

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА МЕЗОКОСМА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ С ДОЖДЕВЫМИ ЧЕРВЯМИ НА ПРИМЕРЕ *APORRECTODEA CALIGINOSA*

Р. Р. Романчук¹, В. Н. Руденко², Е. В. Голованова³

^{1,3}Научно-исследовательская лаборатория систематики и экологии беспозвоночных, ФГБОУ ВО «ОмГПУ», Омск, Россия

^{2,3}Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, Омск, Россия

¹r.romanachuk@omgpu.ru

Аннотация. Исследование влияния диаметра мезокосмов на популяционные показатели дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* и свойства почв необходимо для стандартизации методов почвенно-экологических экспериментов. Цель работы – определение оптимального диаметра мезокосмов, обеспечивающего достоверные результаты при минимальных затратах. Эксперимент проводился в мезокосмах диаметром 10, 15 и 25 см, заполненных аллювиальными дерновыми почвами. Исследовали морфометрические показатели червей (длина, толщина, масса), популяционные параметры (выживаемость, продуктивность, биомасса), а также свойства почв (рН, содержание органического вещества). Статистический анализ выполняли с использованием ANOVA и теста Тьюки. Влияние диаметра мезокосма значимо только для морфометрических показателей, но не для популяционных. Кислотность и содержание органического вещества зависели от присутствия червей и горизонта почвы, но не от диаметра мезокосмов. В экспериментах с дождевыми червями необходимо учитывать диаметр мезокосма при исследованиях морфометрии особей.

Ключевые слова: пашенный червь, дерновые почвы, популяционные показатели, рН, органическое вещество почв, планирование эксперимента

Финансирование: финансирование работы осуществлялось в рамках гранта РНФ №25-14-20073.

Для цитирования: Романчук Р. Р., Руденко В. Н., Голованова Е. В. Влияние диаметра мезокосма на результаты исследований с дождевыми червями на примере *Aporrectodea caliginosa* // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2025. Vol. 10 (3). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2025-3-4>

THE EFFECT OF THE MESOCOSM DIAMETER ON THE RESULTS OF STUDIES WITH EARTHWORMS USING THE EXAMPLE OF *APORRECTODEA CALIGINOSA*

R.R. Romanchuk¹, V.N. Rudenko², E.V. Golovanova³

^{1,3}Research Laboratory of Systematics and Ecology of Invertebrates, Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia

^{2,3}Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

¹r.romanachuk@omgpu.ru

Abstract. The study of the effect of mesocosm diameter on the population parameters of *Aporrectodea caliginosa* earthworms and soil properties is necessary for standardization of soil-ecological experiment methods. The aim of the work is to determine the optimal mesocosm diameter that provides reliable results at minimal cost. The experiment was conducted in mesocosms with a diameter of 10, 15 and 25 cm filled with alluvial sod soils. The morphometric parameters of worms (length, thickness, weight), population parameters (survival, productivity, biomass), and soil properties (pH, organic matter content) were studied. Statistical analysis was performed using ANOVA and Tukey's test. The effect of mesocosm diameter is significant only for morphometric parameters, but not for population ones. Acidity and organic matter content were dependent on the presence of earthworms and the soil horizon, but not on the mesocosm diameter. In experiments with earthworms, it is necessary to take into account the mesocosm diameter when studying the morphometry of individuals.

Keywords: arable worm, fluvisols, population indicators, pH, soil organic matter, experiment planning

Financing: the financing of the work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 25-14-20073.

For citation: Romanchuk R.R., Rudenko V.N., Golovanova E.V. The effect of the mesocosm diameter on the results of studies with earthworms using the example of *Aporrectodea caliginosa*. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2025;10(3). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2025-3-4>

Введение

Проблема использования мезокосмов была поднята еще в 1984 г. Eugene P. Odum. Он акцентировал внимание на использовании мезокосмов в противовес спорам о правильности лабораторных или полевых экологических экспериментов [1]. Позднее была описана технология конструкции металлического мезокосма для изучения почвенных организмов, которая обеспечивала невозможность миграции особей наружу и извне [2]. Сейчас с помощью мезокосмов есть возможность не только изучать мезофауну, но и управлять ее сообществами и отбирать пробы, не нарушая ход эксперимента [3].

В экспериментах с дождевыми червями также стали использовать мезокосмы [4, 5]. До настоящего времени такой способ продолжают выбирать ученые по всему миру, предпочитая, однако трубы разных размеров. Как правило диаметр таких мезокосмов 15–30 см, а глубина варьируется от 40 до 100 см [6–10].

Глубина обитания дождевых червей зависит от экологических особенностей каждого конкретного вида [11], в то время как площадь их распределения мало изучена и, как правило, ограничена плотностью популяции. Так, по данным Gilbert J. Miito et al. [12], в одном кубометре почвы может обитать до 10 тысяч особей, в зависимости от региона и вида.

Поскольку глубина мезокосма четко ограничена слоем почвы, перед исследователями встает вопрос о минимальном диаметре мезокосма, который бы позволил получать валидные результаты. При этом будет возможным сократить материальные и физические затраты на подготовку и снятие экспериментов, тем самым повысив продуктивность рабочей группы. С другой стороны, ответ на этот вопрос дает возможность избежать ошибок при планировании и проведении эксперимента.

Aporrectodea caliginosa (Savigny, 1826) – один из самых распространенных видов в мире [13]. В азиатской части РФ до конца XX в. встречался преимущественно на окультуренных почвах вблизи населенных пунктов [14]. В настоящее время распространен на территории Западной Сибири также в естественных местообитаниях [15, 16]. *A. caliginosa* проявляет высокую экологическую пластичность и адаптируемость в аграрных экосистемах, особенно к сельскохозяйственным практикам, таким как обработка почвы. Кроме того, вид способен выживать в почвах с низким содержанием органического вещества и влаги. *A. caliginosa* играет несколько ключевых экологических ролей, например, участвует в цикле питательных веществ, увеличивая поток азота и снижая соотношение C/N, а также

повышает доступность питательных веществ для растений и микроорганизмов [17].

Целью эксперимента является определение влияния диаметра мезокосмов для исследования дождевых червей.

Задачи исследования: проанализировать размеры и массу, сравнить популяционные показатели (вертикальное распределение, биомассу, выживаемость, продуктивность), определить воздействие на почвы дождевых червей одного вида в мезокосмах с разным диаметром.

Материалы и методы

Эксперимент проводился на территории агростанции ОмГПУ [18] в период с 26 июня по 20 сентября 2024 г. Среднесуточная температура варьировалась от +10 °C (в сентябре) до +23 °C (в июле), количество дней с осадками – 19. Особенностью этого года стал продолжительный период с высоким уровнем грунтовых вод.

Отбор особей для эксперимента проводился на территории агростанции за неделю до начала эксперимента.

Для эксперимента были подготовлены мезокосмы глубиной 25 см с диаметрами 10, 15 и 25 см. Мезокосмы изготовлены из пластиковых труб без антибактериальной и противогрибковой обработки, заклеенных с двух сторон мельничным газом (№ 76) для предотвращения миграции дождевых червей. Использовали аллювиальные дерновые почвы [19] с надпойменной террасы в зеленомощном сосновом сосновке с. Чернолучье Омского района (55°18'17"N 73°03'19"E). Почвы закладывали в мезокосмы по горизонтам: дерн (A₁) мощностью 5 см, серый песок (B) – 10 см, светлый песок (C₁) – 10 см, в соответствии с их естественным расположением. Предварительно почву просеяли через сита с диаметром отверстия 0,4 см с целью дефаунизации. В качестве подстилки использовали мох *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt, выполняющий роль подстилки (горизонт O, мощностью 1 см) в том же лесу. Оптимальную влажность поддерживали путем добавления дистиллированной воды.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Мезокосмы помещали в пробуренные скважины, глубиной 25 см. Количество особей в мезокосме зависело от диаметра: 4, 6 и 12 особей по возрастанию соответственно (509, 339 и 224 особи/м²). Для эксперимента подбирали половозрелых особей с типичной массой (1,1 ± 0,3 г) и размерами. Массу червей измеряли на лабораторных весах, размеры подбирали визуально так, чтобы особи были схожи по длине (69 ± 26 мм) и толщине (4 ± 1 мм).

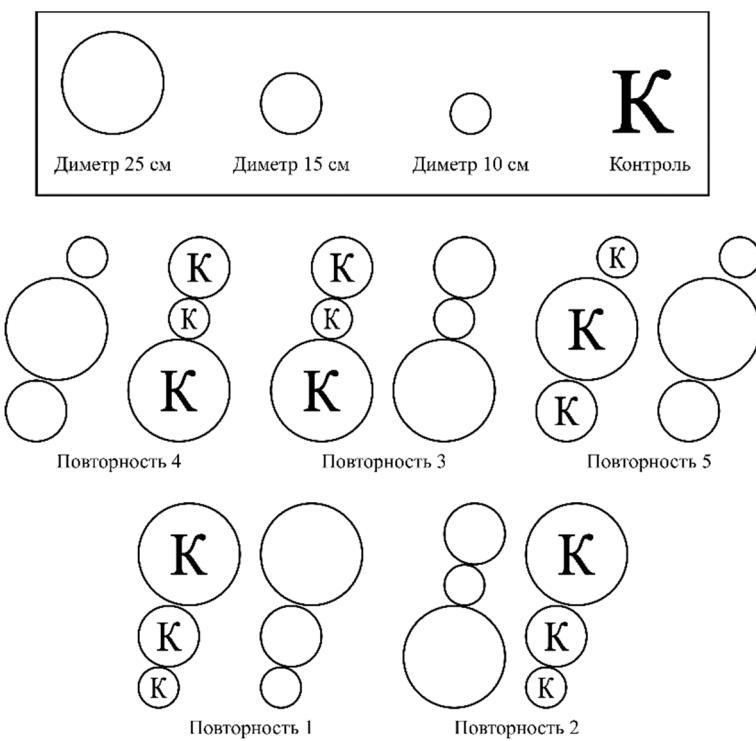


Рис. 1. Схема расположения мезокосмов

Fig. 1. The layout of the mesocosms

В качестве объекта исследования рассматривали влияние диаметра мезокосмов на показатели дождевых червей и характеристики почв, как среды их обитания. Для популяций определялась средняя масса и размеры особей, общая биомасса, выживаемость и продуктивность (отношение суммы коконов и неполовозрелых особей к числу половозрелых) популяций на мезокосме. В почвах измерялись pH водной вытяжки и содержание органического вещества (SOM) в каждом горизонте.

По завершении полевого эксперимента особи дождевых червей из каждого горизонта были отобраны и зафиксированы в спирте (97 %) без предварительной очистки кишечника, а также послойно из каждого мезокосма были отобраны пробы почв в тканевые мешочки.

В лабораторных условиях измерили длину, толщину и массу дождевых червей, определили возрастные состояния по наличию пояска. Ширину измеряли с помощью электронного штангенциркуля в наиболее толстой части перед пояском. На лабораторном pH-метре «АНИОН 4100» определили pH водной вытяжки проб в соответствии с ГОСТ 26423-85 [20]. На фотометре «ЭКСПЕРТ-003» измерили содержание органического вещества (SOM, %) в соответствии с ГОСТ 26213-91 [21].

Нормальность распределения определяли по критериям Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка при уровне значимости $p = 0,05$. Зависимость показателей особей и популяций

и химических показателей почв от диаметра мезокосмов и горизонта почв была выявлена с помощью дисперсионного анализа (ANOVA), при наличии значимой зависимости применяли тест Тьюки для попарного сравнения. Для анализа корреляции между химическими показателями и биомассой и выживаемостью видов применяли тест ранговой корреляции Спирмена, так как анализируемые ряды суммируемых по каждому мезокосму данных значимо отличались от нормального распределения ($p < 0,05$). Статистическую обработку данных проводили в программе STATISTICA (2013).

Результаты и их обсуждение

Индивидуальные показатели червей

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что диаметр мезокосма оказывает статистически значимое влияние на длину ($p = 0,029$), толщину ($p = 0,016$) и массу ($p < 0,01$) особей, а также на их возрастное состояние ($p = 0,021$) (табл. 1). Тест Тьюки выявил значимые различия между диаметрами 15 и 25 см для длины ($p = 0,023$), толщины ($p = 0,016$), массы ($p = 0,006$) и возрастного состояния ($p = 0,027$), что отражено на рис. 2. Это позволяет предположить, что пространственные ограничения мезокосма могут влиять на рост и развитие червей, возможно, за счет изменения доступности ресурсов или плотности популяции.

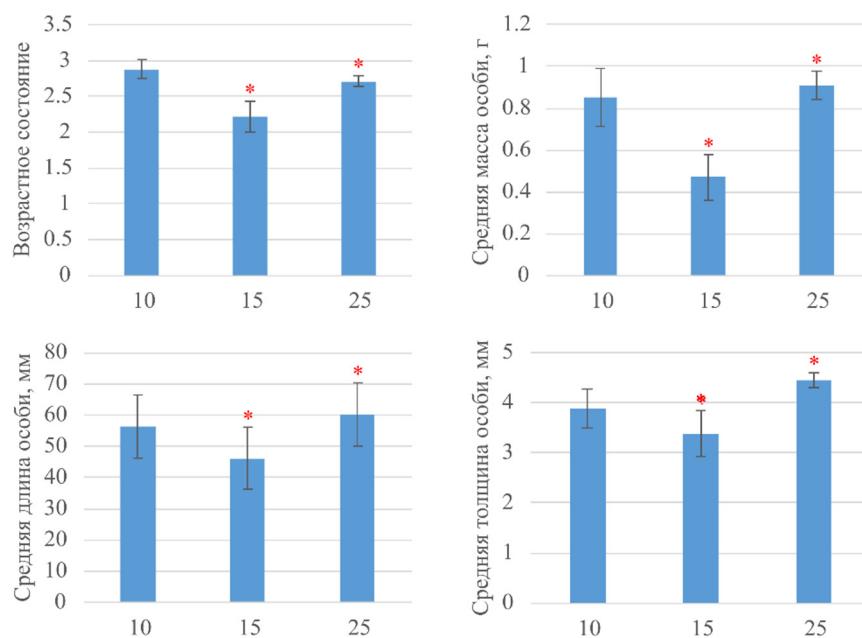


Рис. 2. Размеры и масса особей в зависимости от диаметра мезокосма (см): по оси абсцисс обозначен диаметр мезокосма, * – между столбцами существует значимое отличие по тесту Тьюки ($p < 0,05$); усами обозначена стандартная ошибка

Fig. 2. The size and weight of individuals depending on the diameter of the mesocosm (cm): the abscissa axis indicates the diameter of the mesocosm, * – there is a significant difference between the columns according to the Tukey's test ($p < 0.05$); the whiskers indicate the standard error

Горизонт почвы также оказал значимое влияние на морфометрические параметры: длину ($p = 0,03$), толщину ($p < 0,01$) и массу ($p < 0,01$), но не на возрастное состояние дождевого червя. В течение эксперимента большинство особей концентрировались в горизонте C_1 , а в горизонте B

преобладали половозрелые особи (табл. 1). Тест Тьюки выявил значимые различия горизонтов B и C_1 по сравнению с A_1 в отношении длины и толщины ($p < 0,001$), а также между B и A_1 по массе ($p = 0,02$), что отражено на рис. 3.

Таблица 1

Индивидуальные показатели дождевых червей по окончании эксперимента с разделением по горизонтам почвы

Table 1

Individual indices of earthworms at the end of the experiment with separation by soil horizons

Диаметр мезокосма, см	Горизонт почвы	Процент особей	Возрастное состояние ¹ Среднее ± Ст.ош.	Масса, г Среднее ± Ст.ош.	Длина, мм Среднее ± Ст.ош.	Толщина, мм Среднее ± Ст.ош.
10	O	0	–	–	–	–
10	A_1	0	–	–	–	–
10	B	12,5	3 ± 0	0,6 ± 0	42 ± 0	4 ± 0
10	C_1	87,5	2,8 ± 0,1	0,9 ± 0,16	58 ± 7	3,9 ± 0,6
15	O	5,6	2 ± 0	0,02 ± 0	14 ± 0	1,5 ± 0
15	A_1	0	–	–	–	–
15	B	1,1	2,5 ± 0,5	0,5 ± 0,4	27 ± 16	3,5 ± 2,5
15	C_1	83,3	2,2 ± 0,2	0,5 ± 0,1	53 ± 6	3,6 ± 0,4
25	O	4,8	3 ± 0	1,3 ± 0,4	61 ± 7	4,7 ± 0,4
25	A_1	4,8	2 ± 0	0,027 ± 0,003	16,2 ± 0,6	1 ± 0
25	B	33,9	2,8 ± 0,1	1,0 ± 0,1	62 ± 3	4,6 ± 0,2
25	C_1	56,5	2,7 ± 0,1	0,88 ± 0,08	63 ± 1	4,7 ± 0,1
Все группы			2,63 ± 0,08	0,81 ± 0,06	57 ± 2	4,2 ± 0,1

П р и м е ч а н и е: ¹ Для анализа возрастные состояния были приведены к цифровым обозначениям, где 1 – коконы, 2 – неполовозрелые особи, 3 – половозрелые особи.

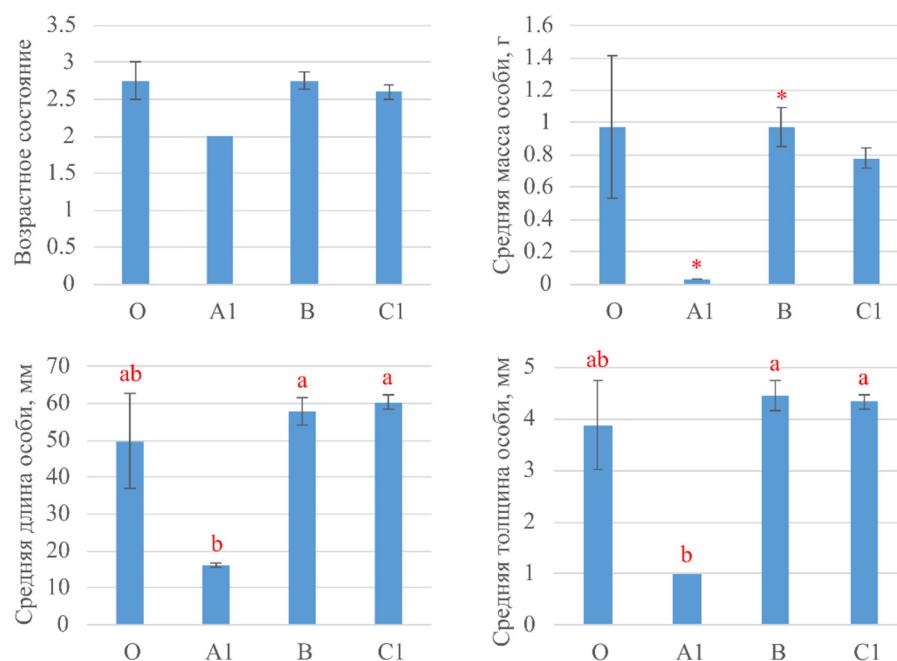


Рис. 3. Показатели особей в зависимости от почвенного горизонта: по оси абсцисс обозначены горизонты почвы; * – между столбцами существует значимое отличие по тесту Тьюки ($p < 0,05$); разными строчными буквами (a, b) над столбцами обозначены значимо отличающиеся группы; усами обозначена стандартная ошибка

Fig. 3. Individual indicators depending on the soil horizon: the abscissa axis indicates the soil horizons; * – there is a significant difference between the columns according to the Tukey's test ($p < 0.05$); different lowercase letters (a, b) above the columns indicate significantly different groups; whiskers indicate the standard error

Полученные результаты согласуются с исследованиями сезонной динамики распределения дождевых червей в почвенном профиле, указанными в литературных источниках. Например, в Англии черви с экстремальным повышением температуры мигрировали в более глубокие слои [22]. Аналогичные тенденции отмечены в Швеции и Австралии, где черви в теплый период уходят на глубину более 20 см [22]. Так может проявляться стратегия выживания особей в жаркий и засушливый периоды, более выраженная у активных половозрелых особей, чем у ювенильных.

Двухфакторный анализ подтвердил совместное влияние диаметра мезокосма и горизонта почвы на массу ($p = 0,004$), длину ($p < 0,001$) и толщину ($p < 0,001$) червей. Тест Тьюки выявил различия в возрастном состоянии в горизонте О при диаметрах 15 и 25 см ($p = 0,02$), а также в длине особей в горизонте В в тех же диаметрах ($p = 0,02$). Распределение дождевых червей по горизонтам в мезокосмах разного диаметра отображено в табл. 1.

Для половозрелых особей влияние горизонта почвы и диаметра мезокосма на размеры и массу оказалось незначимым, что может указывать на их меньшую чувствительность к условиям среды по сравнению с молодыми особями.

Исследование Е. В. Головановой и др. (2023) показало, что в мезокосмах диаметром 32 см черви распределяются преимущественно в слое 0–5 см, но встречаются и глубже (до 25 см) [10]. Наши данные подтверждают, что пространственные ограничения мезокосма влияют на распределение червей, однако в нашем эксперименте большее количество особей сосредоточилось в горизонте С1, что может быть связано с особенностями экспериментальных условий.

В работе по исследованию популяционных показателей *A. caliginosa* в системе почвенных ризотронов с сосновыми (горизонты Ap, Bh, Bs, C) и лиственными (горизонты A, B, C) породами (глубина 170 см) продемонстрировано, что вид при разных типах растительности меняет распределение по сезонам: зимой и весной особи проникают глубже (до 70 см в хвойных и до 40 см в лиственных почвах), тогда как летом и осенью концентрируются в верхних 30 см [23]. Это согласуется с предположением о том, что вертикальное распределение червей может быть стратегией выживания.

Более ранние исследования в южной Финляндии показали, что основная часть популяции располагается в верхних 8 см почвы, но особи встречаются до глубины в 30 см, тогда как ювенильные чаще встречаются на глубине до 15 см,

а наиболее массивные – 15–20 см [24]. В нашем эксперименте также отмечено, что половозрелые особи преобладали в среднем слое (горизонт В).

Популяционные показатели

По результатам эксперимента рассчитали изменение популяционных показателей дождевых червей при разных диаметрах мезокосмов (табл. 2). Дисперсионный анализ не выявил статистически значимого влияния диаметра мезокосма на изменение средней массы особей, сохранение биомассы, выживаемость и продуктивность популяции, что может быть связано с высокой вариабельностью данных.

На уровне тенденций наибольшая сохранность биомассы отмечена в мезокосмах

диаметром 25 см, тогда как в мезокосмах 10 и 15 см этот показатель был ниже. Аналогичная тенденция наблюдалась для средней массы половозрелых особей: в мезокосмах на 10 и 15 см биомасса популяции снизилась, тогда как при диаметре 25 см зафиксирован прирост массы. Выживаемость популяции также переменчива в зависимости от диаметра мезокосма: максимальные значения зарегистрированы при диаметре 25 см, тогда как в мезокосмах 15 и 10 см выживаемость составила около половины популяции. Для половозрелых особей различия между мезокосмами 10 и 15 см были менее выражены, в то время как при диаметре 25 см выживаемость оставалась высокой. Продуктивность популяции была максимальной в мезокосмах 15 см, умеренной при 25 см и минимальной при 10 см.

Таблица 2

Популяционные показатели по окончании эксперимента

Table 2

The population indicators at the end of the experiment

Диаметр мезокосма, см	Процент от исходной биомассы Среднее ± Ст.ош.	Процент от исходной массы половозрелых Среднее ± Ст.ош.	Выживаемость популяции, % Среднее ± Ст.ош.	Выживаемость половозрелых, % Среднее ± Ст.ош.	Продуктивность, % Среднее ± Ст.ош.
10	28 ± 15	46 ± 20	40 ± 17	35 ± 19	5 ± 0
15	28 ± 12	58 ± 24	60 ± 18	30 ± 13	30 ± 8
25	98 ± 33	110 ± 13	103 ± 36	85 ± 32	18 ± 8
Все группы	51 ± 15	71 ± 13	68 ± 15	50 ± 14	18 ± 5

В различных исследованиях ученых, несмотря на диаметр мезокосмов, сохранялась высокая выживаемость дождевых червей, и, как правило, это сопровождалось низкой исходной плотностью. Например, исследование P. Garamszegi et al. (2025) показало, что в микрокосмах диаметром 7 см при плотности посадки 122 особи/м² *A. caliginosa* демонстрировали 100 % выживаемости и увеличение биомассы [25]. В работе N. S. Eriksen-Hamel (2006) с мезокосмами диаметром 11 см также зафиксирована выживаемость 100 ± 20 % [26], а J. P. McDaniel et al. (2013) при диаметре 13 см (плотность 118 особей/м²), получил увеличение средней массы особей на 17,7 %, но снижение их количества на 10 % [27]. P. M. Fraser et al. (2003) в эксперименте с разной подкормкой наблюдал увеличение количества особей на 40–140 % при снижении биомассы на 40–50 % в мезокосмах 19 см (плотность 600 особей/м²) [28]. У J. Frazão et al. в мезокосмах с диаметром 19 см произошло снижение популяционных показателей в среднем на 20 % [29]. M. Räty (2004) в имитации зимнего периода наблюдал снижение биомассы на 51 % и количества особей на 42 % при диаметре

мезокосма 32 см (плотности популяции 125 особей/м²) [30]. В работе Е. В. Головановой и др. (2023) при использовании в мезокосмов диаметром 32 см при исходной плотности 83 особей/м² выживаемость *A. caliginosa* составила 80 %, при этом к концу эксперимента ювенильных особей было в два раза больше, а коконов три раза меньше, чем изначально половозрелых особей [10]. В то же время K.-R. Laossi et al. (2011) зафиксировал выживаемость 20 % в мезокосмах диаметром 50 см (плотность 105 особей/м²) в долгосрочном (полтора года) эксперименте по влиянию червей на одноклеточные растения [8]. D. M. Costello (2008) использовал мезокосмы диаметром 37 см, и получил увеличение биомассы на 4,6 г/м² и увеличения доли *A. caliginosa* в трехвидовом сообществе на 10 % за 36 дней [31].

В России большую работу по изучению дождевых червей в мезокосмах провел А. В. Уваров (2017, 2021). В этом исследовании показано, что выживаемость и продуктивность дождевых червей в мезокосмах диаметром 20 см были выше при меньшей плотности популяции: 120 особей/м² против 600 особей/м², и в ряду 30–90 особей/м² [32, 33].

Можно предположить, что большее влияние на динамику популяции оказывают плотность дождевых червей при закладывании эксперимента, кормовая база и другие факторы, но не диаметр мезокосма.

Химические показатели почв

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена органического вещества почв с популяционными показателями были значимы только при рассмотрении по отдельности выборок из мезокосмов с различным диаметром. Корреляция «процент от исходной массы для всех возрастных

состояний» и SOM составила $-0,90 \pm 0,01$, «процент от исходной массы половозрелых» и SOM – $-0,97 \pm 0,004$ при диаметре 10 см. Между pH почв и «процент от исходной массы половозрелых» – $-0,975 \pm 0,004$, pH и «выживаемость» – $-0,949 \pm 0,008$ при диаметре 15 см.

Кислотность почв в мезокосмах разного диаметра близка по значениям и составляет $6,30 \pm 0,05$. Содержание органического вещества в почвах также было близко при разном диаметре, в среднем $5,2 \pm 0,3\%$. Значения pH и органики почв в разных диаметрах мезокосмов по горизонтам в контроле и под воздействием дождевых червей представлены в табл. 3.

Таблица 3

pH и органическое вещество почв по окончании эксперимента

Table 3

pH and soil organic matter at the end of the experiment

Диаметр, см	Горизонт почвы	pH (Среднее \pm Ст.ош.)		SOM, % (Среднее \pm Ст.ош.)	
		A.c.	контроль	A.c.	контроль
10	A ₁	5,98 \pm 0,07	5,93 \pm 0,17	7,1 \pm 2,1	7,9 \pm 1,2
10	B	6,04 \pm 0,05	6,15 \pm 0,04	5,0 \pm 0,4	5,6 \pm 0,5
10	C ₁	6,59 \pm 0,09	6,98 \pm 0,04	3,0 \pm 0,1	2,8 \pm 0,1
15	A ₁	5,93 \pm 0,14	5,81 \pm 0,06	4,6 \pm 0,8	7,4 \pm 1,2
15	B	6,06 \pm 0,06	6,44 \pm 0,18	5,7 \pm 0,3	4,4 \pm 1,3
15	C ₁	6,73 \pm 0,09	7,09 \pm 0,04	3,5 \pm 0,2	3,2 \pm 0,2
25	A ₁	5,99 \pm 0,04	5,95 \pm 0,07	6,0 \pm 1,1	10,8 \pm 1,1
25	B	5,92 \pm 0,02	6,06 \pm 0,16	5,3 \pm 0,4	5,9 \pm 1,0
25	C ₁	6,70 \pm 0,07	6,97 \pm 0,08	3,5 \pm 0,1	3,1 \pm 0,3
10–25	A ₁	5,97 \pm 0,05	5,90 \pm 0,05	5,8 \pm 0,7***	8,8 \pm 0,8***
	B	6,01 \pm 0,03*	6,22 \pm 0,09*	5,3 \pm 0,7	5,3 \pm 0,6
	C ₁	6,67 \pm 0,05***	7,01 \pm 0,03***	3,3 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1
Все группы		6,22 \pm 0,06***	6,38 \pm 0,08***	4,8 \pm 0,3*	5,6 \pm 0,8*

pH

Трехфакторный дисперсионный анализ показал, что значимо влияет на pH наличие дождевых червей ($p < 0,01$), горизонт отбора пробы ($p = 0$) и совместное влияние факторов: наличие особей и горизонт ($p < 0,01$). Значимого влияния диаметра мезокосмов на pH не отмечено. Результаты теста Тьюки отражены в табл. 3.

Полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов, но и демонстрируют некоторые особенности.

В работе S. Garbuz et al. (2019) в шестимесячном эксперименте по взаимодействию *A. caliginosa* с биоуглем при использовании мезокосмов диаметром 15 см по 4 червя в каждом (226 особей/ m^2), измерения проводились в слоях 0–5 и 5–10 см. В верхнем слое в андозоле (вулканических почвах) pH почв в варианте с червями не отличался от pH в контроле (5,6), а в камбизоле (бурых лесных) отличался значимо (5,7 и 5,4 соответственно), в нижнем слое – значимо отличались значения в обоих типах почв (5,8–5,7,

6,0–5,5 соответственно) [34]. Это подтверждает наши данные о зависимости pH от горизонта почв и присутствия червей при диаметре мезокосма 15 см.

У K. Y. Chan (2004) при изучении увеличения продуктивности пастбищ на альфисолях (осоложденная почва) с использованием мезокосмов диаметром 30 см при низкой и высокой плотности *A. caliginosa* (в каждом мезокосме было 15 и 30 дождевых червей, соответственно 212 и 424 особей/ m^2) в течение вегетационного сезона установил, что в разных слоях pH зависит от присутствия червей, но не от плотности исходной популяции [36]. В нашем исследовании pH зависел и от горизонта, и от наличия дождевых червей.

Содержание органического вещества

Многофакторный анализ показал, что наличие особей в мезокосмах значимо влияет на органическое вещество почв ($p = 0,03$). Существует значимое влияние на органику горизонта

отбора пробы ($p = 0$) и совместное влияние наличия особей и горизонта ($p < 0,01$). Результаты теста Тьюки отражены в виде указания уровня значимости попарных различий между контролем и вариантом с *A. caliginosa* в табл. 3. Значимого влияния диаметра мезокосмов на SOM не отмечено.

В работе S. Garbuz et al. (2019) в верхнем слое андозолов (вулканических почв) в мезокосмах диаметром 15 см содержание органического углерода почв (SOC) в варианте с *A. caliginosa* (6,5 %) значимо отличалось от SOC в контроле (6,9 %), в камбизоле (бурых лесных) отличалось не значимо (3,26 и 3,35 % соответственно), а в нижнем слое значимо отличались значения SOM в обоих типах почв (6,5 и 6,9 %, 2,9 и 3,3 % соответственно) [34]. Это подтверждает наши результаты по взаимодействию факторов: горизонт и наличие червей.

Исследование Y. Qiu et al. (2025) с использованием феррисолей и *Pheretima guillelmi* (Michaelsen, 1895) продемонстрировало сложную зависимость влияния червей на SOC от плотности популяции: при высокой плотности (64 особи/м²) SOC почти не изменилось, тогда как при средней плотности (32 особи/м²) увеличивалось на 31 %, а в контроле упало на 35 % [35]. В нашем эксперименте, проводившемся при больших плотностях популяции, подобной четкой зависимости выявлено не было, что может указывать на существование пороговой плотности популяции для проявления эффекта на содержание органики в почвах.

В исследовании влияния вида на поток CO₂ M. Šimek (2010) использовались трубы ПВХ диаметром 10 см в глинистом суглинке камбизоле, в каждой по 10 особей вида (100 особей/м²)

измерения проводили в слоях 0–2, 9–11 и 18–20 см, из которых только в верхнем было значимое отличие содержания органического углерода в контроле от варианта с червями (2,25 к 2,21 %) [37], что подтверждает наши результаты о значимом уменьшении органического вещества почв в верхнем слое.

Можно предположить, что большее влияние на изменение химии почв оказывает не размер мезокосма и изначальная плотность популяции, а жизнедеятельность самих организмов, тип почв и глубина обитания.

Заключение

Проведенное исследование показало, что диаметр мезокосмов значимо влияет на размеры и массу дождевых червей, но не на популяционные показатели *A. caliginosa*. Кислотность (pH) и содержание органического вещества (SOM) значимо зависели от присутствия червей и горизонта почв, но не от диаметра мезокосмов.

Полученные результаты имеют важное значение для планирования экспериментов с почвенной мезофауной. Использование мезокосмов диаметром 25 см позволит получать более презентативные данные о влиянии факторов на морфометрические показатели, а для исследования популяционных показателей и химии почв можно проводить исследования в мезокосмах различного диаметра, отталкиваясь от исходного количества дождевых червей, типа почв и трудозатрат.

Результаты работы также подчеркивают необходимость учета вертикального разделения почвы при изучении воздействия дождевых червей на слои и горизонты.

Список литературы

1. Odum E. P. The Mesocosm // BioScience. 1984. Vol. 34, № 9. P. 558–562.
2. Bruckner A., Wright J., Kampichler C. [et al.]. A method of preparing mesocosms for assessing complex biotic processes in soils // Biol Fertil Soils. 1995. Vol. 19, № 2–3. P. 257–262.
3. Gibson K. S., Johnson N. C., Neher D. A., Antoninka A. J. A field mesocosm method for manipulation of soil mesofauna communities and repeated measurement of their ecological functions over months to years // Pedobiologia. 2025. Vol. 108. P. 151019.
4. Svendsen C., Weeks J. M. Low-Cost Field Mesocosm for Ecotoxicological Studies on Earthworms // Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology. 1997. Vol. 117, № 1. P. 31–40.
5. Hale C. M., Frelich L. E., Reich P. B., Pastor J. Exotic earthworm effects on hardwood forest floor, nutrient availability and native plants: a mesocosm study // Oecologia. 2008. Vol. 155, № 3. P. 509–518.
6. Ashwood F., Butt K. R., Doick K. J., Vanguelova E. I. Interactive effects of composted green waste and earthworm activity on tree growth and reclaimed soil quality: A mesocosm experiment // Applied Soil Ecology. 2017. Vol. 119. P. 226–233.
7. Ganault P., Nahmani J., Capowiez Y. [et al.]. Earthworms and plants can decrease soil greenhouse gas emissions by modulating soil moisture fluctuations and soil macroporosity in a mesocosm experiment // PLOS ONE. 2024. Vol. 19, № 2. P. e0289859.
8. Laossi K.-R., Noguera D. C., Decaens T., Barot S. The effects of earthworms on the demography of annual plant assemblages in a long-term mesocosm experiment // Pedobiologia. 2011. Vol. 54, № 2. P. 127–132.
9. Villenave C., Rabary B., Kichenin E. [et al.]. Earthworms and Plant Residues Modify Nematodes in Tropical Cropping Soils (Madagascar): A Mesocosm Experiment // Applied and Environmental Soil Science. 2010. Vol. 2010. P. 1–7.

10. Golovanova E. V., Kniazev S. Yu., Karaban K. [et al.]. First Short-Term Study of the Relationship between Native and Invasive Earthworms in the Zone of Soil Freezing in Western Siberia – Experiments in Mesocosms // Diversity. 2023. Vol. 15, № 2. P. 248.
11. Novak A. Biotopical distribution of earthworms of Lumbricidae family in Alma-Ata region // Vestnik of Ulyanovsk SAA. 2015. Vol. 32, № 4. P. 78–83.
12. Miito G. J., Alege F., Harrison J., Ndegwa P. Influence of earthworm population density on the performance of vermicfiltration for treating liquid dairy manure // J of Env Quality. 2024. Vol. 53, № 6. P. 1176–1187.
13. *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826) in GBIF Secretariat (2023). GBIF Backbone Taxonomy. URL: <https://www.gbif.org/species/2307759>
14. Всеволодова-Перель Т. С. Дождевые черви фауны России: Кадастр и определитель / отв. ред. Н. М. Чернова ; Рос. акад. наук, Ин-т лесоведения. М. : Наука, 1997. 98 с.
15. Голованова Е. В., Князев С. Ю., Бабий К. А., Цвирко Е. И. Распространение чужеродного вида дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* в естественных местообитаниях Омской области // Познание и деятельность: от прошлого к настоящему : материалы II Всерос. междисципл. науч. конф. Омск, 2020. С. 299–302.
16. Golovanova E. V., Romanchuk R. R., Shcherbakov V. E. [et al.]. Distribution and Abundance of European Earthworm Species in Irtysh Forests // Russ J Ecol. 2024. Vol. 55, № 6. P. 548–561.
17. Bart S., Amossé J., Lowe C. N. [et al.]. *Aporrectodea caliginosa*, a relevant earthworm species for a posteriori pesticide risk assessment: current knowledge and recommendations for culture and experimental design // Environ Sci Pollut Res. 2018. Vol. 25, № 34. P. 33867–33881.
18. Golovanova E. V., Unru D. P., Babiy K. A. [et al.]. Can Earthworm Invasions from Rudny Altai (Kazakhstan) in the South of Western Siberia Change the Amount of Humus in Meadow Chernozem (Calcareous Chernozem) Soils? // Biogenic – Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems 2022 / ed. by O. V. Frank-Kamenetskaya [et al.]. Cham : Springer International Publishing, 2023. P. 395–409.
19. Аветов Н. А., Александровский А. Л., Алябина И. О. [и др.]. Национальный атлас почв Российской Федерации. М. : Астрель, 2011. 632 с.
20. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. URL: <https://gostassistant.ru/doc/69595fb0-0f28-49b4-aeae-23efbc396a50>
21. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. URL: <https://gostassistant.ru/doc/2ac430cc-ab72-48d4-bdbc-8204a03b4ef0>
22. Edwards C. A., Arancon N. Q. Biology and Ecology of Earthworms. New York : Springer US, 2022.
23. Potvin L. R., Lilleskov E. A. Introduced earthworm species exhibited unique patterns of seasonal activity and vertical distribution, and *Lumbricus terrestris* burrows remained usable for at least 7 years in hardwood and pine stands // Biology and Fertility of Soils. 2017. Vol. 53, № 2. P. 187–198.
24. Pitkänen J., Nuutinen V. Distribution and abundance of burrows formed by *Lumbricus terrestris* L. and *Aporrectodea caliginosa* Sav. in the soil profile // Soil Biology and Biochemistry. 1997. № 3–4 (29). C. 463–467.
25. Garamszegi P., Calogiuri T., Hagens M. [et al.]. A density-based method to objectively quantify earthworm activity // Applied Soil Ecology. 2025. Vol. 206. P. 105771.
26. Eriksen-Hamel N. S., Whalen J. K. Growth rates of *Aporrectodea caliginosa* (Oligochaetae: Lumbricidae) as influenced by soil temperature and moisture in disturbed and undisturbed soil columns // Pedobiologia. 2006. Vol. 50, № 3. P. 207–215.
27. McDaniel J. P., Stromberger M. E., Barbarick K. A., Cranshaw W. Survival of *Aporrectodea caliginosa* and its effects on nutrient availability in biosolids amended soil // Applied Soil Ecology. 2013. Vol. 71. P. 1–6.
28. Fraser P. M., Beare M. H., Butler R. C. [et al.]. Interactions between earthworms (*Aporrectodea caliginosa*), plants and crop residues for restoring properties of a degraded arable soil // Pedobiologia. 2003. Vol. 47, № 5–6. P. 870–876.
29. Frazão J., De Goede R. G. M., Capowiez Y., Pulleman M. M. Soil structure formation and organic matter distribution as affected by earthworm species interactions and crop residue placement // Geoderma. 2019. Vol. 338. P. 453–463.
30. Räty M. Growth of *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea caliginosa* in an acid forest soil, and their effects on enchytraeid populations and soil properties // Pedobiologia. 2004. Vol. 48, № 4. P. 321–328.
31. Costello D. M., Lamberti G. A. Non-native earthworms in riparian soils increase nitrogen flux into adjacent aquatic ecosystems // Oecologia. 2008. Vol. 158, № 3. P. 499–510.
32. Uvarov A. V. Density-dependent responses in some common lumbricid species // Pedobiologia. 2017. Vol. 61. P. 1–8.
33. Uvarov A. V. The Overwinter Survival of three Earthworm Species in Mono- and Multispecific Assemblages // Biology Bulletin. 2021. Vol. 48, № 6. P. 821–828.
34. Garbuz S., Camps-Arbestain M., Mackay A. [et al.]. The interactions between biochar and earthworms, and their influence on soil properties and clover growth: A 6-month mesocosm experiment // Applied Soil Ecology. 2019. P. 103402.
35. Qiu Y., Tang R., Liu Y. [et al.]. Field experiment reveals varied earthworm densities boost soil organic carbon more than they increase carbon dioxide emissions // Geoderma. 2025. Vol. 456. P. 117251.
36. Chan K. Y., Baker G. H., Conyers M. K. [et al.]. Complementary ability of three European earthworms (*Lumbricidae*) to bury lime and increase pasture production in acidic soils of south-eastern Australia // Applied Soil Ecology. 2004. Vol. 26, № 3. P. 257–271.
37. Šimek M., Pižl V. Soil CO₂ flux affected by *Aporrectodea caliginosa* earthworms // Open Life Sciences. 2010. Vol. 5, № 3. P. 364–370.

References

1. Odum E.P. The Mesocosm. *BioScience*. 1984;34(9):558–562.
2. Bruckner A., Wright J., Kampichler C. et al. A method of preparing mesocosms for assessing complex biotic processes in soils. *Biol Fertil Soils*. 1995;19(2–3):257–262.
3. Gibson K.S., Johnson N.C., Neher D.A., Antoninka A.J. A field mesocosm method for manipulation of soil mesofauna communities and repeated measurement of their ecological functions over months to years. *Pedobiologia*. 2025;108:151019.
4. Svendsen C., Weeks J.M. Low-Cost Field Mesocosm for Ecotoxicological Studies on Earthworms. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*. 1997;117(1):31–40.
5. Hale C.M., Frelich L.E., Reich P.B., Pastor J. Exotic earthworm effects on hardwood forest floor, nutrient availability and native plants: a mesocosm study. *Oecologia*. 2008;155(3):509–518.
6. Ashwood F., Butt K.R., Doick K.J., Vanguelova E.I. Interactive effects of composted green waste and earthworm activity on tree growth and reclaimed soil quality: A mesocosm experiment. *Applied Soil Ecology*. 2017;119:226–233.
7. Ganault P., Nahmani J., Capowiez Y. et al. Earthworms and plants can decrease soil greenhouse gas emissions by modulating soil moisture fluctuations and soil macroporosity in a mesocosm experiment. *PLOS ONE*. 2024;19(2):e0289859.
8. Laossi K.-R., Noguera D.C., Decäens T., Barot S. The effects of earthworms on the demography of annual plant assemblages in a long-term mesocosm experiment. *Pedobiologia*. 2011;54(2):127–132.
9. Villenave C., Rabary B., Kichenin E. et al. Earthworms and Plant Residues Modify Nematodes in Tropical Cropping Soils (Madagascar): A Mesocosm Experiment. *Applied and Environmental Soil Science*. 2010;2010:1–7.
10. Golovanova E.V., Kniazev S.Yu., Karaban K. et al. First Short-Term Study of the Relationship between Native and Invasive Earthworms in the Zone of Soil Freezing in Western Siberia – Experiments in Mesocosms. *Diversity*. 2023;15(2):248.
11. Novak A. Biotopical distribution of earthworms of Lumbricidae family in Alma-Ata region. *Vestnik of Ulyanovsk SAA*. 2015;32(4):78–83.
12. Miito G.J., Alege F., Harrison J., Ndegwa P. Influence of earthworm population density on the performance of vermicfiltration for treating liquid dairy manure. *J of Env Quality*. 2024;53(6):1176–1187.
13. *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826) in GBIF Secretariat (2023). GBIF Backbone Taxonomy. Available at: <https://www.gbif.org/species/2307759>
14. Vsevolodova-Perel' T.S. *Dozhdevyye chervi fauny Rossii: Kadastr i opredelitel'* = Earthworms of the Russian fauna: Cadastre and identification guide. Moscow: Nauka, 1997:98. (In Russ.)
15. Golovanova E.V., Knyazev S.Yu., Babiy K.A., Tsvirko E.I. Spread of the alien species of earthworms Aporrectodea caliginosa in natural habitats of the Omsk region. *Poznaniye i deyatel'nost': ot proshloga k nastoyashchemu: materialy II Vseros. mezhdiscipl. nauch. konf.* = Cognition and activity: from past to present: proceedings of the All-Russian interdisciplinary scientific conference. Omsk, 2020:299–302. (In Russ.)
16. Golovanova E.V., Romanchuk R.R., Shcherbakov V.E. et al. Distribution and Abundance of European Earthworm Species in Irtysh Forests. *Russ J Ecol*. 2024;55(6):548–561.
17. Bart S., Amossé J., Lowe C.N. et al. Aporrectodea caliginosa, a relevant earthworm species for a posteriori pesticide risk assessment: current knowledge and recommendations for culture and experimental design. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;25(34):33867–33881.
18. Golovanova E.V., Unru D.P., Babiy K.A. et al. Can Earthworm Invasions from Rudny Altai (Kazakhstan) in the South of Western Siberia Change the Amount of Humus in Meadow Chernozem (Calcic Chernozem) Soils? *Bio-geogenic – Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems* 2022. Cham: Springer International Publishing, 2023:395–409.
19. Avetov N.A., Aleksandrovskiy A.L., Alyabina I.O. et al. *Natsional'nyy atlas pochv Rossiyskoy Federatsii* = National Soil Atlas of the Russian Federation. Moscow: Astrel', 2011:632. (In Russ.)
20. GOST 26423-85. *Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, rN i plotnogo ostaika vodnoy vtyazhki* = Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH, and solid residue of aqueous extracts. (In Russ.). Available at: <https://gostassistent.ru/doc/69595fb0-0f28-49b4-aeae-23efbc396a50>
21. GOST 26213-91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* = Soils. Methods for determining organic matter. (In Russ.). Available at: <https://gostassistent.ru/doc/2ac430cc-ab72-48d4-bdbc-8204a03b4ef0>
22. Edwards C.A., Arancon N.Q. *Biology and Ecology of Earthworms*. New York: Springer US, 2022.
23. Potvin L.R., Lilleskov E.A. Introduced earthworm species exhibited unique patterns of seasonal activity and vertical distribution, and Lumbricus terrestris burrows remained usable for at least 7 years in hardwood and pine stands. *Biology and Fertility of Soils*. 2017;53(2):187–198.
24. Pitkänen J., Nuutinen V. Distribution and abundance of burrows formed by Lumbricus terrestris L. and Aporrectodea caliginosa Sav. in the soil profile. *Soil Biology and Biochemistry*. 1997;(3–4):463–467.
25. Garamszegi P., Calogiuri T., Hagens M. et al. A density-based method to objectively quantify earthworm activity. *Applied Soil Ecology*. 2025;206:105771.
26. Eriksen-Hamel N.S., Whalen J.K. Growth rates of Aporrectodea caliginosa (Oligochaetae: Lumbricidae) as influenced by soil temperature and moisture in disturbed and undisturbed soil columns. *Pedobiologia*. 2006;50(3):207–215.

27. McDaniel J.P., Stromberger M.E., Barbarick K.A., Cranshaw W. Survival of *Aporrectodea caliginosa* and its effects on nutrient availability in biosolids amended soil. *Applied Soil Ecology*. 2013;71:1–6.
28. Fraser P.M., Beare M.H., Butler R.C. et al. Interactions between earthworms (*Aporrectodea caliginosa*), plants and crop residues for restoring properties of a degraded arable soil. *Pedobiologia*. 2003;47(5–6):870–876.
29. Frazão J., De Goede R.G.M., Capowiez Y., Pulleman M.M. Soil structure formation and organic matter distribution as affected by earthworm species interactions and crop residue placement. *Geoderma*. 2019;338:453–463.
30. Räty M. Growth of *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea caliginosa* in an acid forest soil, and their effects on enchytraeid populations and soil properties. *Pedobiologia*. 2004;48(4):321–328.
31. Costello D.M., Lamberti G.A. Non-native earthworms in riparian soils increase nitrogen flux into adjacent aquatic ecosystems. *Oecologia*. 2008;158(3):499–510.
32. Uvarov A.V. Density-dependent responses in some common lumbricid species. *Pedobiologia*. 2017;61:1–8.
33. Uvarov A.V. The Overwinter Survival of three Earthworm Species in Mono- and Multispecific Assemblages. *Biology Bulletin*. 2021;48(6):821–828.
34. Garbuz S., Camps-Arbestain M., Mackay A. et al. The interactions between biochar and earthworms, and their influence on soil properties and clover growth: A 6-month mesocosm experiment. *Applied Soil Ecology*. 2019;103:402.
35. Qiu Y., Tang R., Liu Y. et al. Field experiment reveals varied earthworm densities boost soil organic carbon more than they increase carbon dioxide emissions. *Geoderma*. 2025;456:117251.
36. Chan K.Y., Baker G.H., Conyers M.K. et al. Complementary ability of three European earthworms (Lumbricidae) to bury lime and increase pasture production in acidic soils of south-eastern Australia. *Applied Soil Ecology*. 2004;26(3):257–271.
37. Šimek M., Pižl V. Soil CO₂ flux affected by *Aporrectodea caliginosa* earthworms. *Open Life Sciences*. 2010;5(3):364–370.