



## МИГРАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТАХ

Татьяна Н. Крамарева<sup>1</sup> ✉, e-mail: kramarewa@mail.ru, 0000-0001-7363-1215

Надежда С. Горбунова<sup>2</sup>, e-mail: vilian@list.ru, 0000-0002-7986-8106

Елена В. Куликова<sup>3</sup>, e-mail: melior-agronomy@inbox.ru, 0000-0002-3106-7422

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

Применение полезащитных лесных насаждений в лесостепной и степной зонах Центрально-Черноземного региона является эффективным мелиоративным приемом. Лесные полосы снижают скорость ветра, уменьшают вредное воздействие суховея. Важной особенностью лесополос является накопление и равномерное распределение снега на полях. Это приводит к улучшению водного баланса, а вместе с тем и к трансформации почв. Согласно полученным данным, выявлено существенное достоверное изменение черноземов под влиянием лесных полос в условиях Каменной степи. В черноземах под лесной растительностью произошло изменение морфологических признаков, содержания гумуса, pH почвенного раствора. Такая трансформация повлекла за собой изменение и в валовом содержании ТМ и их обменных соединений. Под древесными культурами происходят изменения в профилном перераспределении исследуемых ТМ. Корреляционный анализ выявил тесную связь в распределении pH, гумуса, валовом содержании и обменных соединений ТМ. Вариационный анализ пространственной неоднородности полученных данных показал существенные различия исследуемых показателей между пашней и лесополосой. Происходит закономерное уменьшение коэффициента вариации от лесополосы к пашне. Данное явление происходит благодаря тому, что в процессе распашки перемешивание почвенной массы и выравнивание пространственных различий в содержании гумуса, pH, а также валовом содержании и обменных соединений ТМ. В лесополосе почвенные условия определяются характером растительности, которая вносит различия.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, никель, свинец, кадмий, валовое содержание, обменные соединения, лесополоса, черноземы обыкновенные


**Благодарности:** Авторы выражают благодарности рецензентам за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Крамарева Т. Н. Миграционные особенности тяжелых металлов в лесных ландшафтах // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 68–78. – Библиогр.: с. 76–78 (14 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6>.

**Поступила:** 10.11.2021 **Принята к публикации:** 22.12.2021 **Опубликована онлайн:** 30.12.2021

## MIGRATION FEATURES OF HEAVY METALS IN FOREST LANDSCAPES

Tatyana N. Kramareva<sup>1</sup> ✉, e-mail: kramarewa@mail.ru,  0000-0001-7363-1215

Nadezhda S. Gorbunova<sup>2</sup>, e-mail: vilian@list.ru,  0000-0002-7986-8106

Elena V. Kulikova<sup>3</sup>, e-mail: melior-agronomy@inbox.ru,  0000-0002-3106-7422

<sup>1</sup> FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation

<sup>2</sup> FSBEI HE Voronezh State University, 394036, 1 Universitetskaya square, 1, Voronezh, Russia

<sup>3</sup> FSBEI HE Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, 394087, 1 Michurina street, Voronezh, Russia

### Abstract

The use of field-protective forest plantations in the forest-steppe and steppe zones of the Central Black Earth region is an effective reclamation technique. Forest belts reduce wind speed, reduce the harmful effects of dry winds. An important feature of forest belts is the accumulation and uniform distribution of snow in the fields. This leads to an improvement in the water balance, and at the same time to the transformation of soils. According to the data obtained, a significant reliable change in chernozems under the influence of forest belts in the conditions of the Kamennaya Steppe was revealed. There was a change in morphological characteristics, humus content, pH of the soil solution in chernozems under forest vegetation. This transformation entailed a change in the total content of HMs and their exchange compounds. There are changes in the profile redistribution of the studied HMs under tree crops. Correlation analysis revealed a close relationship in the distribution of pH, humus, total content, and exchangeable HM compounds. Variational analysis of the spatial heterogeneity of the data obtained showed significant differences in the studied indicators between arable land and forest belt. There is a natural decrease in the coefficient of variation from the forest belt to arable land. This phenomenon occurs due to the fact that (in the process of plowing) mixing of the soil mass and leveling of spatial differences in the content of humus, pH, as well as the gross content and exchange compounds of HMs takes place. In the forest belt, soil conditions are determined by the vegetation, which makes the difference.

**Keywords:** heavy metals, nickel, lead, cadmium, gross content, exchangeable compounds, forest belt, ordinary chernozems

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the reviewers for their contributions to the peer review of the article.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interest.

**For citation:** Kramareva T.N. Migration features of heavy metals in forest landscapes. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 68-78 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6>.

**Received:** 10.11.2021 **Revised:** 01.12.2021 **Accepted:** 22.12.2021 **Published online:** 30.12.2021

### Введение

Лесные экосистемы играют важную роль в биогеохимической циркуляции многих элементов, в том числе и тяжелых металлов (ТМ) [5, 6]. Растения лесополос эффективно перехватывают аэрозоли и оседающие взвеси твердых веществ из дождя,

снега, града, пыли. Данное положение подтвердилось экспериментально [9, 10, 13]. Выпадение некоторых элементов в лесу может в 5-6 раз превышать соответствующий показатель для открытых пространств [12]. Положительная мелиоративная роль лесных полос была научно обоснована еще

В.В. Докучаевым. Им же были спроектированы и реализованы первые агролесомелиоративные мероприятия, в том числе и на территории Каменной степи, где проводились наши исследования. В дальнейшем много научных публикаций было посвящено исследованию трансформации почвенного покрова под воздействием лесополос. Отмечается усиление биологического круговорота под действием лесной растительности [2, 7]. Полезащитные лесонасаждения увеличивают урожайность сельскохозяйственных культур, за счет улучшения водного баланса. Неоспоримо положительное влияние лесополос на процессы эрозии [10, 14]. Необходимо отметить роль древесных насаждений в связывании углерода углекислого газа, что приводит к уменьшению парникового эффекта [1]. Лесные полосы стали неотъемлемой частью ландшафта, выполняя его экологические функции [3, 4]. Известно, что в почвах под лесополосами создаются благоприятные условия для гумусонакопления благодаря постоянному поступлению в почву органического вещества в виде обилия отмерших корней, опада веток и листьев. Такие кардинальные изменения в почвенных процессах обязательно будут сопровождаться трансформацией морфологических, физических, физико-химических, химических, а также биологических свойств почв. Отмечается достоверное отличие почв лесополосы от пашни по таким физическим параметрам как плотность сложения, запасы ила и физической глины. В публикациях описывается трансформация гумуса [11], изменение микробной биомассы, дыхательной активности, азотфиксации [1].

Почвы, формирующиеся в однотипных условиях могут достоверно трансформироваться под влиянием лесополос [11]. В литературе, в том числе и зарубежной, очень мало информации о том, как происходит циркуляция тяжелых металлов между растениями и почвой и каков их баланс в лесных экосистемах [12]. Поэтому целью настоящей работы явилось изучение особенностей накопления и внутрипрофильного распределения ТМ (Ni, Pb, Cd) под разновозрастными лесными насаждениями Каменной степи, состоящими из различных древесных пород. Особенностью объекта исследования

является то, что Каменная степь расположена вдали от всех антропогенных источников загрязнения.

### Материалы и методы

Исследования проводились на территории землепользования ФГБНУ «Каменно-Степное опытное лесничество» (Таловский район Воронежской области). Объектами исследований послужили черноземы обыкновенные среднегумусные средне-мощные тяжелосуглинистые, залегающие под разными секциями древесных пород лесной полосы № 211 и на примыкающей к ней пашне. Лесная полоса № 211 была заложена в 1959 году, ее длина составляет 850 м, а ширина 22 м. Лесная полоса представлена секциями с различными древесными породами: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ldb.), географические координаты (N, °51,050917; E, °40,746058) клен остролистный (*Acer platanoides* L.) – (N, ° 51,050580; E, °40,748916), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – (N, ° 51,051847; E, ° 40,739985) и береза бородавчатая (*Betula verrucosa* Ehrh) – (N, ° 51,051302; E, ° 40,743098). В каждой секции лесной полосы и на примыкающей к ней пашни (N, ° 51,052328; E, ° 40,747665) были заложены почвенные разрезы до глубины вскрытия почвообразующих пород, в качестве которых выступают покровные карбонатные тяжелые суглинки и глины.

Образцы почв из разрезов отбирались послойно каждые 10 см, в них определялись рН водной суспензии потенциометрическим методом на микропроцессорном иономере марки И-160МИ (Aquilon, Moscow, Russia), содержание гумуса по общепринятым методикам [8] с применением электронных аналитических весов HR-100ARG, лабораторной посуды и реактивов фирмы (Vekton, St. Petersburg, Russia). Среди ТМ исследовались Ni, Pb, Cd. Валовое содержание ТМ определяли спеканием почвы с карбонатом натрия в муфельной печи SNOL (Umega, Lithuania), дальнейшей обработкой HNO<sub>3</sub> (1:1) и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (конц.), реактивы фирмы (Vekton, St. Petersburg, Russia). По мнению И.О. Плехановой, О.А. Золотаревой, И.Д. Тарасенко, А.С. Яковлева валовое содержание ТМ не дает исчерпывающие знания об экологической ситуации, а также о влиянии их на растения [5]. Для этого необходимо иметь информацию о подвижных соеди-

нениях, доступных для растений. Поэтому извлечение обменных соединений элементов из почвы, проводилось ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с  $pH=4,8$  в соотношении 1: 10 [9]. Конечное определение ТМ проводилось на спектрометре КВАНТ–Z.ЭТА ЭТА (Kortek, Moscow, Russia) атомно-абсорбционным методом. Вариационно-статистическая обработка полученных аналитических данных проводилась с использованием программ STATISTICA 10 и Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

Полученные результаты по содержанию гумуса в черноземах обыкновенных пашни свидетельствуют, что интенсивное сельскохозяйственное использование почв приводит к усилению процессов минерализации. Происходит интенсивный вынос питательных элементов с урожаем сельскохозяйственных культур. Описанные явления приводят к потере органического вещества. Количество гумуса в гумусовом горизонте черноземов обыкновенных пашни не превышает 5,6 %, что относит почвы к малогумусным. Для черноземов расположенных под лесополосой, характерно увеличение содержания гумуса до  $6,7\pm 0,55$  %, черноземы диагностируются как среднегумусные.

Содержание гумуса и его формы всегда являются не только отражением жизни почвенных организмов, но и определяется динамическим характером гумусообразования. Данный процесс определяется интенсивностью биологического круговорота, на который влияет развитие растительности [7]. Данное положение подтверждается нашими исследованиями. Так максимальное содержание гумуса в черноземах Каменной степи отмечается в 0–10 см слое под кленом ( $7,01\pm 0,37\%$ ), минимальное под пашней ( $5,28\pm 0,42\%$ ). Потеря органического вещества из пахотных почв связана с процессами его усиленной минерализации в результате распашки. Кроме того, ежегодный вынос элементов питания с урожаем не в полной мере восполняется внесением органических удобрений. Что в последствие приводит к значительным потерям гумуса. Отмечается достоверная потеря гумуса из верхнего слоя пашни по сравнению с лесополосой. Вниз по профилю всех исследуемых участков происходит плавное снижение содержания органического ве-

щества. В почвообразующей породе оно не превышает  $0,11\pm 0,05\%$ . Как подчеркивают О.Г. Чертов и М.А. Надпорожская в своей работе [7] различный древостой влияет на формы гумуса. Наши исследования подтвердили достоверное влияние различных видов древесной растительности влияют на гумусное состояние черноземов. Содержание гумуса в черноземах обыкновенных под древесной растительностью в условиях Каменной степи, убывает в следующем ряду: почвы под кленом ( $7,01\pm 0,37\%$ ) > березой ( $6,75\pm 0,11\%$ ) > лиственницей ( $6,46\pm 0,12\%$ ) > сосной ( $6,13\pm 0,23\%$ ). В результате воздействия водных растворов лесного опада и хвойных подстилок происходит десорбция органических веществ из твердой фазы. В более подвижном состоянии они способны мигрировать в нижние горизонты почвенного профиля. Данным положением объясняется более мощный гумусовый горизонт в черноземах обыкновенных под древесными породами лесополосы. Под лиственницей и кленом мощность достигает 70 см, под березой 61 см, сосной 55 см, а в почвах под пашней сокращается до 50 см.

Для черноземов под пашней и лесополосой характерны различия в режимах миграции карбонатных соединений. В лесополосе формируются сравнительно прохладные микроклиматические условия, благодаря задержанию влаги. Задержанная влага способна мигрировать по почвенному профилю, что приводит к перемещению карбонатного горизонта в более глубокие слои. Так, в черноземах под пашней граница карбонатных новообразований диагностируется на глубине 43 см. Под древесными породами лесополосы линия вскипания опускается до глубины 62 см. Максимальная глубина, до которой опустились карбонаты, составляет 71 см. Она была зафиксирована под культурой сосны. Такое явление, возможно, связано со спецификой корневых выделений сосны. Корневые выделения древесных пород имеют слабокислый характер, что сказалось на  $pH$  почвенного раствора. И если в пахотных почвах реакция среды нейтральная ( $pH=7,01\pm 0,57$ ), то в черноземах под лесополосой, она становится слабокислой и уменьшается в следующей последовательности: ( $pH=6,81\pm 0,83$ ) лиственница > ( $pH=6,72\pm 0,21$ ) клена > ( $pH=6,62\pm 0,56$ )

береза > (рН=6,41±0,41) сосна. Помимо процессов выщелачивания, в условиях лесополосы отмечается влияние биологического фактора. Кислые выделения корневых систем древесных растений вносят дополнительную нагрузку в выщелачивание карбонатов.

Статистический анализ полученных данных содержания гумуса и рН среды по определению пространственных различий между пашней и лесополосой в Каменной степи показал закономерное уменьшение коэффициента вариации V от 20±5,3% (лесополоса) до 9±1,7% (пашня). Такое явление объясняется тем, что распашка приводит к выравниванию пространственных различий исследуемых почвенных свойств. В лесополосе на почвенные условия оказывает влияние растительность, которая вносит различия. Идентичная закономерность отмечается и в работе [11].

Полученные данные по валовому содержанию Ni в исследуемых черноземах обыкновенных близко к кларкам почв и литосферы, которые составляют 40 и 58 мг/кг соответственно [5]. Согласно полученным данным отмечается закономерное увеличение валового содержания металла вниз к почвообразующей породе (рис. 1). Коллоиды и илистые частицы обладают большой сорбционной способностью к тяжелым металлам, в том числе и к Ni. Особенностью исследуемых карбонатных покровных глин является высокое содержание в них илистой и коллоидной фракций. Растительный покров также оказывает влияние на накопление и распределение металла. В верхнем 0-10 см слое валовое содержание Ni уменьшается в ряду (рис.1): клен (47,9±1,23 мг/кг) > береза (45,4±1,47 мг/кг) > пашня (43,2±1,78 мг/кг) > лиственница (33,0±1,11 мг/кг) > сосна (32,5±1,07 мг/кг).

Металл способен образовывать органоминеральные комплексные соединения. Поэтому вслед за уменьшением гумусом по профилю происходит и снижение количества Ni. Тесная взаимосвязь в профильном распределении Ni и гумусом подтверждается результатом корреляционного анализа. Наибольший коэффициент корреляции отмечается в черноземах под кленом и березой (табл. 1).

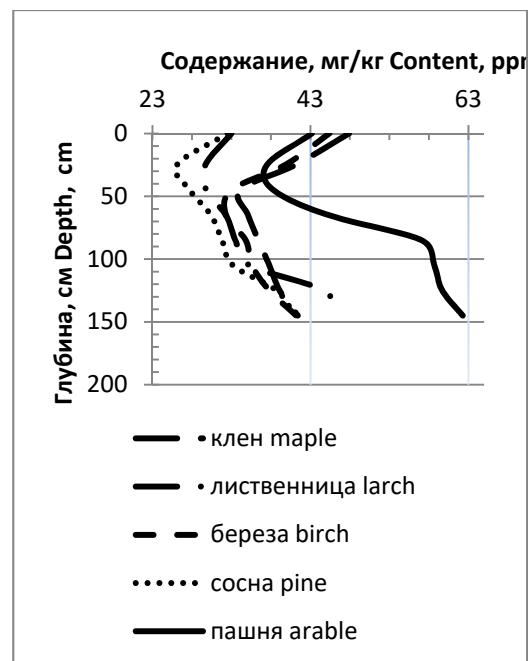


Рисунок 1. Профильное распределение валового содержания Ni в черноземах обыкновенных  
Источник: собственные вычисления авторов

Figure 1. Profile distribution of the gross Ni content in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

В почвах лесополосы более интенсивно происходят процессы выщелачивания. Поведение металла подчиняется общей закономерности и поэтому граница накопления в почвообразующей породе заметно снижается в лесополосе по сравнению с пашней (рис. 1). В изучаемых черноземах обыкновенных валовое содержание Ni не превышает ПДК = 100 мг/кг принятых для почв черноземного ряда [6].

В слое 0-10 см отмечается следующее содержание обменных соединений Ni: клен (1,39±0,17 мг/кг) > береза (1,28±0,14 мг/кг) > лиственница (1,17±0,13 мг/кг) > сосна (1,15±0,09 мг/кг) > пашня (1,09±0,06 мг/кг). Данное распределение тесно коррелирует с содержанием гумуса (табл. 1). Содержание обменных соединений Ni в исследуемых черноземах обыкновенных характеризуется элювиальным типом распределения по профилю (рис. 2). Происходит постепенное увеличение обменного Ni вниз по почвенному профилю.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между содержанием тяжелых металлов, гумусом и рН в профиле исследуемых почв

Table 1

Correlation coefficients between the content of heavy metals, humus and pH in the profile of the studied soils

Угодье (растительность)   Field (vegetation)	Ni – гумус   Ni – humus	Ni – рН	Pb – гумус   Pb – humus	Pb – рН	Cd – гумус   Cd – humus	Cd – рН
Валовое содержание   Gross content						
пашня   arable	0,64	-0,78	0,81	-0,77	0,23	-0,20
клен   maple	0,97	-0,81	0,85	-0,80	0,21	-0,19
лиственница   larch	0,75	-0,75	0,80	-0,83	0,18	-0,15
береза   birch	0,88	-0,82	0,79	-0,79	0,15	-0,23
сосна   pine	0,71	-0,80	0,75	-0,78	0,14	-0,18
Обменные соединения   Exchange connections						
пашня   arable	0,87	-0,90	0,89	-0,91	0,22	-0,14
клен   maple	0,95	-0,91	0,88	-0,95	0,17	-0,22
лиственница   larch	0,91	-0,94	0,91	-0,99	0,14	-0,13
береза   birch	0,92	-0,97	0,90	-0,97	0,21	-0,11
сосна   pine	0,89	-0,96	0,92	-0,98	0,18	-0,21

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

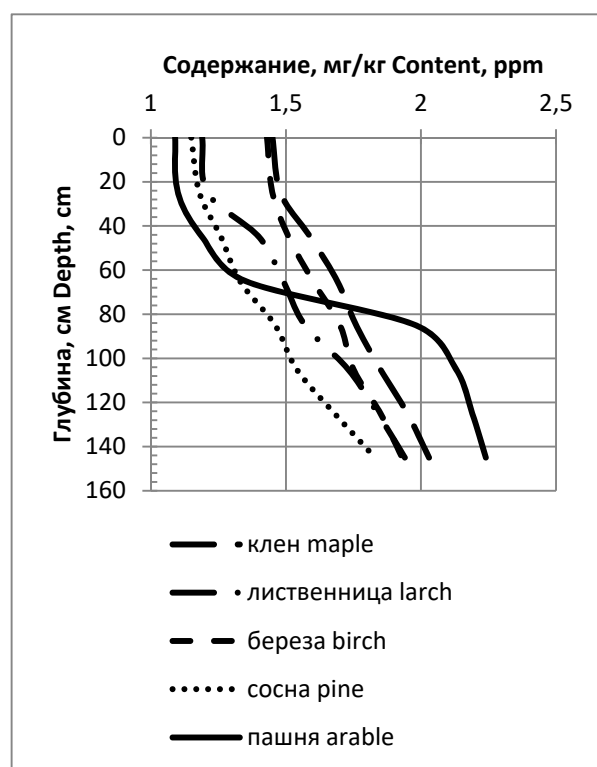


Рисунок 2. Профильное распределение обменных соединений Ni в черноземах обыкновенных

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 2. Profile distribution of exchangeable Ni compounds in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

Следует отметить, что в черноземах лесополосы распределение элемента более равномерно (рис. 2), что связано с появлением процессов выщелачивания. В целом элемент является малоподвижным, поскольку процент обменных соединений составляет  $(3,03 \pm 0,97 \%)$ .

Уровень содержания Pb в исследуемых почвах превышает кларк литосферы, который составляет 16 мг/кг и близок к кларку почв – 20-25 мг/кг [5]. Полученные данные по валовому содержанию Pb в изучаемых черноземах обыкновенных свидетельствуют о накоплении элемента в верхних горизонтах почв за счет взаимодействия металла с молекулами гуминовых кислот. Образуются прочные хелатные соединения. Образуется следующий ряд уменьшения по валовому содержанию Pb: клен  $(24,7 \pm 1,35 \text{ мг/кг}) >$  пашня  $(23,9 \pm 1,87 \text{ мг/кг}) >$  береза  $(21,7 \pm 1,11 \text{ мг/кг}) >$  лиственница  $(18,2 \pm 1,07 \text{ мг/кг}) >$  сосна  $(17,1 \pm 1,09 \text{ мг/кг})$ .

Для профильного распределения металла характерно постепенное снижение его содержания до глубины 60-70 см (рис. 3). Далее к почвообразующей породе вновь отмечается постепенное накопление валового содержания Pb. Металл взаимодействует с илстой и коллоидной фракцией, интенсивно сорбируется сколом кристаллических решеток. Результаты корреляционного анализа показали

тесную положительную связь между профильным распределением валового Рb и гумуса (табл. 1). Валовое содержание Рb в изучаемых почвах не превышает ПДК = 30 мг/кг [6].

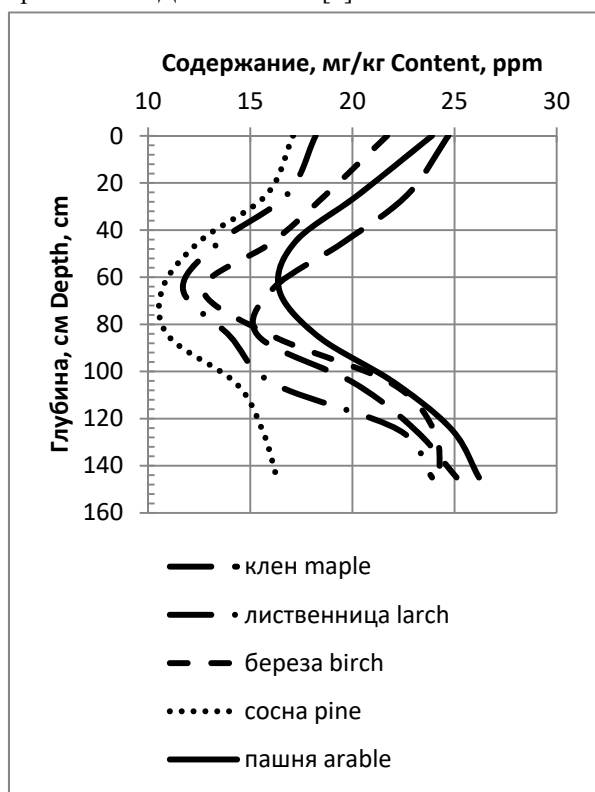


Рисунок 3. Профильное распределение валового содержания Рb в черноземах обыкновенных  
 Источник: собственные вычисления авторов  
 Figure 3. Profile distribution of the total Pb content in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

Концентрация обменных соединений Рb отмечается в слое 0-10 см на пашне ( $1,18 \pm 0,17$  мг/кг) возможно, это связано с антропогенным внесением элементы в качестве примеси в удобрениях, а также за счет обработки пахотных почв сельхозтехникой. Далее происходит уменьшение содержания обменных соединений Рb в ряду: черноземы под кленом ( $1,18 \pm 0,05$  мг/кг) > березой ( $1,15 \pm 0,04$  мг/кг) > сосной ( $1,12 \pm 0,04$  мг/кг) > лиственницей ( $1,10 \pm 0,04$  мг/кг). Как и для Ni отмечается элювиальный тип профильного распределения обменных соединений Рb с постепенным увеличением вниз к почвообразующей породе (рис. 4). Большинство соединений Рb малоподвижно, как и многие тяжелые металлы, он прочно сорбируется почвами [6]. Процент подвижности Рb не превышает 8,1 %.

Согласно полученным данным валовое содержание Cd в исследуемых черноземах обыкновенных близко к кларку почв, который составляет 0,3-0,5 мг/кг и несколько превышает кларк литосферы – 0,1 мг/кг [5]. Cd имеет меньшее сродство к органическому веществу почв по сравнению с Ni и Рb.

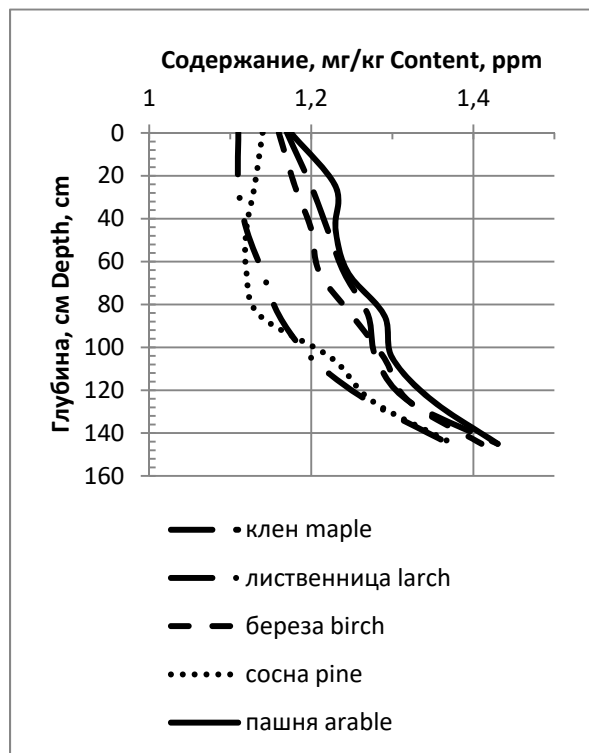


Рисунок 4. Профильное распределение обменных соединений Рb в черноземах обыкновенных  
 Источник: собственные вычисления авторов  
 Figure 4. Profile distribution of exchangeable Pb compounds in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

Миграционные особенности Cd не зависят от режима увлажнения, окислительно-восстановительных условий, а также соединений Fe, Mn [6]. Вследствие этого валовое содержание Cd равномерно распределяется по профилю черноземов обыкновенных Каменной степи (рис. 5), с незначительным увеличением к почвообразующей породе  $0,48 \pm 0,03$  мг/кг. Так же как Ni и Рb, Cd прочно сорбируется илстой и коллоидной фракцией почв. Результаты корреляционного анализа (табл. 1) показали отсутствие связи между профильным распределением валового содержания Cd с гумусом и рН. Полученные данные по валовому

содержанию Cd в исследуемых черноземах не превышают ПДК = 1 мг/кг [6].

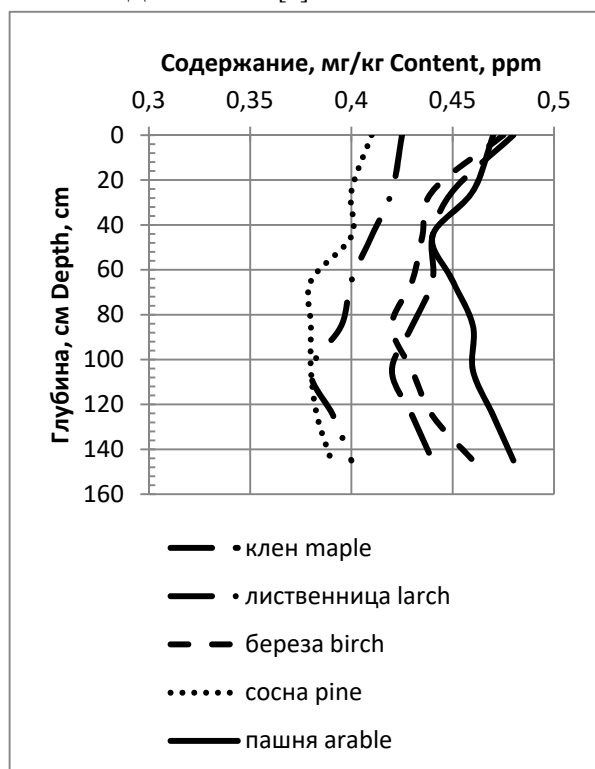


Рисунок 5. Профильное распределение валового содержания Cd в черноземах обыкновенных  
 Источник: собственные вычисления авторов  
 Figure 5. Profile distribution of total Cd content in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

Содержание обменных соединений Cd в исследуемых черноземах колеблется в пределах 0,011-0,059 мг/кг. Обменные соединения металла также относительно равномерно распределяются в профиле изучаемых почв (рис. 6). Данное положение подтверждается результатами корреляционного анализа (табл. 1). Обменные соединения Cd более подвижны, чем соединения Ni и Pb. Их процент подвижности достигает  $10,4 \pm 1,01$  %. Данное явление объясняется меньшим сродством к органическому веществу, а также большей растворимостью их соединений [6].

Следует отметить, что доступность тяжелых металлов и прежде всего таких опасных загрязнителей как Pb и Cd, значительно выше, чем их переход в вытяжку ацетатно-аммонийного буфера [13]. Cd очень часто является сопутствующим элементом органических и минеральных удобрений. Вхо-

дит в их состав в качестве примеси. Но его вынос растениями [10] и миграция по профилю гораздо выше, чем внесение. Создается так называемый отрицательный баланс Cd [4]. Поэтому загрязнения данным элементом почвенного покрова не происходит.

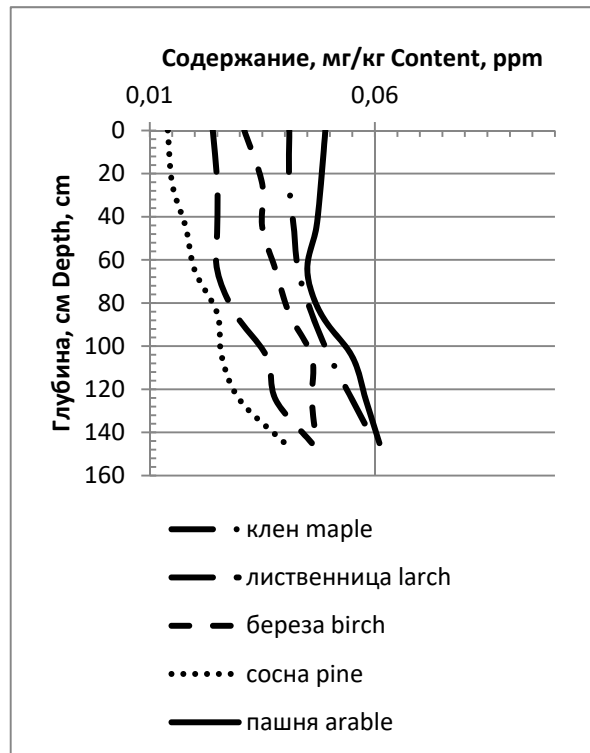


Рисунок 6. Профильное распределение обменных соединений Cd в черноземах обыкновенных  
 Источник: собственные вычисления авторов  
 Figure 6. Profile distribution of exchangeable Cd compounds in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

Коэффициент вариации, определяющий пространственные различия в содержании тяжелых металлов выявил пространственную неоднородности в черноземах лесополосы. Как и в случае с гумусом и pH, распашка приводит к выравниванию пространственных различий в содержании ТМ ( $V=3 \pm 0,5$  %). Что касается лесополосы, то различные древесные породы вносят пространственную неоднородность в содержание тяжелых металлов ( $V=17 \pm 1,12$  %).

#### Заключение

Черноземы обыкновенные Каменной степи, расположенные под пашней и лесополосой достоверно отличаются по морфологическим признакам, по содержанию гумуса, pH, а также по валовому



содержанию и обменным соединениям Ni, Pb и Cd. Статистический анализ полученных данных содержания гумуса и pH среды по определению пространственных различий между пашней и лесополосой показал закономерное уменьшение коэффициента вариации от лесополосы до пашни. Такое явление объясняется тем, что в результате распашки происходит выравнивание пространственных различий данных почвенных свойств. В лесополосе древесная растительность вносит пространственную неоднородность не только в содержание гумуса и pH почвенного раствора, но и в содержание тяжелых металлов.

Валовое содержание Ni и Pb в профиле исследуемых почв характеризуются накоплением в верхнем гумусовом горизонте и в почвообразую-

щей породе. В черноземах лесополосы отмечается более глубокое профильное выщелачивание исследуемых тяжелых металлов. Содержание обменных соединений Ni и Pb в профиле исследуемых черноземов характеризуется элювиальным типом распределения. Для профильного распределения валового содержания Cd и его обменных соединений характерно равномерное распределение в профиле черноземов обыкновенных Каменной степи. Полученные коэффициенты корреляции свидетельствуют о тесной взаимосвязи между профильным распределением гумуса, pH и валовым содержанием и подвижными соединениями Ni и Pb. Корреляционной зависимости между почвенными свойствами и распределением Cd не обнаружено.

### Список литературы

1. Завьялова Н. Е. Гумус и азот дерново-подзолистой почвы различных сельскохозяйственных угодий Пермского края. Почвоведение. 2016;11:1347-1354. Режим доступа: DOI: 10.7868/S0032180X16110113.
2. Иванов А. В., Браун М., Замолотчиков Д. Г., Лынов Д. В., Панфилова Е. В. Лесные подстилки как звено цикла углерода хвойно-широколиственных насаждений южного Приморья. Почвоведение. 2018;10:1226-1233. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X18100052.
3. Кирюшин В. И. Экологические функции ландшафта. Почвоведение. 2018;1:17-25. Режим доступа: DOI: 10.7868/S0032180X18010021
4. Лукин С. В., Селюкова С. В. Экологическая оценка содержания кадмия в почвах и сельскохозяйственных растениях юго-западной части Центрально-Черноземных областей России. Почвоведение. 2018;10S:3-9. Режим доступа: DOI:10.1134/S0032180X18120079.
5. Плеханова И. О., Золотарева О. А., Тарасенко И. Д., Яковлев А. С. Оценка экотоксичности почв в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Почвоведение. 2019;10:1243-1258. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X19100083.
6. Чернова О. В., Безуглова О. С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв. Почвоведение. 2019;8:1015-1026. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X19080045.
7. Чертов О. Г., Надпорожская М. А. Формы гумуса лесных почв: концепции и классификации. Почвоведение. 2018;10:1202-1214. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X18100027.
8. Щеглов Д. И., Громовик А. И., Горбунова Н. С. Основы химического анализа почв. 2019:332. Режим доступа: ISBN 978-5-9273-2738-6.
9. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. MethodsX. 2018; 5:217-226. Режим доступа: DOI: 10.1016/j.mex.2018.02.007.
10. Neaman A., Robinson B., Minkina T. M., Vidal K., Mench M., Krutyakov Y. A., Shapoval O. A. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: the need for greater scrutiny. Environmental Toxicology and Chemistry. 2020;39(8):1469-1471. Режим доступа: DOI: 10.1002/etc.4787.
11. Olson K. R., Gennadiev A. N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA). Eurasian Soil Science. 2020;53(4):436-445. Режим доступа: DOI: 10.1134/S1064229320040122.

12. Pashayan S. A., Sindireva A. V., Boev V. A. Features of accumulation of trace elements in the soil-honey plants system in the Tyumen region IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020: 62044. Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/6/062044>

13. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. Applied Geochemistry. 2020;116: 104570. Режим доступа: DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104570.

14. Zanella A., Ponge J.-F., Hager H., Pignatti S., Galbraith J., Chertov O., Andretta A., De Nobili M. Alteration process during the post-agricultural restoration of luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia. Catena. 2018;171:602-612. Режим доступа: DOI: 10.1016/j.catena.2018.08.004

### References

1. Zav'yalova N. E. Gumus i azot derno-podzolistoi pochvy razlichnykh sel'skokhozyaistvennykh ugodii Permskogo kraia. Pochvovedenie. 2016;11:1347-1354. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.7868/S0032180X16110113>.

2. Ivanov A. V., Braun M., Zamolodchikov D. G., Lynov D. V., Panfilova E. V. Lesnye podstilki kak zveno tsikla ugleroda khvoino-shirokolistvennykh nasazhdenii yuzhnogo Primor'ya. Pochvovedenie. 2018;10:1226-1233. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.1134/S0032180X18100052>.

3. Kiryushin V. I. Ehkologicheskie funktsii landshafta. Pochvovedenie. 2018;1:17-25. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.7868/S0032180X18010021>.

4. Lukin S. V., Selyukova S. V. Ehkologicheskaya otsenka sodержaniya kadmiya v pochvakh i sel'skokhozyaistvennykh rasteniyakh yugo-zapadnoi chasti Tsentral'no-Chernozemnykh oblastei Rossii. Pochvovedenie. 2018;10S:3-9. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.1134/S0032180X18120079>.

5. Plekhanova I. O. Zolotareva O. A., Tarasenko I. D., Yakovlev A. S. Otsenka ehkotoksichnosti pochv v usloviyakh zagryazneniya tyazhelymi metallami. Pochvovedenie. 2019;10:1243-1258. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.1134/S0032180X19100083>.

6. Chernova O. V., Bezuglova O. S. Opyt ispol'zovaniya dannykh fonovykh kontsentratsii tyazhelykh metallov pri regional'nom monitoringe zagryazneniya pochv. Pochvovedenie. 2019;8:1015-1026. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.1134/S0032180X19080045>.

7. Chertov O. G., Nadporozhskaya M. A. Formy gumusa lesnykh pochv: kontseptsii i klassifikatsii. Pochvovedenie. 2018;10:1202-1214. (In Russ.). URL: <http://doi.org/10.1134/S0032180X18100027>.

8. SHCHeglov D. I., Gromovik A. I., Gorbunova N. S. Osnovy himicheskogo analiza. 2019: 332. (In Russ.). URL: ISBN 978-5-9273-2738-6.

9. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. MethodsX. 2018;5:217-226. URL: <http://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>.

10. Neaman A., Robinson B., Minkina T. M., Vidal K., Mench M., Krutyakov Y. A., Shapoval O. A. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: the need for greater scrutiny. Environmental Toxicology and Chemistry. 2020;39(8):1469-1471. URL: <http://doi.org/10.1002/etc.4787>.

11. Olson K. R., Gennadiev A. N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA). Eurasian Soil Science. 2020;53(4):436-445. URL: <http://doi.org/10.1134/S1064229320040122>.

12. Pashayan S. A., Sindireva A. V., Boev V. A. Features of accumulation of trace elements in the soil-honey plants system in the Tyumen region IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies.

Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020: 62044. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/6/062044>

13. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. *Applied Geochemistry*. 2020;116: 104570. URL: <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104570>.

14. Zanella A., Ponge J.-F., Hager H., Pignatti S., Galbraith J., Chertov O., Andreetta A., De Nobili M. Alteration process during the post-agricultural restoration of luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia. *Catena*. 2018;171:602-612. URL: <http://doi.10.1016/j.catena.2018.08.004>


### Сведения об авторах


✉ *Крамарева Татьяна Николаевна* – кандидат биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7363-1215>, e-mail: [tkramarewa@mail.ru](mailto:tkramarewa@mail.ru).


*Горбунова Надежда Сергеевна*, кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>, e-mail: [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru).

*Куликова Елена Владимировна*, кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-7422>, e-mail: [e-mail: melior-agronomy@inbox.ru](mailto:melior-agronomy@inbox.ru).

### Information about the authors

✉ *Tatyana N. Kramareva* – Cand.Ssci (Bio) assistant professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, Russian Federation, 394087,  <https://orcid.org/0000-0001-7363-1215>, e-mail: [kramarewa@mail.ru](mailto:kramarewa@mail.ru).

*Nadezhda S. Gorbunova* – Cand.Ssci (Bio) assistant professor, Voronezh State University, Universitetskaya square, 1, Voronezh city, Russian Federation, 394018,  <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>, e-mail: [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru).

*Elena V. Kulikova* – Cand.Ssci (Bio) assistant professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, str. Michurina, 1, Voronezh city, Russian Federation, 394087,  <https://orcid.org/0000-0002-3106-7422>, e-mail: [melior-agronomy@inbox.ru](mailto:melior-agronomy@inbox.ru).