модельном профиле дерново-подзола песчаного иллювиально-железистого (AY–E–B), загрязненного раствором $Zn(NO_3)_2$ – (А), раствором $Pb(NO_3)_2$ – (Б)

Figure 1. The temporal dynamics and spatial distribution of mobile forms of heavy metals in the model profile of sod-podzol illuvial-ferruginous soil (AY – E – B) contaminated with $Zn(NO_3)_2$ – (A) solution, $Pb(NO_3)_2$ – (B) solution

В модельном почвенном профиле аллювиально-пойменной глееватой среднесуглинистой почвы в течение первых трех суток загрязнение Zn охватывало все горизонты, формируя небольшие зоны аккумуляции ионов на границах модельных горизонтов AU/ABEL и ABEL/Bg. Это может объясняться перераспределением ионов цинка между жидкой и твердой фазой, происходящей за счет резкой смены факторов сорбции металла на геохимических барьерах. При дальнейшем увеличении количества Zn в почве формируется 2 зоны загрязнения. В большей степени металл накапливается в гумусово-аккумулятивном горизонте (0-6 см) и верхнем слое гумусово-элювиального горизонта (6-8 см), под которыми проявляется зона выноса металла. Вторая зона загрязнения располагалась в нижнем слое оглеенного иллювиального горизонта. Аккумуляция цинка в указанных зонах происходила за счет сорбции металла органическим веществом почв в горизонте AU, а также за счет изменения окислительно-восстановительных условий и сорбции на глинистых минералах в горизонте Bg. Вынос элемента в горизонте ABEL объясняется более легким гранулометрическим составом и, соответственно, высокой скоростью фильтрации вносимых растворов (рис. 2А).

Свинец в данном варианте опыта проявлял себя как исключительный органофил – элемент, обладающий высокой степенью сродства к сорбции на гумусовом геохимическом барьере. На протяжении всего расчет-

ного периода исследования основная часть внесенного загрязняющего элемента депонировалась в гумусово-аккумулятивном горизонте. Однако наблюдалась некоторая «разгрузка» сорбционных центров темно-гумусового горизонта (AU), в результате которой массы металла выносились в нижележащие горизонты, формируя там временные «островки» загрязнения в 1, 2-5 и 9-11 сутки (рис. 2Б).

Чернозем выщелоченный среднесуглинистый в модельных условиях проявлял значительную способность к сорбции загрязняющих элементов Pb и Zn и имел однотипные характеристики распределения изучаемых ионов в модельном почвенном профиле. Отклик электрокинетических кривых изучаемых ТМ свидетельствовал о формировании незагрязненной зоны в гумусово-аккумулятивном горизонте, что, по-видимому, обусловлено относительно высоким содержанием (5,8%) и качественным составом гумуса. Поступающие в почву ТМ, вероятно, прочно закреплялись органическим веществом горизонта AU чернозема выщелоченного в результате образования комплексных соединений ионов ТМ с гуминовыми веществами. Загрязнение почвенного раствора свинцом и цинком охватывало генетические горизонты AB и Bcah. Также на границе данных горизонтов в 8 и 10 сутки расчетного периода формировалась зона выноса Pb и Zn, что обусловлено резкой сменой кислотно-основных условий (повышение pH_{KCl}) в иллювиальном горизонте (рис. 3А, Б).

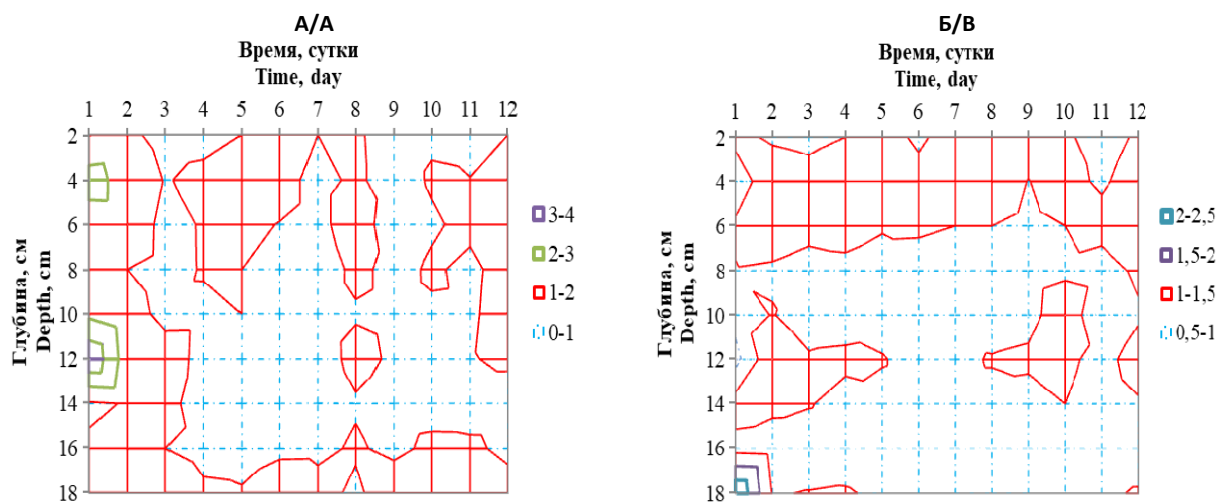


Рисунок 2. Временная динамика и пространственное распределение подвижных форм тяжелых металлов в модельном профиле аллювиально-пойменной глееватой среднесуглинистой почвы (AU–AEI–Bg), загрязненного раствором $Zn(NO_3)_2$ – (А) раствором $Pb(NO_3)_2$ – (Б)

Figure 2. Temporal dynamics and spatial distribution of mobile forms of heavy metals in the model profile of alluvial gleyic medium loamy soil (AU – AEI – Bg) contaminated with a solution of $Zn(NO_3)_2$ – (A) with a solution of $Pb(NO_3)_2$ – (B)

Чернозем выщелоченный среднесуглинистый в модельных условиях проявлял значительную способность к сорбции загрязняющих элементов Pb и Zn и имел однотипные характеристики распределения изучаемых ионов в модельном почвенном профиле. Отклик электрокинетических кривых изучаемых ТМ свидетельствовал о формировании незагрязненной зоны в гумусо-аккумулятивном горизонте, что, по-видимому, обусловлено относительно высоким содержанием (5,8%) и качественным составом гумуса. Поступающие в почву

ТМ, вероятно, прочно закреплялись органическим веществом горизонта AU чернозема выщелоченного в результате образования комплексных соединений ионов ТМ с гуминовыми веществами. Загрязнение почвенного раствора свинцом и цинком охватывало генетические горизонты AB и Bcah. Также на границе данных горизонтов в 8 и 10 сутки расчетного периода формировалась зона выноса Pb и Zn, что обусловлено резкой сменой кислотно-основных условий (повышение pH_{KCl}) в иллювиальном горизонте (рис. 3А, Б).

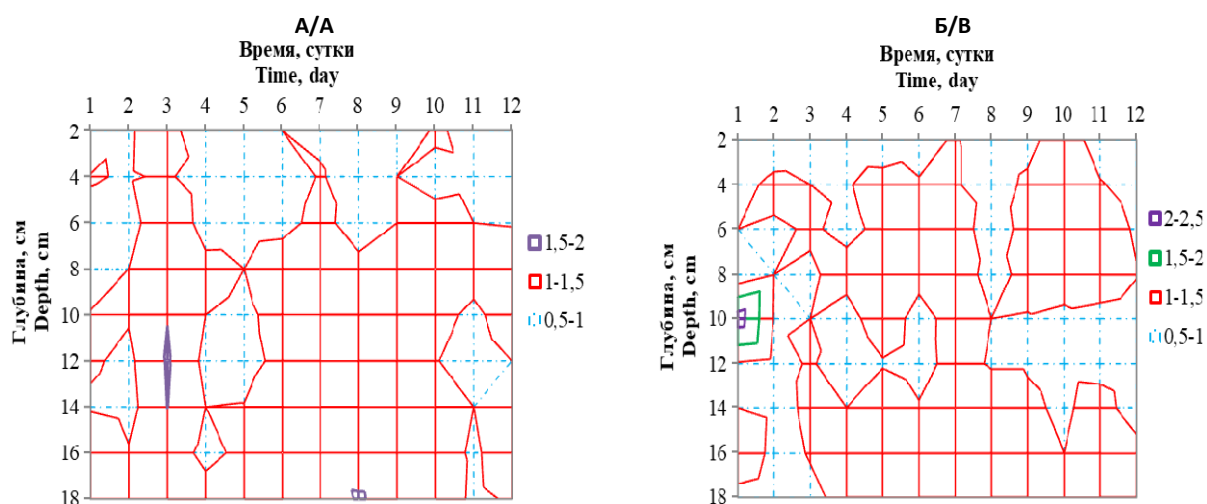


Рисунок 3. Временная динамика и пространственное распределение подвижных форм тяжелых металлов в модельном профиле чернозема выщелоченного среднесуглинистого (AU–AB–Bcah), загрязненного раствором $Zn(NO_3)_2$ – (А) раствором $Pb(NO_3)_2$ – (Б)

Figure 3. The temporal dynamics and spatial distribution of mobile forms of heavy metals in the model profile of leached chernozem medium loamy soil (AU – AB – Bcah) contaminated with $Zn(NO_3)_2$ – (A) solution with $Pb(NO_3)_2$ – (B) solution

Темно-серая типичная почва имела более высокую кислотность среды ($pH_{\text{КС}}=5,2$) по сравнению с черноземом при содержании гумуса 4,5%. В условиях модельного загрязнения в темно-гумусовом горизонте возникала нестабильность в распределении ионов цинка и свинца между жидкой и твердой фазой почвы, что отражается чередованием периодов загрязнения/не загрязнения гумусово-аккумулятивных горизонтов на пространственно-временных диаграммах (рис. 4А, 4В).

Отчетливо-выраженная зона аккумуляции Zn возникает в горизонте Bt уже на 6 сутки экспозиции опыта. Стоит отметить, что при снижении интенсивности промывного режима «размазанность» зоны загрязнения снижается и составляет мощность 10-16 см. На 6 сутки зона загрязнения охватывала глубину модельного почвенного профиля с 9 до 18 см и имела локально-

повышенный отклик на границе горизонтов AB–Bh (рис. 4А). Зоны аккумуляции свинца дискретны, их возникновения эфимерны и локализованы в горизонтах AB и Bh.

При анализе отклика удельного электрического сопротивления лизиметрических вод контрольных и загрязненных почв установили, что модельный профиль темно-серой типичной почвы отличался наименьшей способностью к извлечению ионов свинца из загрязненного почвенного раствора (табл. 2).

Наименьшая сорбционная способность по отношению к цинку характерна для профиля дерново-подзола песчаного иллювиально-железистого. Максимальная способность закреплять изучаемые ТМ (Zn, Pb) выявлялась у чернозема выщелоченного среднесуглинистого (табл. 2).

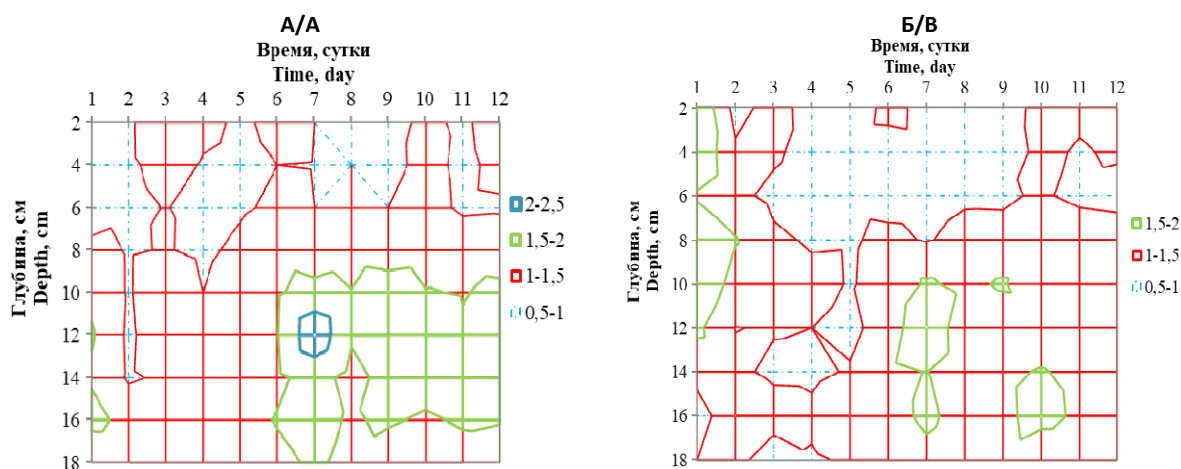


Рисунок 4. Временная динамика и пространственное распределение подвижных форм тяжелых металлов в профиле темно-серой типичной среднесуглинистой почвы (AU–AB–Bh), загрязненного раствором $Zn(NO_3)_2$ – (А) раствором $Pb(NO_3)_2$ – (Б)

Figure 4. Temporal dynamics and spatial distribution of mobile forms of heavy metals in the profile of dark-gray typical medium loamy soil (AU – AB–Bh) contaminated with a solution of $Zn(NO_3)_2$ – (A) with a solution of $Pb(NO_3)_2$ – (B)

Таблица 2. Зависимость отношения величин удельного электрического сопротивления (R) элюентов (лизиметрических вод) не загрязненного (контрольного) модельного почвенного профиля ($R_{\text{контроль}}$) к загрязненному ($R_{\text{загрязнение}}$) от типа почв

Table 2. The dependence of the ratio of the values of electrical resistivity (R) of eluents (lysime tric waters) not contaminated (background) model soil profile ($R_{\text{background}}$) to polluted ($R_{\text{contamination}}$) on the soil type

Элемент Element	Дерново-подзол- песчаный иллюви- ально-железистый Sod-podzols illuvial-ferruginous	Аллювиально- пойменная глееватая среднесуглинистая Alluvial gleyic medium loamy soil	Чернозем выщелоченный среднесуглинистый Leached chernozem medium loamy soil	Темно-серая типичная среднесуглинистая Dark-gray typical medium loamy soil
Zn	5,2	3,1	1,8	4,7
Pb	1,8	1,7	1,4	2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика и кинетика свинца и цинка в рассмотренных почвах Курской агломерации имеют существенные отличия и зависят от ряда почвенных факторов. Определяющим условием снижения миграции и закрепления ТМ является оптимальное сочетание почвенных факторов – содержание органического вещества, кислотно-основные условия, гранулометрический состав. В

изучаемых почвах характер пространственного распределения и интенсивность миграции свинца и цинка была обусловлена показателями емкости и контрастности внутрипочвенных геохимических барьеров. Накопление ТМ, а, следовательно, и торможение процессов вертикальной миграции Pb и Zn в почвах изучаемых модельных профилей отмечается как в гумусированных гумусово-аккумулятивных генетических горизонтах, так

и в минеральных горизонтах с высокой контрастностью кислотно-основных и окислительно-восстановительных условий. Зоны выноса свинца и цинка формируются при значимом укрупнении гранулометрического состава и снижении показателя pH_{KCl} .

Загрязненность лизиметрических вод характеризует способность почвенного профиля извлекать ТМ из почвенного раствора и закреплять их на твердой фазе почв. По качеству выполнения протекторной функции и способности препятствовать миграции свинца почвы Курской агломерации, рассмотренные в данной работе, располагаются в убывающем ряду – чернозем выщелоченный > аллювиально-пойменная глееватая почва > дерново-подзол песчаный иллювиально-железистый > темно-серая типичная почва. По способности препятствовать миграции цинка – чернозем выщелоченный > аллювиально-пойменная глееватая почва > темно-серая типичная почва > дерново-подзол песчаный иллювиально-железистый.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4086.2018.5.

ACKNOWLEDGMENT

The research was carried out with support of a Grant of the President of the Russian Federation for Young Russian Scientists – Candidates of Sciences МК-4086.2018.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шоба С.А., Яковлев А.С., Рыбальский Н.Г. Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель. М.: НИИ-Природа, 2013. 310 с.
- Неведров Н.П., Проценко Е.П., Фомина М.Ю. Экологическая оценка почв ландшафтно-геохимических катен Сеймского округа г. Курска // Экология урбанизированных территорий. 2017. N 3. С. 18-26.
- Langer M. The role of geological barrier in waste disposal projects // Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 23-27 June 1997. A.A. Balkema, 2001. V. 4. P. 3617-3635.
- Imperato M., Adamo P., Naimo D., Arienzo M., Stanzone D., Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) // Environmental Pollution. 2003. V. 124. Iss. 2. P. 247-256. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00478-5
- Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Glebova I.V. The relationship between bulk and mobile forms of heavy metals in soils of Kursk // Eurasian Soil Science. 2018. V. 51. P. 112-119. DOI: 10.1134/S106422931801012X
- Неведров Н.П. Количественная оценка состояния внутрипочвенных геохимических мезобарьеров города Курска // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. N 4. С. 97-107. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-97-107
- Груздков Д.Ю., Ширкин Л.А., Трифонова Т.А. Оценка миграции тяжелых металлов в почвах // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2009. N 4. С. 40-45
- Alloway B.J., Ayres D.C. Chemical principles of environmental pollution. Oxford, 1993. 293 p.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрейя-2000, 1999. 763 с.
- Vernet J.P. Heavy metals in the environment. N.Y., 1991. 379 p.
- Трегубов О.Д. Геохимические барьеры в почвах и ландшафтах анадырской тундры // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. N 3. С. 70-79.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Ойкумена, 2004. 342 с.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. М.: Почвенный ин-т им В.В. Докучаева, 2014. 768 с.

REFERENCES

- Shoba S.A., Yakovlev A.S., Rybalsky N.G. *Ekologicheskoe normirovanie i upravlenie kachestvom pochv i zemel'* [Ecological standardization and quality management of soils and lands]. Moscow, NIA-Nature Publ., 2013, 310 p. (In Russian)
- Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Fomina M.Yu. Ecological assessment of soils in the landscape-geochemical catena of the Seimsky district of Kursk. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii* [Ecology of Urban Areas]. 2017, no. 3, pp. 18-26. (In Russian)
- Langer M. The role of geological barrier in waste disposal projects. Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 23-27 June 1997. A.A. Balkema, 2001, vol. 4, pp. 3617-3635.
- Imperato M., Adamo P., Naimo D., Arienzo M., Stanzone D., Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 2003, vol. 124, iss. 2, pp. 247-256. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00478-5
- Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Glebova I.V. The relationship between bulk and mobile forms of heavy metals in soils of Kursk. *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, pp. 112-119. DOI: 10.1134/S106422931801012X
- Nevedrov N.P. Quantitative assessment of the condition of subsoil geochemical mesobarriers in Kursk. *South of Russia: ecology, development*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 97-107. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-97-107
- Gruzdkov D.Yu., Shirkin L.A., Trifonova T.A. Estimation of heavy metals migration. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie* [Moscow University Bulletin. Series 17, Soil science]. 2009, no. 4, pp. 40-45. (In Russian)
- Alloway B.J., Ayres D.C. Chemical principles of environmental pollution. Oxford, 1993, 293 p.
- Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999, 763 p. (In Russian)
- Vernet J.P. Heavy metals in the environment. N.Y., 1991, 379 p.
- Tregubov O.D. Geochemical barriers in soils and landscapes of the Anadyr tundra. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5, Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]. 2017, no. 3, pp. 70-79. (In Russian)

12. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Soil classification and diagnostics in Russia]. Oikumena, 2004, 342 p. (In Russian)

13. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0]. Moscow, Soil Institute named after V.V. Dokuchaev Publ., 2014, 768 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Николай П. Неведров выполнил все полевые и лабораторные исследования, написал статью. Автор несет ответственность за плагиат и самоплагиат.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Nikolay P. Nevedrov has undertaken all field and laboratory researches and has written the article. The author are responsible for plagiarism and self-plagiarism.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The author states that there is no conflict of interest.

ORCID

Николай П. Неведров / Nikolay P. Nevedrov <https://orcid.org/0000-0003-1121-0671>