

УДК 57.033:595.14

DOI 10.21685/2500-0578-2020-4-5

ИОННЫЙ СОСТАВ ПОЧВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ *EISENIA NORDENSKIOLDI* И *LUMBRICUS RUBELLUS* В УСЛОВИЯХ МИКРОКОСМОВ

К. А. Бабий, Е. И. Цвирко, С. Ю. Князев, Е. А. Алехина, Е. В. Голованова

Омский государственный педагогический университет, Россия, 644099, г. Омск, наб. Тухачевского, 14
E-mail: evgolovanova@gmail.com

Аннотация. Последние 20 лет на территории Урала и Сибири в люмбрикофауне отмечают вид-вселенец – малый красный выползок *Lumbricus rubellus*, относящийся к почвенно-подстилочным червям как и аборигенный *Eisenia nordenskioldi nordenskioldi*. Распространение вероятного активного конкурента для нативного вида половины Евразии требует тщательного изучения влияния каждого из рассматриваемых видов на свойства почв. Одной из важнейших характеристик является ионный состав, представляющий собой основу питания растений. Целью данной работы было изучение влияния почвенно-подстилочных видов червей – аборигенного и вида-вселенца – на катионно-анионный состав почв в лабораторных условиях. Для этого был проведен эксперимент в микрокосмах в течение 9 месяцев, включавший два моноварианта, дивариант и контроль. Содержание ионов в почве определялось методом капиллярного электрофореза с помощью «Капель-104Т». Было установлено, что почвенно-подстилочные виды червей *E. n. nordenskioldi* и *L. rubellus* увеличивали концентрации катионов в почве (за исключением натрия), повышали содержание ацетат-, формиат-иона, уменьшали количество фосфатов и фторидов по сравнению с контролем. Достоверных отличий влияния аборигенного вида и вида-вселенца на ионный состав почв не обнаружено. Совместное обитание нативного и чужеродного вида достоверно влияло на количество катионов натрия, кальция, магния, фосфат- и фторид-ионов по сравнению с моновариантами.

Ключевые слова: дождевые черви, катионно-анионный состав почв, виды-вселенцы, инвазии, взаимодействие видов, капиллярный электрофорез.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 18-04-00507).

Для цитирования: Ионный состав почв под воздействием *Eisenia nordenskioldi nordenskioldi* и *Lumbricus rubellus* в условиях микрокосмов / К. А. Бабий, Е. И. Цвирко, С. Ю. Князев, Е. А. Алехина, Е. В. Голованова // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2020. – Vol. 5 (4). – <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-4-5>

IONIC COMPOSITION OF SOILS UNDER THE INFLUENCE OF *EISENIA NORDENSKIOLDI* AND *LUMBRICUS RUBELLUS* UNDER MICROCOSM CONDITIONS

K. A. Babiy, E. I. Tsvirko, S. Yu. Kniazev, E. A. Alekhina, E. V. Golovanova

Omsk State Pedagogical University, 14, Naberezhnaya Tukhachevskogo, Omsk, 644099, Russia
E-mail: evgolovanova@gmail.com

Abstract. Over the past 20 years, on the territory of the Urals and Siberia an invasive species has been noticed – the redworm *Lumbricus rubellus*, which belongs to the same morpho-ecological group as the native one *Eisenia nordenskioldi nordenskioldi*. The spread of the active competitor for the native species in half of Eurasia requires a thorough study of the impact of each of the species under research on soil characteristics. One of the most important characteristics is the ionic composition, which is the basis of plant nutrition. The purpose of this research was to study the influence of epi-endogeic earthworms – the native and invasive species – on the cationic-anionic composition of soils in laboratory environment. For this purpose, a nine-month experiment was conducted in microcosms, it involved two monovariants, a bivariant and control without earthworms. The soil ion content was de-

terminated by capillary electrophoresis system "Kapel-104T". It has been established that epi-endogeic species *E. n. nordenskioldi* and *L. rubellus* increased the soil cation concentration, except for sodium, increased the content of acetate, formate ion, and reduced the amount of phosphates and fluorides compared to the control. There has been no significant difference between the influence of the native species and the invasive species on the ionic composition of soils. Cohabitation of the native and exotic species definitely influenced the amount of sodium, calcium, magnesium, phosphates and fluorides as compared to monovariants.

Keywords: earthworms, cationic-anionic composition of soils, invasive species, invasions, interaction of species, capillary electrophoresis.

Acknowledgments. The research was performed within the framework of RFBR grant (project № 18-04-00507).

For citation: Babiy K.A., Tsvirko E.I., Kniazev S.Yu., Alekhina E.A., Golovanova E.V. Ionic composition of soils under the influence of *Eisenia nordenskioldi* and *Lumbricus rubellus* under microcosm conditions. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2020;5(4). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-4-5>

Введение

Дождевые черви – инженеры ряда наземных экосистем [1]. Они способны в результате жизнедеятельности напрямую менять параметры почвы [2–4], а также, регулируя деятельность других организмов, влиять на экосистемы в целом [5–7]. В частности, люмбрициды оказывают влияние на доступность микроэлементов [8–10]. Водорастворимые формы ионов составляют основу питания растений и могут быть фактором, как стимулирующим, так и лимитирующим развитие и распространение определенных видов растений и почвенной биоты [11, 12].

На территории Азиатской части России наиболее широко распространен вид люмбрицид *Eisenia nordenskioldi nordenskioldi* (Eisen, 1879) [13], представляющий собой сложный комплекс генетических линий [14–16]. Последние 20 лет на этой территории отмечают вид – малый красный выползок *Lumbricus rubellus* (Hoffmeister, 1843) [17–19], относящийся к той же морфо-экологической группе. По данным Т. С. Всеволодовой-Перель, на момент издания кадастра-определителя России на территории азиатской части этот вид отсутствовал [13], поэтому он относится к видам-вселенцам [20]. Известно, что малый красный выползок является активным конкурентом [21–23]. Он оказывает преимущественно отрицательное влияние на популяционные показатели других видов. Распространение активного конкурента для аборигенного вида половины Евразии требует тщательного изучения влияния каждого из рассматриваемых видов на почву в условиях моноварианта и при их взаимодействии. Для этого подходят имитационные эксперименты [21, 24].

Цель данной работы – изучение влияния почвенно-подстилочных видов червей: абори-

генного *E. nordenskioldi nordenskioldi* и вида-вселенца *Lumbricus rubellus* – с учетом их взаимодействия в виде моноварианта и диварианта на катионно-анионный состав почв в лабораторных условиях.

Вопросы, которые ставились перед исследованием:

1. Каким образом изучаемые почвенно-подстилочные виды червей изменяют ионный состав почв?

2. Каковы отличия влияния аборигенного вида *E. n. nordenskioldi* и вида-вселенца *Lumbricus rubellus* на этот показатель?

3. Меняется ли воздействие червей на катионы и анионы при совместном обитании нативного и экзотического видов?

Материалы и методы

Экспериментальный материал был отобран в естественных условиях обитания обоих видов дождевых червей. Почвенно-подстилочные дождевые черви *Eisenia nordenskioldi nordenskioldi* и *Lumbricus rubellus* встречаются на территории Прииртышья по берегам рек, в лесополосах вокруг дачных участков, на разнотравных и разнотравно-злаковых лугах и в различных типах лесов [25], но не встречаются совместно в одних пробах [26]. Сбор *E. n. nordenskioldi* был произведен в топольнике мертвопокровном на берегу протоки р. Иртыш в г. Омск (54°57'17.8"N 73°21'22.0"E), где численность вида составляет 18–84 особи/м² в зависимости от сезона; *L. rubellus* – в агроценозе на территории СНТ «Водник» в г. Омске (N55°02'35.46" E73°22'27.78"), где численность вида колеблется от 16–279 особей/м². Почва, используемая в эксперименте – чернозем обыкновенный (Haplic chernozems по WRB, 2014 [27]) – была отобрана на территории

г. Омска (54°58'50.8"N 73°18'10.1"E) на участке естественных злаково-разнотравных лугов и просеяна через сито с диаметром ячеек 4 мм [28] с целью удаления крупных почвенных организмов, способных повлиять на ход эксперимента. В качестве подстилки использовался опад березы, собранный в мелкотравных осиново-березовых лесах, где встречаются оба вида червей.

В качестве микрокосмов использовались полипропиленовые контейнеры объемом 2,5 л, площадью 0,023 м². В каждый микрокосм закладывалась одинаковая масса почвы (960 г) и подстилки (4 г). Затем в каждый микрокосм помещались дождевые черви по 6 половозрелых особей: 3 микрокосма с *E. n. nordenskioldi* (En); 3 микрокосма с *L. rubellus* (Lr) и 3 микрокосма с бивидовым сочетанием *E. n. nordenskioldi* + *L. rubellus* (En + Lr). Также изучался вариант без дождевых червей (3 микрокосма). Всего заложено 12 микрокосмов. Среднее значение биомассы дождевых червей для моноварианта с *E. n. nordenskioldi* составляло 2,5±0,2 г/сосуд, для моноварианта с *L. rubellus* – 3,1±0,3 г/сосуд, для бивидового варианта – 2,6±0,3 г/сосуд (среднее значение биомассы *E. n. nordenskioldi* в бивидовом варианте составляет 0,89±0,04 г/сосуд, а *L. rubellus* – 1,7±0,3 г). Численность дождевых червей в микрокосмах соответствовала 259 особям/м², что превышало реальную численность дождевых червей для Омской области и позволило интенсифицировать процесс модификации почвы. Далее каждый микрокосм закрывался плотной полипропиленовой крышкой. Для осуществления газообмена крышки перфорировались (размер ячеек около 1 мм). Поддерживались одинаковая влажность почвы (60 %) и температура воздуха (17–20 °С). Влажность почвы контролировалась почвенным влагомером TR 46908 (TR di Turoni & c. Snc, Италия), а температура воздуха – термометром в течение первого месяца ежедневно, затем – еженедельно.

Лабораторный эксперимент продолжался в течение девяти месяцев, с октября по июнь. Во время эксперимента производились разборы микрокосмов с учетом численности дождевых червей. После окончания эксперимента и извлечения дождевых червей определялось содержание водорастворимых форм катионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺) и анионов (Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, F⁻, PO₄³⁻, HCOO⁻, CH₃COO⁻) в почве методом капиллярного электрофореза с помощью «Капель-104Т» (Люмэкс, Россия). Определения производились в соответствии с методиками измерения ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.74-12 (катио-

ны) [29] и ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10 (анионы) [30]. pH измеряли комбинированными стеклянными электродами ЭСК-10301 (НПП Инфраспек-Аналит, Россия) на pH-метре Анион-4100 (НПП Инфраспек-Аналит, Россия) (весовое соотношение почвы к дистиллированной воде – 1:5 [31]).

Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью описательных статистик, коэффициента корреляции Спирмена, дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим использованием критерия Тьюки (Tukey HSD test) для попарного сравнения значимых результатов и критерия Даннетта (Dunnnett test) – для сравнения вариантов с контрольной группой. Вычисления производились посредством программы Statistica 13.

Результаты исследований

Катионы

Дождевые черви увеличивают концентрацию катионов в почве, за исключением натрия (рис. 1). Содержание кальция увеличивается в 3,3 раза ($p = 0,001$), магния также в 3,3 ($p = 0,001$), калия в 3,7 раза ($p < 0,001$). В контрольных вариантах отсутствует катион аммония, а при наличии дождевых червей концентрация NH₄⁺ составляет 2,7±0,5 мг/л ($p = 0,008$). В этом процессе основной вклад вносит *L. rubellus* (табл. 1, 2). Достоверной разницы между влиянием аборигенного вида *E. n. nordenskioldi* и вида-вселенца не отмечено, хотя средние значения в вариантах с *E. n. nordenskioldi* меньше концентраций в вариантах с *L. rubellus*. Взаимодействие видов влияет на накопление кальция, магния и натрия (см. табл. 1). Виды в моновариантах увеличивают количество натрия, в диварианте уменьшают (табл. 3). Накопление катионов в почве связано между собой (см. табл. 3), за исключением калия и натрия. Максимальная корреляция, равная 1, отмечена для кальция и магния. Взаимодействие носит линейный характер, поскольку разница между коэффициентами детерминации для обоих направлений зависимости не достоверна. Регрессия подчиняется уравнениям:

$$\text{Ca}^{2+} = -1,6454 + 5,5761x;$$

$$\text{Mg}^{2+} = 0,3727 + 0,1789x.$$

На весь катионно-анионный состав наибольшее влияние оказывает содержание магния и кальция.

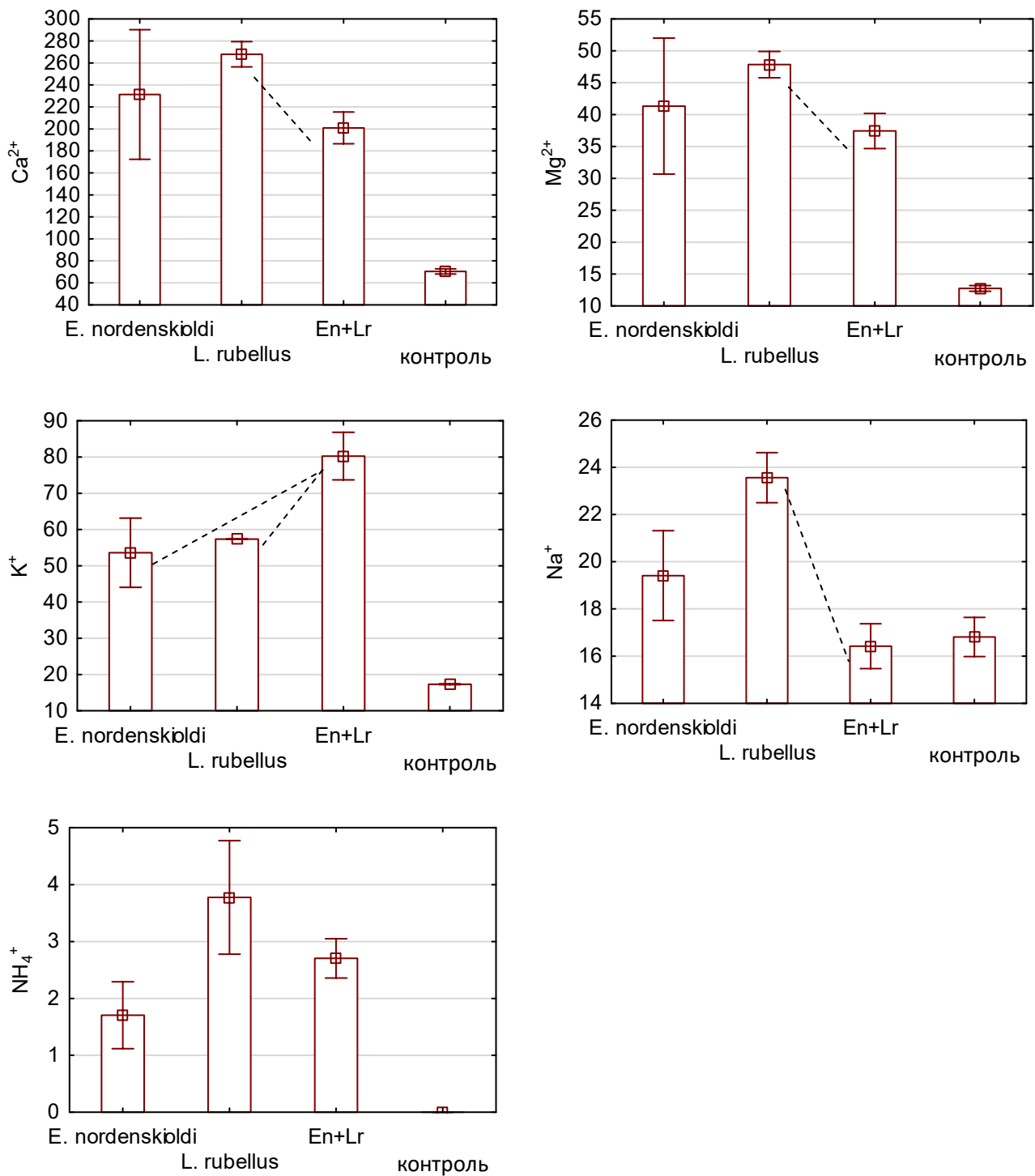


Рис. 1. Концентрации катионов в водной вытяжке почв микрокосмов под действием дождевых червей (мг/кг). По оси ординат – концентрация катионов, мг/л средние±ошибка среднего значения, по оси абсцисс – варианты опыта. En – *Eisenia n. nordenskioldi*, Lr – *Lumbricus rubellus*, прерывистой линией обозначены достоверные различия при попарном сравнении вариантов, исключая контроль ($p < 0,05$)

Fig. 1. Concentrations of cations in the aqueous extract of microcosmic soils under the influence of earthworms (mg/kg). The Y-axis is the concentration of cations, mg/l mean ± error of the mean, and the X-axis is the experimental options. En – *Eisenia n. nordenskioldi*, Lr – *Lumbricus rubellus*, the dashed line indicates significant differences in pairwise comparison of options, excluding control ($p < 0.05$)

Таблица 1

Table 1

Уровень значимости результатов (p) двухфакторного дисперсионного анализа катионно-анионного состава почв под действием различных видов почвенно-подстилочных дождевых червей

Significance level of the results (p) of two-way analysis of variance of the cation-anion composition of soils under the influence of various types of soil earthworms

Катионы и суммарное воздействие							
Факторы (варианты опыта)	NH_4^+	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Все катионы	Все катионы и анионы
<i>E. n. nordenskioldi</i>	0,614	0,001	0,109	0,144	0,167	0,045	0,311
<i>L. rubellus</i>	0,004	<0,001	0,174	0,024	0,027	0,048	0,104
<i>E. n. nordenskioldi</i> + <i>L. rubellus</i>	0,051	0,280	0,005	0,008	0,006	0,021	0,268
Анионы							
Факторы	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	F^-	HCOO^-	CH_3COO^-
<i>E. n. nordenskioldi</i>	0,150	0,674	0,182	0,096	0,042	0,165	0,013
<i>L. rubellus</i>	0,187	0,436	0,115	0,018	0,113	0,023	0,001
<i>E. n. nordenskioldi</i> + <i>L. rubellus</i>	0,072	0,250	0,067	0,013	0,012	0,167	0,100

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты корреляции между концентрацией катионов и анионов в почве микрокосмов

Correlation coefficients between the concentration of cations and anions in the soil of microcosms

	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	F^-	HCOO^-	CH_3COO^-	NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Cl^-	1,00	0,88	0,96	-0,77	-0,79	0,67	0,63	0,60	0,73	0,57	0,93	0,92
SO_4^{2-}	0,88	1,00	0,90	-0,65	-0,63	0,60	0,42	0,57	0,52	0,70	0,84	0,84
NO_3^-	0,96	0,90	1,00	-0,82	-0,82	0,77	0,68	0,70	0,73	0,63	0,97	0,96
PO_4^{3-}	-0,77	-0,65	-0,82	1,00	0,70	-0,72	-0,71	-0,72	-0,73	-0,52	-0,86	-0,86
F^-	-0,79	-0,63	-0,82	0,70	1,00	-0,53	-0,54	-0,55	-0,73	-0,48	-0,86	-0,85
HCOO^-	0,67	0,60	0,77	-0,72	-0,53	1,00	0,92	0,90	0,71	0,56	0,80	0,80
CH_3COO^-	0,63	0,42	0,68	-0,71	-0,54	0,92	1,00	0,81	0,82	0,35	0,73	0,72
NH_4^+	0,60	0,57	0,70	-0,72	-0,55	0,90	0,81	1,00	0,68	0,69	0,80	0,80
K^+	0,73	0,52	0,73	-0,73	-0,73	0,71	0,82	0,68	1,00	0,17	0,74	0,72
Na^+	0,57	0,70	0,63	-0,52	-0,48	0,56	0,35	0,69	0,17	1,00	0,72	0,75
Mg^{2+}	0,93	0,84	0,97	-0,86	-0,86	0,80	0,73	0,80	0,74	0,72	1,00	1,00
Ca^{2+}	0,92	0,84	0,96	-0,86	-0,85	0,80	0,72	0,80	0,72	0,75	1,00	1,00

Примечание. Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05$, $n = 12$.

Таблица 3

Table 3

Направление изменения концентрации катионов по результатам попарного сравнения вариантов опыта с контролем (критерий Даннетта)

The direction of change in the concentration of cations according to the results of pairwise comparison of experimental options with control (Dunnett's test)

Варианты	Катионы						
	NH_4^+	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}		
<i>E. n. nordenskioldi</i>	↑	↑**	↑	↑*	↑*		
<i>L. rubellus</i>	↑**	↑**	↑**	↑*	↑*		
<i>E. n. nordenskioldi</i> + <i>L. rubellus</i>	↑*	↑***	↓	↑**	↑**		
Анионы							
Варианты	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	F^-	HCOO^-	CH_3COO^-
<i>E. n. nordenskioldi</i>	↑	↑	↑	↓*	↓**	↑	↑*
<i>L. rubellus</i>	↑	↑	↑	↓*	↓*	↑*	↑**
<i>E. n. nordenskioldi</i> + <i>L. rubellus</i>	↑	↑	↑	↓**	↓*	↑*	↑***

Примечание. ↑↓ – направление изменения концентрации, уровень значимости исследований: * – $p \leq 0,05$, ** – $p \leq 0,01$, *** – $p \leq 0,001$.

Анионы

Почвенно-подстиличные виды дождевых червей в вариантах опыта влияют на содержание анионов в почве. Достоверно увеличиваются концентрации ацетат-иона в 5,73 раза ($p = 0,03$), уменьшается количество фосфатов в 2,04 раза ($p = 0,04$), фторидов в 2,08 раза ($p = 0,04$), появляются формиаты, которые

не были обнаружены на контроле (рис. 2), (см. табл. 1, 3). На этот процесс влияют оба вида, а также взаимодействие нативного вида и вселенца (см. табл. 1). Попарное сравнение вариантов с нативным и инвазивным видом не показывает различия между ними. На катионно-анионный состав влияет в большей степени содержание нитратов и хлоридов (см. табл. 2).

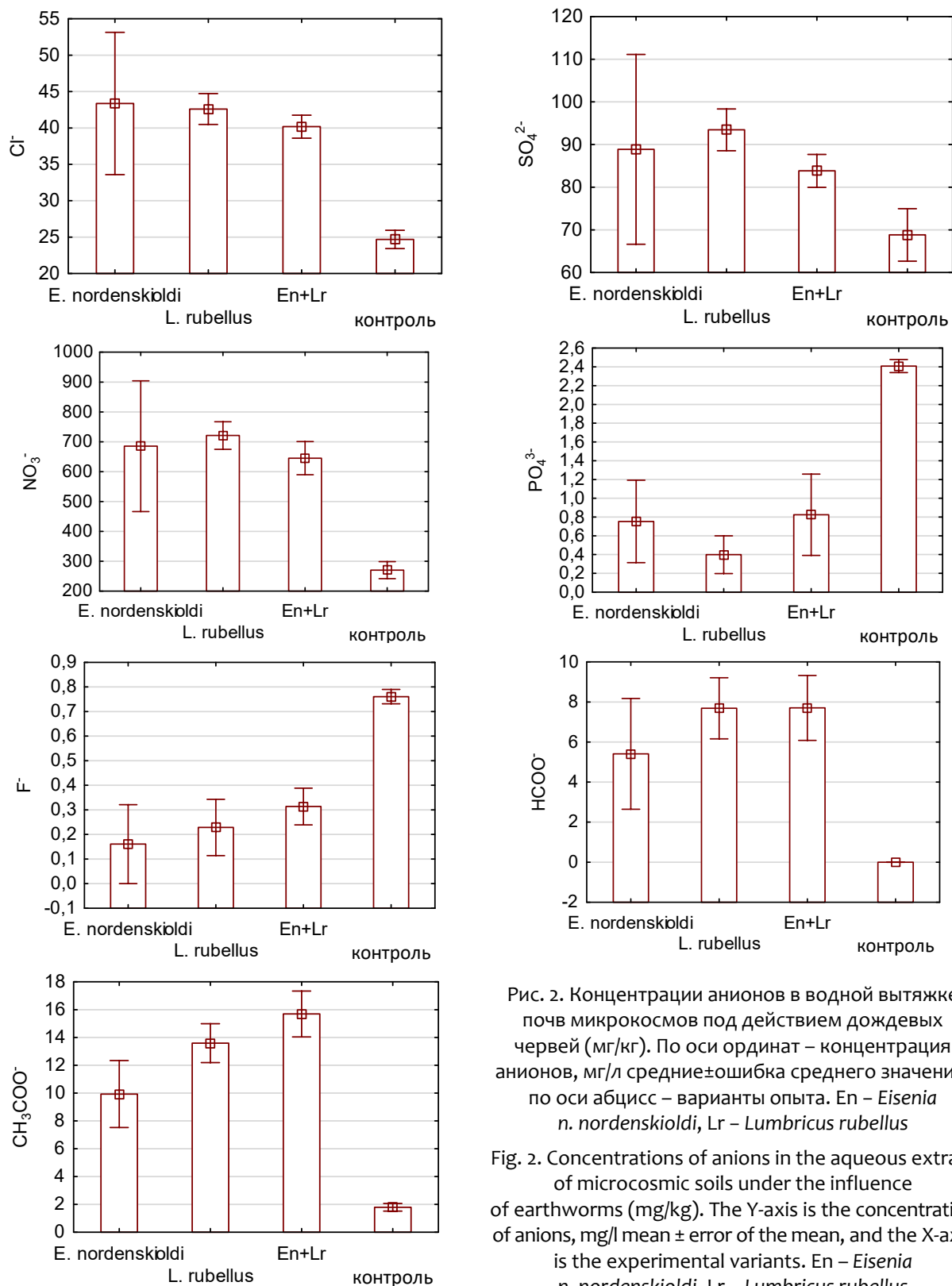


Рис. 2. Концентрации анионов в водной вытяжке почв микрокосмов под действием дождевых червей (мг/кг). По оси ординат – концентрация анионов, мг/л средние±ошибка среднего значения, по оси абсцисс – варианты опыта. En – *Eisenia n. nordenskioldi*, Lr – *Lumbricus rubellus*

Fig. 2. Concentrations of anions in the aqueous extract of microcosmic soils under the influence of earthworms (mg/kg). The Y-axis is the concentration of anions, mg/l mean ± error of the mean, and the X-axis is the experimental variants. En – *Eisenia n. nordenskioldi*, Lr – *Lumbricus rubellus*

Обсуждение результатов

Увеличение дождевыми червями минерализации питательных веществ подтверждается многочисленными исследованиями [32–34]. Отмечено увеличение концентраций катионов магния [35, 36], кальция [36, 37], калия [37, 38], аммония [39]. Появление катиона аммония подтверждается наличием его в продуктах жизнедеятельности червей: копролитах, слизи, моче [40].

Источником катионов может быть подстилка [38]. Как показали исследования [33], присутствие в имитационных экспериментах дождевых червей способствовало уменьшению содержания в подстилке катионов по сравнению с контролем, за исключением кальция.

Также источником катионов может быть минеральная порода. Выветривание анортита, биотита, смектита и каолинита ускоряется дождевыми червями (*E. veneta*) [41]. В присутствии дождевых червей смектит превращается в иллит [41, 42], и образуется новая минеральная фаза из каолинита [41]. Однако эти эффекты отмечались при воздействии люмбрицид от 1 до 4 месяцев, а при более длительном (от 6 до 24 месяцев) с использованием различных видов достоверного влияния дождевых червей на выветривание не отмечалось [43]. Для более продолжительного эффекта необходимо наличие процессов вымывания (выщелачивания) и постоянного внесения органического ресурса [44].

Увеличение содержания катионов можно объяснить небольшим снижением водородного показателя (pH) с $7,16 \pm 0,04$ в контроле до $6,76 \pm 0,02$ в вариантах с дождевыми червями. Концентрации катионов в нашем эксперименте достоверно коррелируют с pH (табл. 4), за исключением иона натрия. По всей видимости, небольшое повышение кислотности также может способствовать высвобождению катионов из почвенно-поглощающего комплекса.

Также минерализация элементов может быть следствием влияния дождевых червей на микробные сообщества [45].

Интенсивность и направленность процессов зависит от морфо-экологического типа (по Перель [46]) дождевых червей [47]. Это может быть, в том числе, результатом косвенного влияния люмбрицид на микробное сообщество, так как известна специфичность метаболического профиля микробного сообщества в зависимости от экологической группы дождевых червей [48].

Данных о влиянии *E. n. nordenskioldi* на катионно-анионный состав почв нами не найдено в литературе, кроме наших собственных исследований в мезокосмах в полевом эксперименте

[49]. По результатам полевых исследований также отмечалось, что основной вклад в изменение катионного состава почвы принадлежит *L. rubellus* [49]. Отмечено активное участие вида в минерализации азота [47].

Таблица 4

Table 4

Корреляция между содержанием ионов и pH почвенной вытяжки

Correlation between ion content and pH of soil extract

Ионы	Коэффициент корреляции с pH	Ошибка коэффициента корреляции
NH_4^+	-0,6**	0,2
K^+	-0,7**	0,2
Na^+	-0,3	0,2
Mg^{2+}	-0,8**	0,2
Ca^{2+}	-0,8**	0,2
Cl^-	-0,7**	0,2
SO_4^{2-}	-0,5*	0,2
NO_3^-	-0,7**	0,2
PO_4^{3-}	0,5*	0,2
F^-	0,8**	0,2
HCOO^-	-0,6*	0,2
CH_3COO^-	-0,7**	0,2

Примечание. Уровень значимости результатов: * – $p \leq 0,05$, ** – $p \leq 0,01$.

Известно, что *L. rubellus* является активным конкурентом, который негативно влияет на другие виды дождевых червей, при этом получая положительные эффекты от их присутствия [21]. По нашим данным, взаимодействие видов оказало влияние на накопление катионов кальция, магния и натрия, при этом для натрия изменяя направление воздействия. Известно, что взаимодействия между представителями различных морфо-экологических типов (*A. caliginosa* и *L. rubellus*) усиливают микробную иммобилизацию азота [47, 50], при этом в экспериментах, проводимых в экотроне (Ectron, Франция), подстилочные виды снижали влияние собственно почвенных видов на микробную активность [51]. Также взаимодействие между видами дождевых червей и экологическими группами может влиять на такие функции почвы, как разложение, круговорот питательных веществ, образование агрегатов и производительность растений, что оказывает синергетическое воздействие на развитие структуры почвы [52, 53]. Таким образом, влияние взаимодействия видов в эксперименте на количество катионов можно объяснить как прямым, так и косвенным воздействием – через микроб-

ные сообщества, изменения структуры почвы, количества органического вещества, рН и т.д.

Значимые корреляции между большинством катионов и анионов в почве можно объяснить гомогенизацией условий эксперимента – количества и качества источника ионов (подстилки и почвы) и использованием двух видов червей, принадлежащих к одной экологической группе.

Сходные тренды в поведении катионов кальция и магния отмечены в [54]. Авторы объясняют данное явление принадлежностью элементов к одной химической группе и сходством зарядов ионов.

Влияние дождевых червей на содержание анионов изучалось, в основном, на примере нитратов [55–57] и фосфатов [58–62]. Снижение фосфатов в почвах с дождевыми червями подтверждается работами [58, 63]. В то же время ряд авторов отмечают уменьшение содержания в копролитах органической фракции фосфора и увеличение минеральной, а также усиление фосфатазной активности на фоне неизменного содержания общего фосфора [60, 64]. Вероятно, часть ионов кальция, высвободившегося в результате деятельности дожде-

вых червей (см. рис. 1) при взаимодействии с фосфатами, образовала нерастворимые соединения.

Заключение

Почвенно-подстилочные виды дождевых червей *E. n. nordenskioldi* и *L. rubellus* увеличивали концентрации катионов в почве, за исключением натрия, повышали содержание ацетат-, формиат-иона, уменьшали количество фосфатов и фторидов по сравнению с контролем. Достоверных отличий влияния аборигенного вида *E. n. nordenskioldi* и вида-вселенца на ионный состав почв не обнаружено. Совместное обитание нативного и чужеродного вида достоверно повлияло на количество катионов натрия, кальция, магния, фосфат- и фторид-ионов по сравнению с моновариантами.

Для более полного понимания вопроса необходимо изучение ионного состава копролитов дождевых червей и проведение полевых имитационных экспериментов.

Библиографический список

1. Jones, C. G. Organisms as ecosystem engineers / C. G. Jones, J. H. Lawton, M. Shachak // *Oikos*. – 1994. – № 69. – P. 373–386.
2. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers / P. Lavelle, D. Bignell, M. Lepage, V. Wolters, P. Roger, P. Ineson, O. W. Heal, S. Dhillion // *Eur. J. Soil Biol.* – 1997. – № 33. – P. 159–193.
3. Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops / P. Jouquet, J. Dauber, J. Lagerlo, P. Lavelle, M. Lepage // *Applied Soil Ecology*. – 2006. – № 32. – P. 153–164.
4. Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil : A Review of Concepts and Future Research Questions Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil : A Review of Concepts and Future Research Questions / P. Lavelle, M. Blouin, G. Brown, T. Decaëns, M. Grimaldi, J. J. Jiménez, D. Mckey, J. Mathieu, E. Velasquez, A. Zangerlé // *Soil Science*. – 2016. – Vol. 181, № 3/4. – P. 91–109.
5. Das, M. R. Ecosystem Services of the Eco-Engineers: The Earthworms / M. R. Das, A. C. Nimbalkar, S. S. Pisa // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2018. – № 7. – P. 1065–1086.
6. Тиунов, А. В. Метабиоз в почвенной системе: влияние дождевых червей на структуру и функционирование почвенной биоты : дис. ... докт. биол. наук / Тиунов А. В. – Москва, 2007. – 284 с.
7. Briones, M. J. I. The Serendipitous Value of Soil Fauna in Ecosystem Functioning : The Unexplained Explained / M. J. I Briones // *Frontiers in Environmental Science*. – 2018. – № 6 – P. 149.
8. Битюцкий, Н. П. Влияние дождевых червей на подвижность микроэлементов в почве и их доступность растениям / Н. П. Битюцкий, П. И. Кайдун // *Почвоведение*. – 2008. – № 12. – С. 1479–1486.
9. Bityutskii, N. P. The earthworm (*Aporrectodea caliginosa*) primes the release of mobile and available micronutrients in soil / N. P. Bityutskii, P. I. Kaidun, K. L. Yakkonen // *Pedobiologia*. – 2012. – Vol. 55 (2). – P. 93–99.
10. Bityutskii, N. P. Can earthworms alleviate nutrient disorders of plants subjected to calcium carbonate excess ? / N. P. Bityutskii, P. I. Kaidun, K. L. Yakkonen // *Appl. Soil Ecol.* – 2016. – P. 20–29.
11. Rajapaksha, N. S. S. Short rotation forestry – Earthworm interactions : A field based mesocosm experiment / N. S. S. Rajapaksha, K. R. Butt, E. I. Vanguelova, A. J. Moffat // *Applied Soil Ecology*. – 2014. – Vol. 76. – P. 52–59.
12. Invasion of exotic earthworms into ecosystems inhabited by native earthworms. / P. F. Hendrix, G. H. Baker, M. A. Callahan, G. A. Damoff, C. Fragoso, G. González, S. W. James, S. L. Lachnicht, T. Winsome, X. Zou // *Biological Invasions*. – 2006. – Vol. 8 (6). – P. 1287–1300.
13. Всеволодова-Перель, Т. С. Дождевые черви фауны России: Кадастр и определитель / Т. С. Всеволодова-Перель. – Москва : Наука, 1997. – 102 с.
14. Shekhovtsov, S. V. Cryptic diversity within the Nordenskiöld's earthworm, *Eisenia nordenskioldi* subsp. *Nordenskioldi* (Lumbricidae, Annelida) / S. V. Shekhovtsov, E. V. Golovanova, S. E. Peltek // *Eur. J. Soil Biol.* – 2013. – Vol. 58. – P. 13–18.

15. Шеховцов, С. В. Генетическое разнообразие дождевого червя *Eisenia nordenskioldi* (Lumbricidae, Annelida) / С. В. Шеховцов, Д. И. Берман, Е. В. Голованова, С. Е. Пельтек // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 588–595.
16. Phylogeny of the *Eisenia nordenskioldi* complex based on mitochondrial genomes / S. V. Shekhovtsov, E. V. Golovanova, N. I. Ershov, T. V. Poluboyarova, D. I. Berman, N. A. Bulakhova, T. Szederjesi, S. E. Peltek // European Journal of Soil Biology. – 2020. – Vol. 96. – Article 103137.
17. Голованова, Е. В. Популяции дождевых червей придорожных полос в условиях загрязнения свинцом : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Голованова Е. В. – Омск, 2003. – 20 с.
18. Стриганова, Б. Р. Животное население почв бореальных лесов Западно-Сибирской равнины / Б. Р. Стриганова, Н. М. Порядина. – Москва : КМК, 2005. – 232 с.
19. Макарова, О. Л. Дождевые черви (Oligochaeta, Lumbricidae) в тундрах Восточной Европы / О. Л. Макарова, А. А. Колесникова // Известия РАН. Сер. биологическая. – 2019. – № 5. – С. 466–477.
20. Tiunov, A. V. Invasion patterns of Lumbricidae into the previously earthworm-free areas of northeastern Europe and the western Great Lakes region of North America / A. V. Tiunov, C. M. Hale, H. M. Holdsworth, T. S. Vsevolodova-Perel // Biol. Invasions. – 2006. – № 8. – P. 1223–1234.
21. Uvarov, A. V. Inter- and intraspecific interactions in lumbricid earthworms: Their role for earthworm performance and ecosystem functioning / A. V. Uvarov // Pedobiologia. – 2009. – № 53. – P. 1–27.
22. Xia, L. Inter and intra-specific interactions of *Lumbricus rubellus* (Hoffmeister, 1843) and *Octolasion lacteum* (Örley, 1881) (Lumbricidae) and the implication for C cycling / L. Xia, K. Szlavecz, C. M. Swan, J. L. Burgess // Soil Biology & Biochemistry. – 2011. – № 43. – P. 1584–1590.
23. Голованова, Е. В. Есть ли преимущества у аборигенного вида дождевых червей по сравнению с видами-вселенцами в Западной Сибири? / Е. В. Голованова, С. Ю. Князев, К. Карабан // XVIII Всероссийское собрание по почвенной зоологии : тез. докл. (22–26 октября 2018 г.). – Москва, 2018. – С. 60–61.
24. Pandora's Box Contained Bait: The Global Problem of Introduced Earthworms / P. F. Hendrix, M. A. Callahan, J. M. Drake, C.-Y. Huang, S. W. James, B. A. Snyder, W. Zhang // Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. – 2008. – Vol. 39. – P. 593–613.
25. Голованова, Е. В. Дождевые черви Омской области / Е. В. Голованова // Фундаментальные и прикладные аспекты современной биологии : труды Первой Всерос. молодеж. науч. конф., посвящ. 125-летию биол. исслед. в Том. гос. ун-те (Томск, 6–9 окт. 2010 г.). Сер. биол. – Томск : Том. гос. ун-т, 2010. – Т. 275. – С. 111–114.
26. Голованова, Е. В. Дождевые черви-вселенцы в Западной Сибири / Е. В. Голованова // Экология и эволюция: новые горизонты : материалы Междунар. симпозиума, посвящ. 100-летию академика С. С. Шварца. – Екатеринбург : Гуманитарный университет, 2019. – С. 494–495.
27. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. – Rome, 2015. – № 106. – 192 p.
28. Burrows, L. A. The use of integrated soil microcosms to assess the impact of carbendazim on soil ecosystems / L. A. Burrows, C. A. Edwards // Ecotoxicology. – 2004. – Vol. 13. – P. 143–161.
29. ПНД Ф 16.1:2.2.3:2.2.69-10. Методика измерений массовой доли водорастворимых форм хлорид-, сульфат-, оксалат-, нитрат-, фторид-, формиат-, фосфат-, ацетат-ионов в почвах, грунтах тепличных, глинах, торфе, осадках сточных вод, активном иле, донных отложениях методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель». – Москва, 2010. – 41 с.
30. ПНД Ф 16.1:2.2.2:2.3.74-2012. Методика измерений массовой доли водорастворимых форм катионов в почвах, грунтах, глине, торфе, осадках сточных вод, активном иле, донных отложениях методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель». – Москва, 2012. – 29 с.
31. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Постановление Госкомитета СССР по стандартам от 08.02.1985 № 283. – Москва : Изд-во Стандартов, 1985. – 10 с.
32. Robinson, C. H. Effects of earthworms on cation and phosphate mobilisation in limed peat soils under *Picea sitchensis* / C. H. Robinson, P. Ineson, T. G. Pearce, J. Parrington // Forest Ecology and Management. – 1996. – Vol. 86. – P. 253–258.
33. Adejuyigbe, C. O. Microcosmic study of soil microarthropod and earthworm interaction in litter decomposition and nutrient turnover / C. O. Adejuyigbe, G. Tian, G. O. Adeoye // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2006. – Vol. 75. – P. 47–55.
34. Clause, J. Effects of cast properties and passage through the earthworm gut on seed germination and seedling growth / J. Clause, S. Barot, E. Forey // Appl. Soil Ecol. – 2015. – Vol. 96. – P. 108–113.
35. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam / P. Jouquet, N. Bottinelli, P. Podwojewski, V. Hallaire, T. Tran Duc // Geoderma. – 2008. – № 146. – P. 231–238.
36. Pommeresche, R. Nutrient content in geophagous earthworm casts in organic cereal production / R. Pommeresche, S. Hansen, A.-K. Løes // Bioacademy 2009 : Proceedings of Second Scientific Conference (Lednice, Czech Republic, June 24–26). – 2009. – P. 67–70.

37. Basker, A. Changes in potassium availability and other soil properties due to soil ingestion by earthworms / A. Basker, J. H. Kirkman, A. N. Macgregor // *Biol. Fert. Soils.* – 1994. – Vol. 17. – P. 154–158.
38. Physicochemical aspects of recycling tree leaf litter in the south of Western Siberia by the *Eisenia fetida* (Savigny) vermiculture / A. V. Kurovsky, K. A. Petrochenko, A. Yu. Godymchuk, A. S. Babenko, Yu. E. Yakimov // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 226 0120092019. – 2019. – Vol. 226. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/226/1/012009>.
39. Earthworms stimulate nitrogen transformation in an acidic soil under different Cd contamination Ecotoxicology and Environmental Safety Earthworms stimulate nitrogen transformation in an acidic soil under different Cd contamination / H. Xu, H. Chen, X. Wang, Y. Zhang, J. Wang, N. Li // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* – 2018. – Vol. 165. – P. 564–572.
40. Satchell, J. E. Nitrogen turnover by a woodland population of *Lumbricus terrestris* / J. E. Satchell // *Soil Organisms* / ed. by J. Doeksen, J. van der Drift. – Amsterdam, 1963. – P. 60–66.
41. Carpenter, D. Earthworm induced mineral weathering: Preliminary results / D. Carpenter, M. E. Hodson, P. Eggleton, C. Kirk // *European Journal of Soil Biology.* – 2007. – Vol. 43. – P. 176–183.
42. Pop, V. V. Earthworm biology and ecology – a case study: the genus *Octodrilus* Omodeo, 1956 (Oligochaeta, Lumbricidae), from the Carpathians / V. V. Pop // *Earthworm Ecology* / ed. by C. A. Edwards. – Boca Raton, Fla. : St. Lucie Press, 1998. – P. 65–100.
43. The role of earthworm communities in soil mineral weathering : A field experiment / D. Carpenter, N. H. Museum, M. E. Hodson, P. Eggleton, N. H. Museum, C. Kirk // *Mineralogical Magazine.* – 2008. – Vol. 72 (1). – P. 33–36.
44. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services / M. Blouin, M. E. Hodson, E. A. Delgado, G. Baker, L. Brussaard, K. R. Butt, J.-J. Brun // *European Journal of Soil Science.* – 2013. – Vol. 64 (2). – P. 161–182.
45. Влияние дождевых червей на модификацию популяции микроорганизмов и активность ферментов в почве / Н. П. Битюцкий, А. Н. Соловьева, Е. И. Лукина, И. Н. Лапшина, Д. Ю. Власов, Н. В. Кудряшова // *Почвоведение.* – 2005. – № 1. – С. 82–91.
46. Perel, T. S. Differences in Lumbricid Organization Connected with Ecological Properties / T. S. Perel // *Ecological Bulletins.* – 1977. – Vol. 25. – P. 56–63.
47. Earthworm species composition affects the soil bacterial community and net nitrogen mineralization / M. B. Postma-Blauuw, J. Bloem, J. H. Faber, J. W. van Groeningen, R. G. M. de Goede, L. Brussaard // *Pedobiologia.* – 2006. – Vol. 50. – P. 243–256.
48. Sheehan, C. The effects of earthworm ecological group diversity on nitrogen dynamics in soils / C. Sheehan, L. Kirwan, J. Connolly, T. Bolger // *Soil Biol. Biochem.* – 2006. – Vol. 29. – P. 743–746.
49. Бабий, К. А. Влияние инвазий дождевых червей на катионный состав почв (метод мезокосмов) / К. А. Бабий, С. Ю. Князев, Е. В. Голованова // *Почвоведение: Горизонты будущего : материалы III Молодежной конференции.* – Москва : Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2019. – С. 39–40.
50. Bossuyt, H. Interactive effects of functionally different earthworm species on aggregation and incorporation and decomposition of newly added residue carbon / H. Bossuyt, J. Six, P. F. Hendrix // *Geoderma.* – 2006. – Vol. 130. – P. 14–25.
51. Effects of the presence and community composition of earthworms on microbial community functioning / S. Scheu, N. Schlitt, A. V. Tiunov, J. E. Newington, T. H. Jones // *Oecologia.* – 2002. – Vol. 133. – P. 254–260.
52. Shaw, C. Faecal microbiology of *Octolasion tyrtaeum*, *Aporrectodea turgida* and *Lumbricus terrestris* and its relation to the carbon budgets of three artificial soils / C. Shaw, S. Pawluk // *Pedobiologia.* – 1986. – Vol. 29. – P. 377–389.
53. Shaw, C. The development of soil structure by *Octolasion tyrtaeum*, *Aporrectodea turgida* and *Lumbricus terrestris* in parent materials belonging to different textural classes / C. Shaw, S. Pawluk // *Pedobiologia.* – 1986. – Vol. 29. – P. 327–339.
54. Invasive Earthworms Deplete Key Soil Inorganic Nutrients (Ca, Mg, K, and P) in a Northern Hardwood Forest / K. Resner, K. Yoo, S. D. Sebestyen, A. Aufdenkampe, C. Hale, A. Lyttle, A. Blum // *Ecosystems.* – 2015. – Vol. 18. – P. 89–102.
55. Araujo, Y. Effect of earthworm addition on soil nitrogen availability, microbial biomass and litter decomposition in mesocosms / Y. Araujo, F. J. Luizao, E. Barros // *Biology and Fertility of Soils.* – 2004. – Vol. 39. – P. 146–152.
56. Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts / L. Cécillon, N. Cassagne, S. Czarnes, R. Gros, J. J. Brun // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2008. – Vol. 40. – P. 1975–1979.
57. Mouat, M. C. H. Adsorption by soil of water-soluble phosphate from earthworm casts / M. C. H. Mouat, R. G. Keogh // *Plant and Soil.* – 1987. – Vol. 241. – P. 233–241.
58. Costello, D. Non-native earthworms in riparian soils increase nitrogen flux into adjacent aquatic ecosystems / D. Costello, G. Lamberti // *Oecologia.* – 2008. – Vol. 158. – P. 499–510.
59. Lopez-Hernandez, D. Phosphorous transformations in two P-sorption contrasting tropical soils during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta) / D. Lopez-Hernandez, P. Lavelle, J. C. Fardeau, M. Nino // *Soil Biol Biochem.* – 1993. – Vol. 25. – P. 789–792.
60. Modification of P availability by endogeic earthworms (Glossoscolecidae) in Ferralsols of the Malagasy Highlands / L. Chapuis-Lardy, R. S. Ramiandrisoa, L. Randriamanantsoa, C. Morel, L. Rabeharisoa, E. Blanchart // *Biol. Fert. Soils.* – 2004. – Vol. 45. – P. 415–422.

61. Role of Soil Macrofauna in Phosphorus Cycling / L. Chapuis-Lardy, R. Bayon, M. Brossard, D. Lopez-Hernandez, E. Blanchart // *Soil Biology*. – 2014. – Vol. 26. – P. 199–214.
62. Geoderma Exploring the pathways of earthworm-induced phosphorus availability / M. B. H. Ros, T. Hiemstra, J. W. Van Groenigen, A. Chareesri, G. F. Koopmans // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 303. – P. 99–109.
63. Князев, С. Ю. Модификация анионного баланса почвы дождевыми червями / С. Ю. Князев, К. А. Бабий, Е. В. Голованова // *Проблемы почвенной зоологии : материалы XVIII Всерос. совещания по почвенной зоологии*. – Москва : КМК, 2018. – С. 99–100.
64. Bayon, R. C. Earthworm changes the distribution and availability of phosphorus in organic substrates Earthworms change the distribution and availability of phosphorus in organic substrates / R. C. Le Bayon, F. Binet // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2006. – Vol. 38. – P. 235–246.

References

1. Jones C. G., Lawton J. H., Shachak M. *Oikos*. 1994, no. 69, pp. 373–386.
2. Lavelle P., Bignell D., Lepage M., Wolters V., Roger P., Ineson P., Heal O. W., Dhillon S. *Eur. J. Soil Biol.* 1997, no. 33, pp. 159–193.
3. Jouquet P., Dauber J., Lagerlo J., Lavelle P., Lepage M. *Applied Soil Ecology*. 2006, no. 32, pp. 153–164.
4. Lavelle P., Blouin M., Brown G., Decaëns T., Grimaldi M., Jiménez J. J., Mckey D., Mathieu J., Velasquez E., Zangerlé A. *Soil Science*. 2016, vol. 181, no. 3/4, pp. 91–109.
5. Das M. R., Nimbalkar A. C., Pisa S. S. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018, no. 7, pp. 1065–1086.
6. Tiunov A. V. *Metabioz v pochvennoy sisteme: vliyaniye dozhdevykh chervey na strukturu i funktsionirovaniye pochvennoy bioty: dis. dokt. biol. nauk* [Metabiosis in the soil system: impact of earthworms on the structure and functioning of the soil biota: thesis of doctor of biological sciences]. Moscow, 2007, 284 p. [In Russian]
7. Briones M. J. I. *Frontiers in Environmental Science*. 2018, no. 6, p. 149.
8. Bityutskiy N. P., Kaidun P. I. *Pochvovedeniye*. [Soil studies] 2008, no. 12, pp. 1479–1486.
9. Bityutskii N. P., Kaidun P. I., Yakkonen K. L. *Pedobiologia*. 2012, vol. 55 (2), pp. 93–99.
10. Bityutskii N. P., Kaidun P. I., Yakkonen K. L. *Appl. Soil Ecol.* 2016, p. 20–29.
11. Rajapaksha N. S. S., Butt K. R., Vanguelova E. I., Moffat A. J. *Applied Soil Ecology*. 2014, vol. 76, pp. 52–59.
12. Hendrix P. F., Baker G. H., Callahan M. A., Damoff G. A., Fragoso C., González G., James S. W., Lachnicht S. L., Winsome T., Zou X. *Biological Invasions*. 2006, vol. 8 (6), pp. 1287–1300.
13. Vsevolodova-Perel' T. S. *Dozhdevye chervi fauny Rossii: Kadastr i opredelitel'* [Earthworms in the Russian fauna: register and ranger]. Moscow: Nauka, 1997, 102 p. [In Russian]
14. Shekhovtsov S. V., Golovanova E. V., Peltek S. E. *Eur. J. Soil Biol.* 2013, vol. 58, pp. 13–18.
15. Shekhovtsov S. V., Berman D. I., Golovanova E. V., Pel'tek S. E. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* [Vavilov's journal on genetics]. 2017, vol. 21, no. 5, pp. 588–595. [In Russian]
16. Shekhovtsov S. V., Golovanova E. V., Ershov N. I., Poluboyarova T. V., Berman D. I., Bulakhova N. A., Szederjesi T., Peltek S. E. *European Journal of Soil Biology*. 2020, vol. 96, article 103137.
17. Golovanova E. V. *Populyatsii dozhdevykh chervey pridorozhnykh polos v usloviyakh zagryazneniya svintsom: avtoref. dis. kand. biol. nauk* [Earthworm populations near roads under conditions of lead contamination]. Omsk, 2003, 20 p. [In Russian]
18. Striganova B. R., Poryadina N. M. *Zhivotnoye naseleniye pochv boreal'nykh lesov Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Soil fauna of boreal forests on West Siberian Plain]. Moscow: KMK, 2005, 232 p. [In Russian]
19. Makarova O. L., Kolesnikova A. A. *Izvestiya RAN. Ser. Biologicheskaya* [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Biological Series]. 2019, no. 5, pp. 466–477.
20. Tiunov A. V., Hale C. M., Holdsworth H. M., Vsevolodova-Perel T. S. *Biol. Invasions*. 2006, no. 8, pp. 1223–1234.
21. Uvarov A. V. *Pedobiologia*. 2009, no. 53, pp. 1–27.
22. Xia L., Szlavecz K., Swan C. M., Burgess J. L. *Soil Biology & Biochemistry*. 2011, no. 43, pp. 1584–1590.
23. Golovanova E. V., Knyazev S. Yu., Karaban K. *XVIII Vserossiyskoe soveshchanie po pochvennoy zoologii: tez. dokl. (22–26 oktyabrya 2018 g.)* [All-Russian conference on soil zoology: abstracts (22–26 October, 2018)]. Moscow, 2018, pp. 60–61. [In Russian]
24. Hendrix P. F., Callahan M. A., Drake J. M., Huang C.-Y., James S. W., Snyder B. A., Zhang W. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2008, vol. 39, pp. 593–613.
25. Golovanova E. V. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty sovremennoy biologii: trudy Pervoy Vseros. molodezh. nauch. konf., posvyashch. 125-letiyu biol. issled. v Tom. gos. un-te (Tomsk, 6–9 okt. 2010 g.)*. Ser. biol. [Fundamental and applied aspects of modern biology: proceedings of the First national youth conference dedicated to 125th anniversary of biological research at Tomsk State University (Tomsk, 6–9 October, 2010). Biological series] Tomsk: Tom. gos. un-t, 2010, vol. 275, pp. 111–114. [In Russian]
26. Golovanova E. V. *Ekologiya i evolyutsiya: novye gorizonty: materialy Mezhdunar. simpoziuma, posvyashch. 100-letiyu akademika S. S. Shvartsa* [Ecology and evolution: new horizons: proceedings of International symposium dedicated to 100th anniversary of academician S.S. Schwarz]. Ekaterinburg: Gumanitarnyy universitet, 2019, pp. 494–495. [In Russian]

27. IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports*. Rome, 2015, no. 106, 192 p.
28. Burrows L. A., Edwards C. A. *Ecotoxicology*. 2004, vol. 13, pp. 143–161.
29. PND F 16.1:2:2.3:2.2.69-10. *Metodika izmereniy massovoy doli vodorastvorimykh form khlorid-, sul'fat-, oksalat-, nitrat-, florid-, formiat-, fosfat-, atsetat-ionov v pochvakh, gruntakh teplichnykh, glinakh, torfe, osadkakh stochnykh vod, aktivnom ile, donnykh otlozheniyakh metodom kapillyarnogo elektroforeza s ispol'zovaniem sistemy kapillyarnogo elektroforeza «Kapel'»* [Methods for measuring the mass fraction of water-soluble forms of chloride, sulfate, oxalate, nitrate, fluoride, formate, phosphate, acetate ions in soils, greenhouse soils, clays, peat, sewage sludge, active and bottom sediments by the capillary electrophoresis method using a capillary electrophoresis system "Kapel"]. Moscow, 2010, 41 p. [In Russian]
30. PND F 16.1:2:2.2:2.3.74-2012. *Metodika izmereniy massovoy doli vodorastvorimykh form kationov v pochvakh, gruntakh, gline, torfe, osadkakh stochnykh vod, aktivnom ile, donnykh otlozheniyakh metodom kapillyarnogo elektroforeza s ispol'zovaniem sistemy kapillyarnogo elektroforeza «Kapel'»* [Methods for measuring the mass fraction of water-soluble forms of cations in soils, grounds, clays, peat, sewage sludge, activated sludge, bottom sediments by the capillary electrophoresis method using a capillary electrophoresis system "Kapel"]. Moscow, 2012, 29 p. [In Russian]
31. GOST 26423-85. *Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, rN i plotnogo ostatka vodnoy vtyazhki. Postanovlenie Goskomiteta SSSR po standartam ot 08.02.1985 № 283* [Soils. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and solid residue of the aqueous extract. Resolution of the USSR State Committee for Standards dated 08.02.1985 No. 283]. Moscow: Izd-vo Standartov, 1985, 10 p. [In Russian]
32. Robinson C. H., Ineson P., Pearce T. G., Parrington J. *Forest Ecology and Management*. 1996, vol. 86, pp. 253–258.
33. Adejuyigbe C. O., Tian G., Adeoye G. O. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2006, vol. 75, pp. 47–55.
34. Clause J., Barot S., Forey E. *Appl. Soil Ecol.* 2015, vol. 96, pp. 108–113.
35. Jouquet P., Bottinelli N., Podwojewski P., Hallaire V., Tran Duc T. *Geoderma*. 2008, no. 146, pp. 231–238.
36. Pommeresche R., Hansen S., Løes A-K. *Bioacademy 2009: Proceedings of Second Scientific Conference (Lednice, Czech Republic, June 24–26)*. 2009, pp. 67–70.
37. Basker A., Kirkman J. H., Macgregor A. N. *Biol. Fert. Soils*. 1994, vol. 17, pp. 154–158.
38. Kurovsky A. V., Petrochenko K. A., Godymchuk A. Yu., Babenko A. S., Yakimov Yu. E. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 226 0120092019. 2019, vol. 226. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/226/1/012009>.
39. Xu H., Chen H., Wang X., Zhang Y., Wang J., Li N. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018, vol. 165, pp. 564–572.
40. Satchell J. E. *Soil Organisms*. Amsterdam, 1963, pp. 60–66.
41. Carpenter D., Hodson M. E., Eggleton P., Kirk C. *European Journal of Soil Biology*. 2007, vol. 43, pp. 176–183.
42. Pop V. V. *Earthworm Ecology*. Boca Raton, Fla.: St. Lucie Press, 1998, pp. 65–100.
43. Carpenter D., Museum N. H., Hodson M. E., Eggleton P., Museum N. H., Kirk C. *Mineralogical Magazine*. 2008, vol. 72 (1), pp. 33–36.
44. Blouin M., Hodson M. E., Delgado E. A., Baker G., Brussaard L., Butt K. R., Brun J.-J. *European Journal of Soil Science*. 2013, Vol. 64 (2), pp. 161–182.
45. Bityutskiy N. P., Solov'eva A. N., Lukina E. I., Lapshina I. N., Vlasov D. Yu., Kudryashova N. V. *Pochvovedenie [Soil studies]*. 2005, no. 1, pp. 82–91. [In Russian]
46. Perel T. S. *Ecological Bulletins*. 1977, vol. 25, pp. 56–63.
47. Postma-Blauuw M. B., Bloem J., Faber J. H., van Groeningen J. W., de Goede R. G. M., Brussaard L. *Pedobiologia*. 2006, vol. 50, pp. 243–256.
48. Sheehan C., Kirwan L., Connolly J., Bolger T. *Soil Biol. Biochem.* 2006, vol. 29, pp. 743–746.
49. Babiy K. A., Knyazev S. Yu., Golovanova E. V. *Pochvovedenie: Gorizonty budushchego: materialy III Molodezhnoy konferentsii* [Soil studies: horizons of the future: proceedings of III Youth conference]. Moscow: Pochvennyy institut im. V. V. Dokuchaeva, 2019, pp. 39–40. [In Russian]
50. Bossuyt H., Six J., Hendrix P. F. *Geoderma*. 2006, vol. 130, pp. 14–25.
51. Scheu S., Schlitt N., Tiunov A. V., Newington J. E., Jones T. H. *Oecologia*. 2002, vol. 133, pp. 254–260.
52. Shaw C., Pawluk S. *Pedobiologia*. 1986, vol. 29, pp. 377–389.
53. Shaw C., Pawluk S. *Pedobiologia*. 1986, vol. 29, pp. 327–339.
54. Resner K., Yoo K., Sebestyen S. D., Aufdenkampe A., Hale C., Lyttle A., Blum A. *Ecosystems*. 2015, vol. 18, pp. 89–102.
55. Araujo Y., Luizao F. J., Barros E. *Biology and Fertility of Soils*. 2004, vol. 39, pp. 146–152.
56. Cecillon L., Cassagne N., Czarnes S., Gros R., Brun J. J. *Soil Biology and Biochemistry*. 2008, vol. 40, pp. 1975–1979.
57. Mouat M. C. H., Keogh R. G. *Plant and Soil*. 1987, vol. 241, pp. 233–241.
58. Costello D., Lamberti G. *Oecologia*. 2008, vol. 158, pp. 499–510.
59. Lopez-Hernandez D., Lavelle P., Fardeau J. C., Nino M. *Soil Biol Biochem.* 1993, vol. 25, pp. 789–792.
60. Chapuis-Lardy L., Ramiandrisoa R. S., Randriamanantsoa L., Morel C., Rabeharisoa L., Blanchart E. *Biol. Fert. Soils*. 2004, vol. 45, pp. 415–422.



61. Chapuis-Lardy L., Bayon R., Brossard M., Lopez-Hernandez D., Blanchart E. *Soil Biology*. 2014, vol. 26, pp. 199–214.
62. Ros M. B. H., Hiemstra T., Van Groenigen J. W., Chareesri A., Koopmans G. F. *Geoderma*. 2017, vol. 303, pp. 99–109.
63. Knyazev S. Yu., Babiy K. A., Golovanova E. V. *Problemy pochvennoy zoologii: materialy XVIII Vseros. soveshchaniya po pochvennoy zoologii* [Issues of soil zoology: proceedings of XVII All-Russian conference on soil zoology]. Moscow: KMK, 2018, pp. 99–100. [In Russian]
64. Bayon R. C., Binet F. *Soil Biology & Biochemistry*. 2006, vol. 38, pp. 235–246.