ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА»
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

Фролов Олег Алексеевич

Агрофизические и биологические свойства копролитов червей *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus*

Специальность 1.5.15 – Экология (биологические науки)

Специальность 4.1.5 – Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика (биологические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научные руководители:
д.б.н., доцент, Е.Ю. Милановский
д.б.н., профессор, А.Л. Степанов

Москва – 2024

Оглавление

Список сокращений 5
Введение 6
Глава 1 Современное состояние проблемы исследования 13
1.1 Дождевые черви и агрофизические свойства почв 14
1.2 Взаимодействие дождевых червей и микроорганизмов 16
1.3 Накопление углерода в почве под воздействием дождевых червей 19
1.4 Содержание азота в копролитах дождевых червей 20
1.5 Изотопы углерода $\delta^{13}C$ и азота $\delta^{15}N$ в исследование дождевых червей 21
1.6 Гранулометрический состав копролитов дождевых червей 23
1.7 Микроагрегатный состав копролитов дождевых червей 24
1.8 Реологические свойства копролитов дождевых червей 26
1.9 Удельная поверхность копролитов дождевых червей 28
1.10 Краевой угол смачивания поверхности твердой фазы 29
1.11 Численность бактерий в копролитах дождевых червей 30
1.12 Дегидрогеназная активность копролитов дождевых червей 31
1.13 Эстеразная активность копролитов дождевых червей 33
1.14 Комплексный структурно-функциональный метод 34
Глава 2. Материалы и методы исследования 36
2.1 Дизайн экспериментов 36
Эксперимент 1: 38
Эксперимент 2: 39
Эксперимент 3: 40
2.2 Методы 41
2.2.1 Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота 41
2.2.2 Содержание органического углерода 43
2.2.3 Окисление органического вещества почвы 43
2.2.4 Гранулометрический состав 43
2.2.5 Микроагрегатный анализ 45

2.2.6 Анализ морфологии гранулометрических фракций 46
2.2.7 Реологические параметры 47
2.2.8 Определение удельной поверхности 48
2.2.9 Краевой угол смачивания (КУС) поверхности твердой фазы 49
2.2.10 Численность микроорганизмов (метод посева) 49
2.2.11 Численность микроорганизмов (метод прямой люминесцентной микроскопии) 50
2.2.12 Дегидрогеназная активность 50
2.2.13 Эстеразная активность 51
2.2.14 Анализ кривых роста бактерий 52
2.2.15 Комплексный статистистический анализ изученных свойств 56
Глава 3. Результаты и обсуждение 58
3.1 Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота (с кленовым опадом). 58
3.2 Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота (с кукурузой). 62
3.3 Гранулометрический состав 66
3.4 Морфология гранулометрических фракций 72
3.5 Микроагрегатный состав. 84
3.6 Определение удельной поверхности 88
3.7 Краевой угол смачивания 90
3.8 Реологические характеристики 92
3.9 Численность бактерий 96
3.9.1 Определение чашечным методом Коха 96
3.9.2 Определение численности с помощью прямой люминесцентной микроскопии 97
3.10 Ферментативная активность 100
3.10.1 Дегидрогеназная активность 100
3.10.2 Эстеразная активность 102
3.11 Параметры кривых роста 103
3.12 Определение ключевых факторов для разделения объектов методами многомерной статистики 108

3.12.1 Дисперсионный анализ (ANOVA) 108
3.12.2 Метод главных компонент (МГК) 109
3.12.3 Корреляционный анализ 115
Заключение 117
Выводы: 118
Список литературы: 120
Приложения 149

Список сокращений

%N – содержание общего азота

%С орг – содержание органического углерода

CHNS – элементный анализатор для определение концентрации углерода, водорода, азота и серы в твёрдых органических веществах модель Vario Isotope Cube (Elementar, Германия).

IRMS – изотопный масс-спектрометр модель precisION IRMS (производства Isoprime, Великобритания).

Sуд. – площадь удельной поверхности

ГС – гранулометрический состав

копролиты L – копролиты *L.rubellus*

копролиты А – копролиты *A. caliginosa*

КУС – краевой угол смачивания

МГК – метод главных компонент

ОВ – органическое вещество

П-контроль – исходная почва

ПО – исходная почва с опадом

ПОВ - почвенное органическое вещество

почва L – почва, где жили *L.rubellus.*

почва А – почва, где жили *A. caliginosa*

ТФФ – трифенилформазан

ФДА – флуоресцеин диацетат

ЭПЧ – элементарная почвенная частица

Введение

Актуальность темы работы. Плодородие почв напрямую связано с жизнедеятельностью почвенной биоты (Звягинцев и др., 2005; Filser at al., 2016). Работ, посвященных изучению взаимосвязей в почве и модификаций почвенной биотой свойств почвы, достаточно много. Тем не менее, подходы и методы исследования в зависимости от задач сильно варьируют. Например, почвенная биота рассматривается как центральный объект исследования (Чернов и др., 2017) или как действующий агент, влияющий на почву и формирующий ее свойства (Кутовая и др., 2018; Bi et al., 2018). Можно рассматривать почвенную биоту, как биоиндикатор изменений свойств почв (Frouz et al., 2013; Ma et al., 2013) или как ключевое звено в глобальных циклах вещества и энергии в экосистеме (Edwards, 2004; Römbke et al., 2005; Blouin et al., 2013). Дождевые черви являются одними из самых изучаемых представителей почвенной фауны (Гиляров, 1951; Bal, 1970; Бызов, 2005; Звягинцев и др., 2005; Прусак и др., 2008; Кураков, Харин, 2012; Huang, Xia, 2018; Peigne et al., 2018; Sanchez-Hernandez et al., 2018; Sanchez-Hernandez, 2018; Фролов, Якушев, 2018; Гераськина, 2020; Drut et al., 2023). Изучается их физиология (Satchell, 1983), экология (Юрков и др., 2008; Тихонов и др., 2011; Кутовая, 2012; Храмченкова и др., 2012), использование в сельскохозяйственной отрасли (Бызов, Якушев, 2008; Blouin et al., 2013), а также как один из индикаторов для сравнения типов землепользования (Arai et al., 2013; Белобров и др., 2021). Необходимо отметить, что при изучении дождевых червей редко уделяется отдельное внимание копролитам, в большинстве экспериментов рассматривается почва или субстрат, где живут черви, и сравнивается с контролем без дождевых червей. Данный подход не позволяет ясно оценить, за счет чего происходят изменения в тех или иных свойствах почвы или субстрата. Не всегда ясно – произошло ли изменение за счет появления растительных остатков на поверхности, их преобразования микроорганизмами, или же отличия вызваны деятельностью дождевых червей.

При оценке всей почвы, где жили черви, неизбежно произойдет усреднение результата, в то время как наиболее активные процессы и изменения происходят именно в копролитах. Именно они являются «hot points» для этих микроорганизмов (Medina-Sauza et al., 2019). Более точное понимание вклада дождевых червей в формирование почвы возможно при разделении таких объектов как почва, где обитают черви, и непосредственно копролиты. Несмотря на многочисленные исследования дождевых червей и их деятельности по преобразованию среды обитания, копролитам уделено мало внимания. Из-за гетерогенности и изменения свойств копролитов со временем (Bal, 1970) их исследования редки. Модельные лабораторные эксперименты позволяют изучить копролиты в контролируемых условиях, как самостоятельный объект исследования. Отдельной проблемой служит то, что копролиты разных видов дождевых червей практически невозможно отличить друг от друга визуально, а достоверных критериев позволяющий их различить не предложено. Подобные ограничения существенно затрудняют или делают невозможным проведение и интерпретацию результатов для экспериментов с копролитами с учетом особенностей разных видов дождевых червей.

Известно (Бобров и др., 1991; Schulmann, Tiunov, 1999; Бызов, 2005; Marhana, Scheub, 2005; Прусак и др., 2008; Georgiadis et al., 2019), что дождевые черви могут накапливать минеральные частицы и измельчать существующие в почве частицы растительных остатков. Это позволяет утверждать, что деятельность дождевых червей изменяет такую базовою характеристику почвы, как гранулометрический состав, по крайне мере это должно наблюдаться для копролитов дождевых червей. Если изменяется гранулометрический состав, то должна изменяться и структура (должны быть изменения в микроагрегатном составе, реологических свойствах). Потребление органических частиц и их измельчение, и перемешивание в кишечнике вместе с почвой может приводить к увеличению органических частиц в копролитах (могут быть изменения содержания органического углерода, азота, изотопов углерода и азота в копролитах) за счет не полного преобразования и

поглощения питательных веществ в кишечнике дождевых червей. Уменьшение размера частиц увеличивает общую площадь поверхности (должно быть изменение удельной поверхности). Если увеличивается площадь доступного для микроорганизмов субстрата, то должна увеличиваться активность и численность микроорганизмов (возрастет количество КОЕ на г почвы или же численность клеток, для сообщества микроорганизмов может наблюдаться изменение предельной численности организмов, т.к. потенциальная емкость среды изменится). Функциональную активность микроорганизмов можно оценить по ферментативной активности (одним из хороших показателей активности микроорганизмов являются дегидрогеназная (Юровская, 1977; Wolińska, Stępniewska, 2012; Kumar et al., 2013; Bini et al., 2013; Кожевников, 2016) и эстеразная активность (Adam, Duncan, 2001; Enock, 2002; El-Tarabily, 2002)).

Выдвинуто несколько предположений:

1) Суточные копролиты дождевых червей отличаются по агрофизическим и биологическим свойствам от почвы.

2) Отличия в свойствах копролитов обусловлены преобразованием органических остатков в кишечнике дождевых червей.

3) Копролиты разных видов дождевых червей по-разному влияют на агрофизические и биологические свойства почвы.

4) Существует ряд свойств, которые могут являться диагностическим признаком для дифференциации разных видов дождевых червей.

Цель работы: комплексное исследование изменений свойств почвы после прохождения через кишечник дождевых червей (*Aporrectodea caliginosa, Lumbricus rubellus)* в условиях модельного эксперимента.

Задачи:

- Получить комплекс параметров описывающих свойства копролитов дождевых червей, полученных в модельном эксперименте.

- Определить отличия суточных копролитов дождевых червей *A.caliginosa* и *L.rubellus* от контрольной почвы.
- Установить свойства, статистически достоверно разделяющие копролиты дождевых червей *A.caliginosa* и *L.rubellus*

Научная новизна. Впервые для ряда единовременно измеренных аналитических показателей (гранулометрический состав, микроагрегатный состав, удельная поверхность твердой фазы, реологические характеристики, краевой угол смачивания, дегидрогеназная активность, эстеразная активность, численность бактерий, параметры кривых роста бактерий, содержание органического вещества, его насыщенность азотом, их изотопный состав) анализируется взаимосвязь свойств для копролитов дождевых червей (*Aporrectodea caliginosa; Lumbricus rubellus),* содержавшихся в почве пахотного горизонта чернозема миграционно-мицелярного. Определение гранулометрического состава исходных копролитов и после окисления в них органического вещества впервые позволило установить, что в копролитах присутствуют минеральные частицы размером > 100 мкм, которые не были определены в исходной почве. Установлено, что часть из этих ЭПЧ образованы из биогенного кремнезема растительных остатков. Анализ взаимосвязи свойств копролитов дождевых червей позволил установить два основных фактора, влияющих на изученные свойства: увеличение содержания органического вещества и появление в ГС крупных минеральных частиц в копролитах.

Теоретичсекая и практическая значимость. В природе значение дождевых червей сложно переоценить. Многие авторы (Jouquet et al., 2006; Blouin et al., 2013; Schon et al., 2017; Nuutinen, Butt, 2019; Boselli et al., 2020) отмечают важность наличия дождевых червей на полях, их вклад в стабилизацию органического вещества (Pulleman et al., 2005; Angst et al., 2019), его поступление в почвенные агрегаты (Guhra et al., 2021). Полученные результаты позволят конкретизировать роль копролитов в преобразовании почвы дождевыми червями, что является необходимым условием для

формирования моделей, обеспечивающих эффективное использование почвенных экосистем. При интерпретации данных гранулометрического состава и степени дифференциации почвенного профиля по SiO_2 следует учитывать возможность наличия ЭПЧ биогенного генезиса, отсутствующих в почвообразующей породе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В копролитах дождевых червей *A.caliginosa* и *L.rubellus* могут присутствовать ЭПЧ, превышающие по размеру ЭПЧ исходной почвы.
2. При прохождении через кишечник дождевых червей *A.caliginosa* и *L.rubellus* опада листьев клена (*Acer platanoides* L.) в копролитах накапливаются минеральные ЭПЧ биогенного генезиса.
3. Совокупность показателей (гранулометрический и микроагрегатный состав, эстеразная активность, численность бактерий, содержание органического вещества, насыщенность азотом и углеродом) позволяет достоверно различать копролиты эндогейных (*A.caliginosa*) и эпигейных (*L.rubellus*) дождевых червей между собой и фоновой почвой при наличии или отсутствии растительного опада.

Методология исследования основывается на применении лабораторных инкубационных экспериментов, аналитических методов и статистического анализа результатов по общепринятым методикам.

Степень достоверности результатов. Свойства копролитов определяли в трех последовательных экспериментах. Для анализа свойств копролитов использовали не менее трехкратной повторности. Статистическую обработку проводили с использованием программного пакета Excel и Statistica. Использовали дисперсионный анализ (ANOVA), метод главных компонент (МГК), корреляционный анализ, сравнение средних по U-критерию Манна-Уитни, сравнения средних по t-критерию Стьюдента. На рисунках данные, соответствующие нормальному распределению представлены в виде средних с

95% доверительным интервалом, не соответствующие нормальному распределению представлены в виде медианы и квартилей.

Апробация работы была проведена на четырех конференциях: «Почвоведение: Горизонты будущего» 2018-2020 гг., «2018 Student Conference Life Sciences in the 21st Century: Looking into the Future» 2018 г. Москва. Полученные в диссертации результаты являются оригинальными, их достоверность определяется большим объемом полученных данных, использованием традиционных и современных методов и подходов, корректным использованием статистических методов.

Личный вклад автора: Планирование и постановка модельных экспериментов. Отбор и идентификация дождевых червей. Подготовка и отбор образцов к анализам. Проведение измерений (ГС, микроагрегатный анализ, микрокопирование фракций, определение реологических параметров, удельной поверхности, краевого угла смачивания, содержания органического углерода, численности микроорганизмов, дегидрогеназной активности, эстеразной активности, параметров комплексного структурно-функционального метода). Анализ и статистическая обработка результатов, написание диссертации и автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и заключения, 20 приложений, списка литературы из 247 источников, из которых 165 на иностранных языках. Общий объем диссертации – 223 страницы (из них 75 страниц приложение), диссертация содержит 41 рисунок и 12 таблиц.

Публикации в рецензируемых журналах из списков RSCI, Web of Science, Scopus

1. **Фролов О.А.**, Якушев А.В. Влияние на бактериальный гидролитический комплекс гумусо-аккумулятивного горизонта техноурбанозема пассажа через кишечник дождевого червя Aporrectodea

caliginosa // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. – 2018. – №. 94. – С. 57-73. – DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-57-73 – ИФ по РИНЦ (2022) – 1,411, количество печатных листов (п.л.) – 1, личный вклад – 0,5 п.л.

2. **Фролов О.А.**, Якушев А.В., Милановский Е. Ю. Гетерогенность свойств копролитов дождевых червей Aporrectodea caliginosa и Lumbricus rubellus в модельном опыте на черноземе // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. – 2019. – №. 99. – С. 92-116. – DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-92-116 – ИФ по РИНЦ (2022) – 1,411, 1,4 п.л., личный вклад – 0,7 п.л.

3. **Фролов О.А.**, Милановский Е.Ю. Размер и содержание органических частиц в копролитах *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* //Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2022. – №. 58. – С. 6-27. – DOI: 10.17223/19988591/58/1 – Q4 – SRJ Scopus – 0,17, 1,9 п.л., личный вклад – 1,2 п.л.

Публикаций в прочих научных изданиях:

4. **Фролов О.А.**, Терехин А.В., Якушев А.В., Милановский Е.Ю. Method for determining microbial activity (hydrolysis of fluorescein diacetate (FDA), 490 nm) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1093. – №. 1. – С. 012016. – DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012016 - SRJ – 0,2, 0,57 п.л., личный вклад – 0,3 п.л.

Благодарности. Выражаю мою глубокую признательность моим учителям Милановскому Е.Ю., Степанову А.Л., Якушеву А.В., а также всем сотрудникам кафедры физики и мелиорации почвы и кафедры биологии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова. Отдельная благодарность Гольевой А.А. и Салимгареевой О.А. за помощь в проведение электронной микроскопии. Исследование было поддержано грантом РФФИ №19-34-90069.

Глава 1 Современное состояние проблемы исследования

Состоит из 14 подразделов, в которых приведено описание физических и биологических свойств копролитов дождевых червей. Приводятся литературные данные о гранулометрическом, микроагрегатном составе, удельной поверхности, краевом угле смачиваемости, реологическим свойствам, численности бактерий, дегидрогеназной и эстеразной активности копролитов. Приводятся данные о накопление углерода и азота в связи с деятельностью дождевых червей, рассматриваются результаты исследований копролитов комплексным структурно-функциональным методом.

В публикациях результаты исследования одноименных свойств копролитов в большинстве случаев получены с использованием разных методов, что приводит к противоречивым и несопоставимым выводам. Например, по данным (Прусак и др., 2008) в гранулометрическом составе (ГС) (метод лазерной дифракции, образец с органическим веществом (ОВ)) копролитов отмечено увеличение содержания крупных фракции, а в работе (Asawalam, Johnson, 2007) их снижение, по сравнению с контрольной почвой (ареометрический метод, образец без ОВ). По данным удельная поверхность копролитов относительно вмещающей почвы как увеличивается (Прусак и др., 2008 (методом газовой хроматографии оценивали сорбцию паров воды)), так и уменьшается (Lyttle et al., 2015 (рассчитана для фракции <2 мм с удалением органики в муфельной печи; метод газовой хроматографии по сорбции N_2)). Гидрофобность копролитов увеличивается (Юшкова и др., 2006; Jouquet et al., 2008; Столбовая, Старикова, 2014; Bottinelli et al., 2021; Le Mer et al., 2021). Увеличивается гидрофильность копролитов (Прусак и др., 2008; Симохина-Прусак, 2009; Осадчий, 2017). Уменьшение водоустойчивость копролитов (Shipitalo, Protz, 1989; Marinissen, Dexter, 1990; Decaëns et al., 2000) и повышение (Shipitalo, Protz, 1989; Marinissen, Dexter, 1990; Hindell et al., 1997). Дегидрогеназная активность снижается (Aira et al., 2002), не изменяется (Tao et al., 2009) или увеличивается (Suthar, 2008). Эстеразная активность по разным данным как увеличивается (Tao et al., 2009), так и уменьшается (Якушев и

Бызов, 2009). Анализ литературных данных свидетельствует, что для интерпретации результатов исследования копролитов необходим комплексный подход с использованием единых методов и процедур подготовки образцов к анализам.

1.1 Дождевые черви и агрофизические свойства почв

Дождевые черви активно влияют на различные агрофизические свойства почвы. Об этом впервые говорил ещё Ч.Р. Дарвин в своей работе (Darwin, 1892), а в дальнейшем (Dawson, 1948; Гиляров, 1951; Bal, 1970; и др.). Так Ч.Р. Дарвин и Р.К. Доусон отмечали изменение стабилизации агрегатов почвы за счет увеличения водостойкости. М.С. Гиляров и Л. Бал указывали на общее, комплексное изменение профиля почвы, оказываемое дождевыми червями.

В настоящее время большой интерес представляет изучение влияния на почву червей на возделываемых, сельскохозяйственных землях, с учетом различных типов обработки. Так, в статье (Bottinelli et al., 2010) сравнивали три обработки почвы: отвальная вспашка, поверхностная обработка и прямой посев (no-till). Копролиты дождевых червей определяли количественно с помощью анализа изображений на глубине 2 и 12 см. Под стабильностью агрегатов почвы, понимали: средневзвешенный диаметр частиц и факторы, участвующие в стабилизации агрегатов почвы, такие как органический углерод в почве, содержание экстрагируемых в горячей воде углеводов и водоотталкивающие свойства агрегатов. За контроль взята почва (bulk soil), не связанная с ризосферой. По результатам изменялся гранулометрический состав, за счет того, что увеличивалось количество органического вещества почвы (оцененное по содержанию углерода и по экстрагируемым в горячей воде углеводам) и водоотталкивающие свойства. Авторы сделали вывод, что копролиты дождевых червей более стабильны, чем почвенные агрегаты, а накопление копролитов, увеличение их числа (особенно ярко выраженное на глубине (12см)) приводит к общему увеличению стабильности почвы. Надо

отметить, что авторы указали, что следует проводить дальнейшие и более детальные исследования, чтобы подтвердить этот эффект.

К схожим выводам приходят ученые из Аргентины (Bedano at al, 2019). Проведя масштабное и комплексное изучение, они пришли к выводу, что почвенная фауна, и дождевые черви в частности, являются ключевым компонентом функционирования почвы. Свои выводы они сделали на основании изучения различных вариантов обработок почвы на территории Аргентины (Пампасы). По результатам исследования органические элементарные почвенные частицы (POM) были на 100% выше в копролитах по сравнению с почвой (bulk soil). Плотность копролитов и водоустойчивость выше, чем в почвенных агрегатах.

Аналогично в работе (Al-Maliki, Scullion, 2013) указывается на повышение стабильности агрегатов при наличии в почве дождевых червей. В работе (Basker at al., 1994) показано увеличение значений pH в копролитах дождевых червей, влияние на доступность калия (в зависимости от почвы наличие или отсутствие червей может как повышать, так и снижать этот показатель). Отмечаются изменения в гранулометрическом составе, увеличение тонких фракций в копролитах по сравнению с контрольной почвой.

«На 1 м^2 почвы может быть от нескольких десятков до сотен ходов, их общая протяженность достигает более 800 м, а объем доходит до 9 л/м^2. Ход червей в диаметре составляет 1-10 мм. Объем, занимаемый ходами, может составлять до 5 % от общего объема почвы (Edwards, Lofty, 1977) или 60 % от всех крупных почвенных пор (макропор) (Satchell, 1983).» (Бызов, 2005). Существующие 3D модели построения ходов дождевых червей предлагают модели, позволяющие оценить ходы дождевых червей в профиле почвы. Для цилиндра 20 см диаметром и 40 см высотой, длина системы ходов может достигать от 1558±898 до 8728±2753 мм (Jégou at al., 2001). Для цилиндра 16 см диаметром и 35 см высотой длина ходов может составлять от 6270 мм до 15 920 мм (Capowiez at al, 2011). Отмечается корреляция между скоростью

инфильтрации воды и биомассой червей (0,975), длинной ходов, поверхностью и объемом (при r=0,99). Не выявлено корреляции между диаметром ходов, извилистостью, количеством дождевых червей (Bouché, Al-Addan, 1997). В работе (Le Mer et al., 2021) приводилось исследование, посвященное уточнению времени существования нор дождевых червей, так как их деградация со временем может существенно изменять инфильтрацию воды в почве.

В совокупности все вышеперечисленные данные указывают на то, что дождевые черви значительно изменяют условия почвы в зависимости от своей активности, численности и видовой принадлежности. При прогнозировании, создании моделей и ведении сельскохозяйственной деятельности следует обязательно учитывать биологический компонент – почвенную фауну и, в частности, дождевых червей.

1.2 Взаимодействие дождевых червей и микроорганизмов

На основании монографии Бызова Б.А. (2005) во взаимодействии дождевых червей и микроорганизмов можно выделить ряд принципов:

1. Дождевые черви, пропуская пищу через свой пищеварительный тракт, модифицируют микробные сообщества, отбирая микроорганизмы. Переваривание микроорганизмов животными видо- и штаммоспецифично. Помимо пищеварительных ферментов есть «киллерные вещества» небелковой природы (сильнокислые и сильнощелчные кишечные выделения, эмульгаторы жиров (детергенты) пищеварительных желёз и т.д.), убивающие микроорганизмы и позволяющие животному употребить их в пищу.

2. Кишечник дождевых червей - специфическое местообитание в почве («горячая точка»), отличающееся особым видовым составом и повышенной активностью многих микробов. Функциональная роль кишечных ассоциативных микроорганизмов беспозвоночных (в том числе и дождевых червей) и позвоночных аналогична.

3. При питании почвенных животных (трофический механизм) происходит гибель одних микроорганизмов и обогащение почвы другими, размножившимися в кишечнике. При этом трансформируется и сам перевариваемый корм животных.

4. Регуляция по метаболическому механизму основана на воздействии физиологически активных метаболитов животных (поверхностные и кишечные слизи дождевых червей, продукт азотистого обмена мочевина и т.д.) на микроорганизмы.

5. Взаимодействие микроорганизмов с дождевыми червями (как и с другими почвенными животными) регулирует состояние почвенной биоты (состав, обилие, активность) и основные почвенные процессы: разложение органического вещества или его иммобилизация (консервация) и др. Дождевые черви как «экосистемные инженеры» формируют микробные сообщества, определяют динамику (изменение) биомассы и продукции микроорганизмов, транспорт микробов и их распределение по профилю почв. В кишечнике осуществляется обмен генами между разными таксонами микробов.

В почве легкодоступные формы азота, фосфора, а также большинство аминокислот запасено в микробной биомассе (Покаржевский и др., 1984). Поэтому, существует мнение, что источником азота, аминокислот (Бигон и др., 1989) для дождевых червей являются в первую очередь микроорганизмы. При этом свежий опад дождевые черви переваривают плохо (Mindermann, Daniels, 1967), т.к. провести гидролиз полимеров лигнина, целлюлозы, хитина без участия микроорганизмов дождевые черви не могут (Паников и др., 1985). Исследованию питания дождевых червей посвящены различные работы, например, эксперименты по выделению предпочтительных групп микроорганизмов для питания компостных червей *Eisenia fetida* (Morgan, 1980). Другие авторы (Hand, Hayes, 1988) утверждают, что дождевые черви *E. fetida* питаются непосредственно переваренными микроорганизмами, а не продуктами их жизнедеятельности. Выделяются наборы видов грибов, предпочитаемых и не предпочитаемых дождевыми червями (Piearce, 1978;

Cooke, 1983; Марфенина, 1989; Moody et al., 1996; Марфенина, Ищенко, 1997). В настоящее время проводятся работы, посвященные поиску взаимосвязи разных видов дождевых червей с некоторыми фитопатогенными грибами, например, показано уменьшение видов грибов рода *Fusarium* в присутствии дождевых червей видов *M. Guillemi* (Bi et al., 2018). В книге «Зоомикробные взаимодействия в почве» (Бызов, 2005) указывается на то, что при прохождении через пищеварительный тракт дождевых червей снижается обилие грибного мицелия, особенно темноокрашенных грибов, и увеличивается обилие бактерий, в основном, за счет грамотрицательных. Судьба микробных клеток зависит от вида и даже штамма микроорганизма. Это может быть гибель с лизисом клеток, замедление скорости размножения при сохранении жизнеспособности, нейтральная реакция, размножение или инициация прорастания спор, генетический обмен. Кишечные симбионты более устойчивы к пребыванию в кишечной среде. В результате формируется микробное население в почве.

Пищеварительный тракт животных - специфическое местообитание микроорганизмов в почве. Физико-химические условия (состав питательных элементов, pH, окислительно-восстановительный потенциал, влажность) и биологические факторы (ферментативная активность, наличие киллерных веществ) формируют не типичные для почвы микробные сообщества. Выделяются два типа сообществ кишечных бактерий: пристеночное - на внутренней поверхности стенок кишечника и полостное - в содержимом кишечника. В пристеночном сообществе почвенных дождевых червей доминируют факультативно-анаэробные гамма протеобактерии и актинобактерии. Численность микроорганизмов возрастает от переднего отдела пищеварительного тракта к заднему отделу и достигает 10^8 КОЕ/г кишечных тканей. Плотность заселения поверхности кишечника микроорганизмами в десятки и сотни тысяч раз выше, чем поверхности почвенных частиц. Функции микроорганизмов кишечника связаны прежде всего с явлением симбионтного питания. Кишечные микроорганизмы являются

источником незаменимых аминокислот и витаминов, реутилизируют продукты обмена животных, могут участвовать в разложении пищи, осуществляют азотфиксацию. Симбионты повышают устойчивость кишечника к колонизации чужеродными микроорганизмами за счет образования антибиотических веществ (кишечный иммунитет).

Главной отличительной особенностью взаимодействия микроорганизмов с дождевыми червями является наличие развитого симбиотического сообщества в пищеварительном тракте, состоящего из бактерий, грибных спор и гиф. Прямая регулирующая роль этих животных по отношению к почвенным микробам состоит, в основном, в модификации микробных сообществ при их прохождении через пищеварительный тракт, поскольку дождевые черви способны заглатывать крупные фрагменты субстрата, заселенные целым набором микроорганизмов.

1.3 Накопление углерода в почве под воздействием дождевых червей

Дождевые черви способствуют накоплению углерода в почве. Поскольку основным источником пищи для дождевых червей являются микроорганизмы, то растительные остатки в основном преобразовываются, а не поглощаются доеждвыми червями. Дождевые черви фракционируют органическое вещество почвы (ПОВ) и создают стабильную структуру почвы за счет включения ПОВ в почвенные макроагрегаты (Lavelle et al., 1997; Brown et al., 2000; Tanner, 2001). Дождевые черви объединяют за счет прохождения через кишечник минеральные и органические частицы (Blanchart et al., 1997; Brown et al., 2000; Lavelle, Spain, 2001). Эти биологические процессы в сочетании с механизмами биогеохимической стабилизации ПОВ определяют время пребывания ПОВ в почве (Schmidt et al., 2011).

Согласно одному из исследований проведенному в Новой Зеландии содержание углерода в почве увеличивается на 30% (Makeschin, 1997). В работе (Fonte at el., 2007) показано увеличение углерода в результате присутствия червей в макроагрегатах и микроагрегатах на 35% и 49%

соответственно. В другой работе (Knowles et al., 2016) показано увеличение связанного с микроагрегатами углерода в присутствии червей *Aporrectodea tuberculata* на 60% в микроагрегатах (>2 мм). В работе (Huang et al., 2015) отмечается увеличение секвестрации углерода в присутствии эпигейных и эндогейных дождевых червей за счет увеличения доступности углерода для микробиоты.

В работе (Chang et al., 2016) авторы связали снижение дыхания почвы в присутствии дождевых червей с образованием ими агрегатов; снижением микробной трансформации лабильного углерода и активностью антимикробных пептидов. Авторы пришли к выводу, что механизмы, с помощью которых четыре вида дождевых червей (в работе рассматриваются *Amynthas hilgendorfi, Lumbricus rubellus, Octolasion lacteum* и *Eisenoides lonnbergi*) влияют на судьбу полученного из подстилки углерода и его минерализацию, являются видоспецифичными. Для *L.rubellus* отмечается отрицательный неаддитивный эффект, предположительно за счет воздействия на анаэробные микросайты в почве.

1.4 Содержание азота в копролитах дождевых червей

Ежедневный выход азота из червей составляет 88 – 270 мг/кг биомасссы и достигает нескольких десятков килограмм на гектар в год (Makeshin, 1997). В работе (Fonte at el., 2007) отмечается увеличение азота в результате присутствия червей в макроагрегатах и микроагрегатах на 41% и 49% соответственно. В работе (Groenigen et al., 2019) отмечается увеличение в копролитах более чем на 240% для минерального азота. Повышение содержания азота в копролитах связано с увеличением численности денитрифицирующих бактерий в кишечнике дождевых червей и большей скорости денитрификации по сравнению с почвой (Karsten, Drake, 1997; Matthies at al., 1999; Drake, Horn, 2007; Харин, Кураков, 2009). Иные авторы (Yang at al., 2015) указывают, что увеличение содержания азота в почве за счет преобразования опада происходит за счет активизации дождевыми червями (в

том числе *A. caliginosa*) эктомикоризного сообщества грибов. Отдельный ряд работ (Drake, Horn, 2007; Majeed et al., 2013; Chen et al., 2014) указывает на увеличение выбросов закиси азота (N_2O) за счёт активизации микробного сообщества в присутствии дождевых червей. Для дождевых червей отмечается увеличение концентрации NH4-N на 31% по сравнению с контрольной почвой (McDaniel et al., 2013). Другие авторы (Битюцкий и др., 2007) отмечают, что увеличению азота способствует не только вклад непосредственно самих копролитов, но и влияние копролитов на почву за счет соединений аммония в копролитах дождевых червей. Современные исследования показывают, что содержание азота в присутствии червей повышается для разных морфо-экологических групп (Гераськина, 2020). В работе (García-Palacios et al., 2014; Andriuzzi et al., 2016) показывается, что дождевые черви не влияют на содержание азота в почве, но оказывают влияние на потребление азота из почвы растениями. Авторами отмечается неаддитивный эффект при рассмотрении разных видов дождевых червей совместно.

1.5 Изотопы углерода $\delta^{13}C$ и азота $\delta^{15}N$ в исследование дождевых червей

Изотопы углерода и азота активно используются в исследование дождевых червей. Проводится изучение рациона разных экологических групп (Ferlian et al., 2014; Зенкова и др., 2019) или же отдельно взятой экологической группы дождевых червей, например *Octolasion tyrtaeum (*Marhan et al.,2007). Изучаются возможности разложения водорослей дождевыми червями *Eisenia fetida* (Korobushkin et al., 2023), влияние дождевых червей на микробиологическое сообщество почвы (Drut et al., 2023), изменения влияния на почвенное органическое вещество на полях (Paul et al., 2012; Guo et al., 2021), вклад дождевых червей в климаторегулирующие функции лесов (Лукина и др., 2020). Исследуется работа кальциевых желез *Lumbricus terrestris* (Versteegh et al., 2017).

В работе (Groffman et al., 2015) с дождевыми червями *Lumbricus rubellus* или *Lumbricus terrestris.* измерялись пулы и процессы почвенного углерода и азота, поступление $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ из опада сахарного клена (*Acer saccharum* Marsh.) в почвенную микробную биомассу, пулы дыхания почвы, а также минерализуемого и неорганического азота. Эксперимент проводили на 2 участках в учебно-исследовательском лесу Арно весной и два раза осенью 2008 и 2009 годов. Исследователи сделали вывод, что общие запасы азота и углерода в почве на участках, с дождевыми червями, сократились при этом сокращение азота намного меньше, чем углерода. Авторами отмечается, что пулы углерода и азота в микробной биомассе были выше на участках, с дождевыми червями (особенно на участках с доминированием *L.rubellus).* Содержание изотопов $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ выше в микробной биомассе, и меньше в пулах минерализуемого и неорганического азота на этих участках, а показатели потенциальной чистой минерализации азота и нитрификации, ниже, чем в контроле (участках без дождевых червей). Авторы делают вывод, что стимуляция микробной биомассы и активности дождевых червей лежит в основе истощения запасов углерода в почве, а также удержания и поддержания запасов азота в почве, по крайней мере, в северных лиственных лесах. Дождевые черви увеличивают емкость почвы для микробной биомассы и облегчают поступление азота из подстилки в стабильное органическое вещество почвы. Однако, снижение содержания углерода в почве и отношения C:N может увеличить вероятность гидрологических и газообразных потерь на участках, колонизированных дождевыми червями, при изменении условий окружающей среды.

В работе (Шиленкова, Тиунов, 2014) изучались механизмы питания дождевых червей *Pontoscolex corethrurus* (Müller 1857). С использованием изотопов $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ расчитана доля экспериментально внесенного углерода. Показано, что в тканях дождевых червей *P. corethrurus* доля ассимилированного углерода составила 6.2 ± 1.0 и 7.4 ± 2.4% для опада <0,25 мм и 0,25-0,5 мм, 20.8±1.4% для глюкозы.

1.6 Гранулометрический состав копролитов дождевых червей

«Копролиты содержат больше глинистых и илистых частиц, больше органического материала и меньше песка, чем окружающая почва, поскольку дождевые черви избирательно поглощают более мелкие частицы и органические остатки. Размер минеральных частиц, обнаруживаемых в пищеварительном тракте дождевых червей, меньше, чем в почве и составляет 100—500 мкм. Считается, что черви не способны измельчать минеральные частицы (кроме сильно выветренных), но они перетирают растительные остатки и частицы, содержащие органоминеральные комплексы.» (Бызов, 2005).

Как показано в работе (Marhana, Scheub, 2005) дождевые черви (*L.terrestris* L) накапливают и используют крупные песчинки для измельчения растительных остатков. «Добавление песка стимулировало минерализацию углерода, как в органическом веществе почвы, так и заключенном в копролитах дождевых червей». В эксперименте к почве с пашни и из леса добавляли песок в соотношение 25% и 50% к почве и смешивали с почвой. Песок состоял из частиц размером 0,5, 0,5–1 и 1–2 мм в пропорции: 40%, 40% и 20%. Поле добавляли дождевых червей. Оценку давали по количеству образовавшихся копролитов, содержанию азота и углерода в копролитах и почве.

В дальнейшем для компостных дождевых червей (*Eudrilus eugeniae* (Kinberg)) в аналогичном эксперименте было установлено, что песок не является обязательным компонентом для активной жизнедеятельности дождевых червей (Karthikeyan et al., 2014).

В работе Шульман и Тиунов (1999) проводят анализ ситовым методом в трех диапазонах (2-3 мм, 1-2 мм и 0,5-1 мм) и рассматривают субстраты (смесь песка с подстилкой в разных соотношениях). Они отмечают в своей работе, что скорость потребления подстилки дождевым червем *Lumbricus terrestris* снижалась, когда не было песка.

Рассматривая гранулометрический состав как устойчивые к разрушению частицы можно добавить, что размер органических частиц будут варьировать в зависимости от доли песка. Чем больше песчаной фракции, тем меньшие размеры органических частиц. Для разных экологических групп характерны разного размера органические частицы. В среднем, размер составляет для *Lumbricus terrestris* (0.044 мм^2), *Octolasion tyrtaeum* (0.021 мм^2), *Lumbricus rubellus* (0.098 мм^2), *Aporrectodea caliginosa* (0.019 мм^2) (Тиунов, 2007).

Косвенным указанием на избирательное накопление песка дождевыми червями является работа (Georgiadis et al., 2019), где отмечается увеличение содержания кремния в копролитах.

В работе (Прусак и др., 2008) для копролитов (*Lumbricus rubellus, Aporrectodea rosea*) отмечается увеличение крупных частиц относительно контрольной почвы (метод лазерной дифракции). Результаты ГС получены в эксперименте с ОВ, а увеличение связывается с появлением органических частиц крупных размеров.

Существуют и обратные примеры. Например, в работе (Asawalam, Johnson, 2007) отмечается, что почвенные животные, в том числе и дождевые черви перераспределяют гранулометрический состав почвы, но для дождевых червей (*Hyperiodrilus africanus*) указывается увеличение доли глины, за счет снижения доли ила и песка. Анализ ГС проводился ареометрическим методом (Bouyoucos, 1951).

1.7 Микроагрегатный состав копролитов дождевых червей

Существует мнение, что копролиты червей могут составлять значительную часть почвенных агрегатов, поскольку дождевые черви пропускают через кишечный тракт значительную её часть. Например, в почвах тропиков черви за год способны пропустить через пищеварительный тракт до 25 % от массы всего горизонта Ah (Lee, 1985), потребление богатой органикой почвы достигает 200-400 мг сухого веса на г живого веса червей за сутки (Barley, Jennings, 1959; Barley, 1961), а скорость прохождения через

кишечник червя достигает от суток до нескольких часов (Satchell, 1967a, b; Стриганова, 1980).

В настоящее время активно изучаются пути формирования почвенных агрегатов, преобразование и поступление органического вещества в агрегаты. Некоторые ученые (Guhra et al., 2021) отмечают, что при рассмотрении этих вопросов необходимо уделить пристальное внимание почвенной биоте и дождевым червям в частности. По мнению авторов, они вносят определяющий вклад в образование и формирование почвенного органического вещества, а поддержание биоразнообразия является главной задачей для устойчивого лесного и сельского хозяйства. Есть работы, которые указывают на то, что активность дождевых червей является ключевым фактором в создании почвенных агрегатов (Józefowska et al., 2021). Авторами оценена стабильность агрегатов, получившихся в мезокосмах для смесей разного гранулометрического состава с дождевыми червями (*Dendrodrilus rubidus*, *Aporrectodea caliginosa* и *A. rosea*). Это исследование подтвердило, что активность дождевых червей была фактором, способствующим образованию агрегатов. Также отмечалось, что важным компонентом в исследовании оказалось внесение органического вещества и влияние абиотических факторов. Так как одни дождевые черви без добавления органических добавок не образуют постоянных агрегатов. В работе (Knowles et al., 2016) отмечается увеличение макроагрегатов (>2 мм) на 67% по сравнению с контролем.

Существует ряд работ, в которых утверждается, что черноземные почвы преимущественно состоят из агрегатов копролитного происхождения. Например, в книге «Почвы как зеркало ландшафта» указывается, что гумусовый горизонт для черноземных почв под байрачными лесами состоит из копролитов. «Черви затаскивают в почву растительные остатки. Черви делают глубокие ходы вглубь почвы, по которым проникает вода и идут корни растений. Черви оструктуривают почву, создают мелкозернистую, обогащенную гумусом массу, устойчивую к разрушающему действию воды. Обнаружено, что у некоторых почв как, например, под байрачными лесами

(леса, расположенные в балках), верхний слой чернозема целиком состоит из копролитов — комочков почвы, прошедших через пищевой тракт дождевого червя. Копролитовая структура гумусового горизонта этой почвы отличает ее от соответствующего горизонта обычного чернозема» (Карпачевский, 1983). В другой работе (Манаенков и др., 1997) отмечено, что для чернозема обыкновенного тяжелосуглинистого в верхних гумусовых горизонтах количество копрогенных агрегатов (комковатых, зернистых) составляется 50-80%.

1.8 Реологические свойства копролитов дождевых червей

Предпосылок для изменения реологических характеристик копролитов относительно почвы достаточно много. С одной стороны, это изменения состава копролитов (увеличение органического вещества, изменение соотношения фракций минеральных частиц), с другой стороны активизация микроорганизмов, появление в копролитах слизистых полисахаридных выделений, образованных в процессе микробного разложения (Parle, 1963; Lee, 1985; Marinissen, Dexter, 1990). Выдвигались предположения о цементировании гуматом кальция (из кальциевых желез червей), а также предположение о переплетении копролитов грибными гифами (Lee, Pankhurst, 1992). «Взаимодействия дождевых червей и грибов, активизация роста мицелия в свежих копролитах, обусловливает на 20 – 25 % в комплексе других факторов их повышенную водопрочность в сравнении с почвенными агрегатами» (Кураков, Харин, 2012). Структурную стабильность копролитов обусловливают и богатые углеводами растительные остатки, потребляемые червями (Guggenberger et al., 1996). Аналогичных взглядов придерживался Б.А. Бызов «В процессе микробной трансформации растительных углеводов в пищеварительном тракте червей образуется муцигель и другие метаболиты, которые проникают в поверхностные слои минеральных частиц и, тем самым, стабилизируют структуру копролитов» (Бызов, 2005).

Большая устойчивость копролитов (*Aporrectodea caliginosa*) отмечается в работе (Piekarz, Lipiec, 2001), где основной причиной указывается активизация бактерий и грибов. В работе (Barre et al., 2009) было показано, что дождевые черви приводят изначально рыхлую и уплотненную почву до «промежуточного механического состояния», более благоприятного для структурной стабильности и роста корней. Проверялась гипотеза о том, что дождевые черви стабилизируют рыхлый грунт и разрыхляют уплотненный грунт до аналогичного механического состояния.

Копролиты, собранные из изначально рыхлой почвы (980 кг $м^{-3}$), имели в 10 раз большую вязкость и в 5 раз больший предел текучести, чем контрольная почва без червей. В работе рассматривали виды (*Lumbricus terrestris*, *Dendrobaena sp.* и *Aporrectodea longa*). В копролитах не было обнаружено различий между видами. В уплотненных грунтах (1300 кг $м^{-3}$) копролиты дождевых червей (*A.longa)* были получены с механическими свойствами, аналогичными рыхлому грунту, при этом вязкость и предел текучести снизились на 45% по сравнению с контролем без червей. В работе (Edeh et al., 2015) отмечается увеличение средней прочности на сдвиг для копролитов (85,09 кПа) по сравнению с контрольной почвой (69,80 кПа). В целом, в работе отмечается улучшение реологических свойств копролитов по отношению к контрольной почве.

Ряд исследований направлен на изучение эпидермальной слизи дождевых червей. Например, в работе (Zhang et al., 2016) изучали аминокислотный состав и реологическое поведение образцов эпидермальной слизи трех экологических видов дождевых червей (*Eisenia fetida*, *Aporrectodea trapezoides* и *Amynthas pingi).* Было обнаружено, что образцы слизи трех видов дождевых червей содержат 16 аминокислот. Аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота и валин присутствовали в относительно высоких концентрациях во всех образцах. Реологическое поведение эпидермальной слизи дождевых червей исследовали с помощью тестов на непрерывный сдвиг, тиксотропию и колебания. Кажущаяся вязкость сначала увеличивалась, а затем

уменьшалась с увеличением скорости сдвига слизи. Тиксотропное поведение было продемонстрировано тем, что кажущаяся вязкость эпидермальной слизи постепенно восстанавливалась с уменьшением скорости сдвига. Колебательные тесты показали, что вязкоупругое поведение эпидермальной слизи может изменяться с изменением частоты колебаний. Пятислойная контактная модель интерфейса показала, что кажущаяся вязкость слизи изменяется с движением дождевого червя, тем самым уменьшая адгезию почвы и сопротивление трению с поверхностью тела дождевого червя.

1.9 Удельная поверхность копролитов дождевых червей

Бызов Б.А. (2005) в своей книге «Зоомикробные взаимодействия в почве» отмечает, что «дождевые черви перетирают органические остатки с помощью заглатываемых минеральных частиц в мускульном желудке. При измельчении в сотни и тысячи раз увеличивается удельная поверхность субстрата». Аналогичные утверждения, что в ходе измельчения растительного материала в сотни раз увеличивается удельная поверхность субстрата, при этом возрастает его доступность для микроорганизмов, можно встретить в других работах (Тиунов, Кузнецова, 2000; Тиунов, 2003, 2007; Гераськина, 2018). Присутствие дождевых червей способствует сокращению удельной поверхности в 6 раз для листовых вермикомпостов, в 1.2 раза для навозного вермикомпоста и 1.8 для торфа, заселенного червями (Якушев, Бызов, 2008). При этом важным моментом является учет того, что во всех перечисленных работах рассматривается измельчение и увеличение площади поверхности субстрата (например, листьев), но не удельная поверхность самих копролитов дождевых червей относительно удельной поверхности почвенных агрегатов. В работе (Sinha et al., 2008) отмечается увеличение удельной поверхности за счет преобразования дождевыми червями (*Eisenia fetida*) частиц глины и песка. В работе (Прусак и др., 2008) для копролитов (*Lumbricus rubellus, Aporrectodea*

rosea) отмечается увеличение эффективной удельной поверхности (методом газовой хроматографии оценивали сорбцию паров воды).

Существуют работы указывающие и обратные примеры, когда присутствие дождевых червей вызывает уменьшение площади поверхности. Так в работе (Lyttle et al., 2015) для леса в северной Миннесоте показано, что удельная площадь поверхности (рассчитана для фракции <2 мм с удалением органики в муфельной печи) в верхнем горизонте уменьшается в присутствии дождевых червей.

1.10 Краевой угол смачивания поверхности твердой фазы

Проводились работы по изучению свойств поверхности «кожи» дождевых червей. Например, в работе Фенгге Гао и других (Gao et al., 2010). Результаты исследования, полученные при применении динамического угла смачиваемости с использованием воды, глицерина, кулинарного масла и диметилсиликона показывает, что поверхностные свойства дождевых червей являются свойством, изменяющимся во времени. Критическая поверхностная энергия, по данным исследования, составляет всего 11×10^{-3} Дж·м$^{-2}$. Авторы отмечают, что это гидрофобное поведение в начальный момент контакта постепенно меняется на гидрофильное.

«Поверхность органических частиц (копролитов) покрыта белковоподобным гидрофобным веществом, это препятствует растворению их в воде. Макро- и микроэлементы связаны в малорастворимые органо-минеральные комплексы» (Столбовая, Старикова, 2014). Присутствие дождевых червей увеличивает гидрофобность субстрата подвергнутого обработке (Юшкова и др., 2006). В зарубежных работах отмечается, что копролиты дождевых червей имеют повышенную гидрофобность и водоустойчивость (Le Mer et al., 2021; Jouquet et al., 2008). Для копролитов *Amynthas khami* значения гидрофобности выше, чем в агрегатах верхнего слоя почвы (Acrisol (WRB)) (Bottinelli et al., 2021).

В других работах указывается, что дождевые черви увеличивают гидрофильность (Осадчий, 2017). Предполагаю, что это происходит за счет обогащения почвенной массы гидрофильным и легкоминерализуемым веществом при образовании копролитов (Прусак и др., 2008). Отдельно отмечается, что копролиты *L.rubellus* значительно обогащены гидрофильной органикой (Симохина-Прусак, 2009).

Разные значения гидрофобности и водопрочности могут быть связаны как с разными видами дождевых червей, так и с изменением свойств с течением времени. Уменьшение водопрочности возможно для свежих копролитов (Shipitalo, Protz, 1988; Marinissen, Dexter, 1990). Вероятно, это может быть связано с интенсивным повторным формированием формы, которое происходит во время прохождения почвы через дождевых червей, разрушающих уже существующую микроструктуру почвы. Для копролитов дождевых червей *Martiodrilus carimaguensis* показано, что при старении копролитов уменьшается водоустойчивость за счет образования трещин и заселения почвенной макрофауной (Decaëns et al., 2000). С другой стороны, для старых копролитов отмечается повышение водопрочности за счет затвердевания с возрастом (Hindell et al., 1997), развития грибов или производства полисахаридов микробного происхождения (Shipitalo, Protz, 1989; Marinissen, Dexter, 1990).

1.11 Численность бактерий в копролитах дождевых червей

Копролиты дождевых червей представляют собой для микроорганизмов «горячие точки» (Medina-Sauza et al. 2019). Для дождевых червей *Lumbricus terrestris, Lumbricus rubellus* и *Aporrectodea trapezoides* было установлено, что их присутствие приводит к увеличению численности бактерий (Daane et al., 1996). Аналогично в работе (Groffman et al. 2015) показано увеличение микробной биомассы и пула углерода для дождевых червей *Lumbricus rubellus*. Для содержимого кишечника дождевых червей *Aporrectodea caliginosa,* содержащихся в песке в течение суток, общая численность бактерий составила

2000-5000 КОЕ/особь, а грибов - 100- 200 КОЕ/особь (Битюцкий и др, 2002). Для копролитов дождевых червей *Amyntas khami* отмечается увеличение численности бактерий и, в меньшей степени, грибов (Jouquet et al. 2013). Численность бактерий при прохождении через кишечник обычно возрастает на порядок (Бызов, 2003). При прохождении через кишечник дождевого червя *E. fetida* (по данным люминесцентной микроскопии) происходит увеличение численности бактерий в 2-3 раза (итоговая численность $7{,}1\pm0{,}6\times10^{9}$ КОЕ/г), а по данным посева - в 10 раз (итоговая численность $38{,}2\pm3{,}6\times10^{8}$ КОЕ/г). Аналогичные результаты приводятся для дождевых червей *Aporrectodea caliginosa.* Прохождение через кишечник приводит к увеличению численности *Bacillus sphaericus* в 2-5 раз (10^{9} КОЕ/г) (Бызов, 2005). В эксперименте с динамикой численности *Pseudomonas corrugata* было показано, что при кормлении дождевых червей почвой с опадом, содержащей $8{,}18\pm0{,}07\times10^{10}$ КОЕ/г, численность возросла в копролитах (*Aporrectodea caliginosa, Aporrectodea longa, Lumbricus rubellus, Lumbricus terrestris)* до $7{,}46\ \pm0{,}53\times10^{12}$ КОЕ/г (Schmidt et al., 1997).

Изменение численности бактерий не всегда связанно только с деятельностью дождевых червей, но также с особенностями проведения эксперимента, оценки КОЕ. Так, для дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* было показано уменьшение численности бактерий по сравнению с почвой, что объясняется неблагоприятными для выбранных бактерий условиями (Heijnen, Marinissen, 1995).

1.12 Дегидрогеназная активность копролитов дождевых червей

Ряд работ посвящен изучению влияния присутствия дождевых червей на дегидрогеназную активность субстрата. В работе (Tiwari et al., 1989) отмечается, что копролиты дождевых червей увеличивают активность микроорганизмов, в том числе и дегидрогеназную активность. Присутствуют колебания во времени, а пик активности приходится на весну и лето. В работе (Aira et al., 2002) присутствие дождевых червей *Eisenia fetida* в субстрате

(свиной навоз) приводит к снижению дегидрогеназной активности. В другой работе (Tao et al., 2009) для дождевых червей *M. guillelmi* и субстрата (почва) отмечается, что дегидрогеназная активность не изменилась. В статье (Suthar, 2008) отмечается, что при содержании червей подстилочных (*Eisenia fetida* (Savigny)) и норников (*Lampito mauritii* Kinberg) вместе достигается эффект увеличения дегидрогеназной активности.

В статье (Flegel, Schrader, 2000) указывается, что на активность дегидрогеназы копролитов дождевых червей (*D. Octaedra*) влияет корм (листья одуванчика (Taraxacum *officinale)*, люпина (Lupinus *polyphyllus*), ржи (*Secale cereale*), ольхи (Alnus *glutinosa*) и полугодовалых опавших листьев из подстилки бука (Fagus *sylvatica*) и лиственницы (*Larix decidua*)). В основном, дегидрогеназная активность копролитов выше, чем контроль (почва). Снижение наблюдается для лиственницы и ольхи. Аналогичная работа (Kızılkaya, 2008) для дождевого червя *Lumbricus terrestris* показала, что для всех субстратов (пшеничная солома, отходы производства чая, отходы табачного производства, коровий навоз и шелуха фундука) наблюдается увеличение дегидрогеназной активности в копролитах по сравнению с окружающей почвой.

Для бактерий кишечника (201 штамм) и копролитов (170 штаммов) дождевых червей *Lumbricus terrestris* и *Octolasion cyaneum* установлено, что дегидрогеназная активность повышается в два раза по сравнению с фоновой активностью для почвенных бактерий (267 штаммов). Дегидрогеназная активность кишечника 3.8±0.3 (оптическая плотность, 492 нм) и копролитов 4.0±0.7 (оптическая плотность, 492 нм) против фоновой активности для почвенных бактерий 2.5±0.5 (оптическая плотность, 492 нм) (Бызов и др., 2015). В более ранней работе (Олейник, Бызов, 2008) указывается, что воздействие может быть селективным для разных культур бактерий. На 15 из 19 культур бактерий (*Achromobacter xylosoxidans* 2, *Aeromonas sp.* 616, *Agrobacterium tumefaciens* 11, *Alcaligenes faecalis subsp. parafaecalis* E588, *Alcaligenes sp.* 99, *Brevundimonas diminuta* E699, *Chryseobacterium sp.* 495,

Microbacterium paraoxydans 597-3, *Paenibacillus sp.* 598, *Pantoea sp.* E680, *Schineria larvae* 5, *Serratia marcescens* E658, *Pseudomonas sp.* 610-1, *Sporosarcina sp.* 502-2, *Stenotrophomonas maltophilia* 12) копролиты дождевого червя *Aporrectodea caliginosa* оказали подавляющее действие на дегидрогеназную активность. Снижение достигало 30-50%. Для 4 культур бактерий (*Bacillus subtilis/B. mojavensis* 523-1, *Delftia acidovorans* 14, *Micrococcus luteus* 522-2, *Sphingobacterium sp.* 590-2) эффекта не наблюдалось.

1.13 Эстеразная активность копролитов дождевых червей

Присутствие дождевых червей *M. guillelmi* усиливает гидролазную активность (Tao et al., 2009). Наблюдалось увеличение активности протеазы, уреазы, инвертазы и щелочной фосфатазы в присутствии дождевых червей. В работе (Sanchez-Hernandez et al., 2014) подтверждается увеличение в почве карбоксилэстеразы в присутствии дождевых червей *Lumbricus terrestris*.

Есть примеры уменьшения гидролазной активности, например, в работе (Якушев и др., 2009) в присутствии дождевых червей (*Eisenia foetida andrei*, *Aporrectodea caliginosa* и *Aporrectodea rosea*) отмечалось уменьшение гидролазной активности в компостах (компостируемый торф и навозный компост). В работе (Якушев, Бызов, 2009) указано, что в копролитах дождевых червей *Eisenia foetida andrei* активность гидролазы выше, чем в контрольном субстрате. В работах использовали реакцию гидролиза ФДА, поэтому можно говорить более узко об эстеразной активности.

В работе (Beloqui et al., 2010) было показано большое количество гликозилгидролаз, содержащихся в копролитах дождевых червей. Восемь гликозилгидролаз из копролитов *Aporrectodea caliginosa* были эндо-β-глюканазы, β-глюкозидазы, β-целлобиогидролазы, β-галактозидазы и β-ксилозидазы. Из *Lumbricus terrestris* два новых семейства β-галактозидаз / α-арабинопиранозидаз.

1.14 Комплексный структурно-функциональный метод

Комплексный структурно-функциональный метод был предложен А.В. Якушевым. В 2009 году вышла статья «Действие дождевых червей на физиологическое состояние микробного сообщества при вермикомпостировании» (Якушев и др., 2009), описывающая кинетические параметры роста (максимальную удельную скорость роста, коэффициент физиологического состояния микроорганизмов и некоторые другие). Кривые роста получали на основании динамики CO_2 из почвы, обогащенной глюкозой. Спустя несколько лет вышла статья с описанием комплексного структурно-функционального метода (Якушев. 2015). В ней кривые роста получены на основании изменения оптической плотности полимеров с ассоциациями микроорганизмов в культуральной планшете. Кривые роста предлагается описывать с применением нескольких уравнений, используя которые можно получить следующие параметры (максимальную удельную скорость роста, значение переменной физиологического состояния растущей культуры, метаболическая готовность к росту, экономический коэффициент роста микроорганизмов на субстрате, максимальная концетрация культуры, максимальная удельная скорость отмирания и несколько других). В статье (Якушев. 2015) отмечается, что изменения параметров роста (экономический коэффициент роста микроорганизмов на субстрате, максимальная удельная скорость роста и метаболическая готовность к росту) нельзя оценивать по одному субстрату. Это объясняется тем, что отсутствуют закономерности для одной конкретной среды, а параметры могут, как увеличиваться, так и уменьшаться для разных питательных сред. При суммировании всех ранговых распределений экономического коэффициента роста микроорганизмов на субстрате автор указывает на снижение эффективности ассимиляции субстрата в транзитном бактериальном сообществе.

В статье «Действие дождевых червей на физиологическое состояние микробного сообщества при вермикомпостировании» (Якушев и др., 2019) применяется этот метод для оценки торфяных горизонтов. Для оценки

физиологического разнообразия и трофической специализации гидролитического бактериального блока применяется комплексный структурно-функциональный метод, оценивается параметр – микробный экономический коэффициент. Для его оценки используют метод главных компонент, а также выделяют несколько вариантов параметра: среднее арифметическое значение на всех средах с полимерами и разность средних значений на средах с труднодоступными (хитин, целлюлоза, агароза, кератин) и легкодоступными (декстран, инулин, пектин, ксилан, крахмал, твин 20, казеин) полимерами. Авторы указывают, что среднее арифметическое значение микробного экономического коэффициента – это показатель физиологического разнообразия, а разность – показатель физиологической специализации гетеротрофных бактерий природного сообщества.

Глава 2. Материалы и методы исследования

Объекты исследования: копролиты дождевых червей двух экофизиологических групп. Эндогейный (*Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826)) и эпигейный (*Lumbricus rubellus* (Hoffmeister, 1843)) (согласно классификации M.B. Bouche (1972)). Почва - пахотный горизонт чернозема миграционно-мицелярного, Курский НИИ АПП, Курская область (51°37'17.1" N; 36°15'42.0" E) и пахотный горизонт длительного чистого пара (с 1947 г.) чернозема миграционно-мицелярного, ЦЧЗ им. В.В. Алехина, Курская область (51°34'12.3" N; 36°05'22.6" E). В качестве корма для дождевых червей выбраны опад клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и пожнивные остатками кукурузы (*Zea mays* L.).

2.1 Дизайн экспериментов

Проведено 3 эксперимента (рис.1). В первом эксперименте использовались по одному мезоокосму на каждый вариант (исходная почва, почва с опадом, почва с опадом и дождевыми червями двух видов). Рассматривалось содержание видов дождевых червей вместе и по отдельности. После окончания первого эксперимента поставлен второй с использованием нескольких мезокосмов для повторностей. Во втором эксперименте рассматривается содержание дождевых червей раздельно, т.к. при содержании вместе эффекты получаются не аддитивные и трудные для интерпретации. Во втором эксперименте для уменьшения влияния агрегатов разных размеров на итоговые данные почва была предварительно просеяна для добавления в мезоокосмы одинаковых соотношений почвенных агрегатов. Первый и второй эксперименты используют одинаковые виды дождевых червей, опад и исходную почву. Дождевые черви и опад клена отобраны на территории МГУ. Третий эксперимент проведен для уточнения изменения в изотопном составе почвы под воздействием прохождения через кишечник эндогейных дождевых червей. Для этого использовался один вид дождевых червей *Aporrectodea*

caliginosa, почву, на которой не росли растения С-4 фотосинтеза и в качестве корма использовали пожнивные остатки кукурузы.

Рисунок 1. Дизайн экспериментов. Блоки являются мезокосмами, значком X обозначена повторность мезокосмов в эксперименте.

Подробное описание экспериментов представлено ниже. Отбирались суточные копролиты дождевых червей с поверхности почвы. Для микробиологических анализов копролиты использовались сразу, либо после заморозки. Для остальных исследований использовали воздушно-сухие копролиты. В отличие от аналогичных исследований, например (Angst et al., 2017; Schomburg et al., 2018; Angst et al., 2019), в данной работе опад добавлялся на поверхность почвы без измельчения и перемешивания с почвой, аналогично работе (Hedenec et al., 2020). Это сделано для воссоздания условий схожих с природными, где листья остаются на поверхности, а не размещены равномерно по всему профилю почвы. В итоге дождевые черви вынуждены самостоятельно перемешивать опад. Это также позволяет более точно судить о

роли дождевых червей в перемещении органических остатков с поверхности почвы.

Эксперимент 1:

Для модельного опыта был выбран миграционно-мицелярный чернозем Курской области (51°37'17.1" N; 36°15'42.0" E). Данный тип почвы (Protocalcic Chernozem (Loamic, Pachic) (WRB) обладает высокой агрономической ценностью. Плотность твердой фазы почвы в слое 0–20 см - 2.55 г/см^3. Плотность почвы в слое 0–20 см - 1.18 г/см^3 (Shein et al., 2011), pH_{H2O} – (6.32 ± 0.11) (Холодов et al., 2020). Данный тип почвы является одним из наиболее распространенных объектов исследования за счет высокой агрономической ценности. Образцы почвы после отбора хранились в воздушно-сухом состоянии. Перед закладкой опыта влажность почвы доводилась до полевой влагоемкости, почва перемешивалась и равномерно распределялась по мезокосмам, представляющим собой цилиндрические сосуды объемом 600 мл.

Для исследования выбраны (морфо-экологическая классификация дана по Bouche M.B.(1972) и классификация морфо-экологических групп по Перель Т.С. (1975)) эндогейный (endogeic), почвенно-подстилочный вид *Aporrectodea caliginosa* и эпигейный (epigeic), подстилочный вид *Lumbricus rubellus*. Отбор дождевых червей проводили согласно ISO 23611-1, видовую принадлежность червей устанавливали по определителю Всеволодовой – Перель (1997).

Лабораторный эксперимент состоит из двух этапов. На первом этапе дождевых червей двух видов *A.caliginosa* и *L.rubellus* содержали совместно в сосудах с добавлением опада в виде свежих листьев клена остролистного (*Acer platanoides* L.). В качестве контроля в модельном опыте использовали сосуды с исходной почвой, а также с почвой и опадом. На первом этапе были проанализированы образцы: почва; почва с опадом; почва с *A.caliginosa* и *L.rubellus*; копролиты червей *A.caliginosa* и *L.rubellus*. Вес почвы в сосудах – 496 г. Общий вес червей – 12 г в равных долях. Вес опада – 10 г.

Второй этап аналогичен первому, но виды червей содержались раздельно. На втором этапе проанализированы образцы: почва; почва с опадом; почва с *A. caliginosa*; почва с *L.rubellus*; копролиты *A. caliginosa*; копролиты *L.rubellus*. Вес почвы в сосудах с *A.caliginosa* – 470 г, с *L.rubellus* – 370 г. Вес червей *A.caliginosa* – 16 г, *L.rubellus* – 18 г. Вес опада – 10 г. Экспериментальные сосуды содержали при температуре 17– 22 °С и весовой влажности почвы 35–40 % на протяжении шести месяцев.

Эксперимент 2:

Использовали модельный эксперимент с мезосмами с дождевыми червями. Образцы почвы к и в эксперименте 1. Почва хранилась в воздушно-сухом виде в течение двух лет для обеспечения минимального остаточного воздействия почвенной биоты на дальнейший эксперимент. Образцы воздушно-сухой почвы (для получения одинакового соотношения почвенных агрегатов в повторностях эксперимента) просеяны на виброгрохоте (Anallysette 3 Spartan (Fritsch, Германия)). При работе A = 937.5 Дж, режим просеивания – амплитуда вибрации l_a = 2.5 мм и время просеивания t = 2 мин, сита 10, 7.15, 5, 3.15, 2, 1, 0.5, 0.25 мм (соответствие стандарту ISO 3310-1 (DSTU)) (Фомин et al., 2019). Перед закладкой опыта влажность почвы доводилась до полевой влагоемкости (25%), почва перемешивалась и равномерно распределялась по мезокосмам, представляющим собой цилиндрические сосуды объемом 500 мл. Для объектов выделено по 3 мезокосма.

Для исследования выбраны дождевые черви *A.caliginosa* и *L.rubellus*. Отбор дождевых червей проводили согласно ISO 23611-1, видовую принадлежность червей устанавливали по определителю (Всеволодова-Перель, 1997). Черви в равных долях были представлены ювенильными особями и половозрелыми. Дождевых червей двух видов *A.caliginosa* и *L.rubellus* содержали раздельно в сосудах с добавлением опада (перезимовавших воздушно-сухих цельных листьев) (*Acer platanoides* L.). Опад добавлялся в виде воздушно-сухих цельных листьев на поверхность почвы без

перемешивания. Кленовый опад был выбран как хорошо потребляемый дождевыми червями (Bornebusch, 1953; Satchell and Lowe, 1967; Стриганова, 1980). В качестве контроля использовали сосуды с исходной почвой, а также почвы с опадом. Образцы контрольной почвы отбирались с глубины 0-2 см, копролиты собирались суточные копролиты с поверхности почвы. Данные за все месяцы проанализированы в одном массиве.

Проанализированы образцы: почва; почва с опадом; копролиты *A.caliginosa*; копролиты *L.rubellus;* почва с *L.rubellus*; почва с *A. caliginosa*. Вес воздушно-сухой почвы в сосудах – 350г. Вес червей в мезокосме – 10 г. Вес опада – 5г. Экспериментальные сосуды содержали при температуре 17– 22°С и весовой влажности почвы 35–40 % на протяжении четырех месяцев.

Эксперимент 3:

Почва – пахотный горизонт бессменного черного пара (с 30 апреля 1947 (Афанасьева,1966, с.189) чернозема миграционно-мицелярного, ЦЧЗ им. В.В. Алехина, Курская область (51°34'12.3" N; 36°05'22.6" E). Данная почва выбрана для сравнения стабильных изотопов, т.к. на ней никогда не выращивались растения с С4-фотосинтезом. Это позволяет оценить изменения изотопного состава. Почва хранилась в воздушно-сухом виде в течение двух лет для обеспечения минимального остаточного воздействия почвенной биоты на дальнейший эксперимент.

Проведен эксперимент с дождевым червем *Aporrectodea caliginosa* . Отбор дождевых червей проводили согласно ISO 23611-1, видовую принадлежность червей устанавливали по определителю (Всеволодова-Перель, 1997). Черви в равных долях были представлены ювенильными особями и половозрелыми. Дождевых червей *A.caliginosa* содержали в сосудах с добавлением опада. Для эксперимента выбрано растение с С4-фотосинтезом кукурузу (*Zea mays* L.), активно используемую в сельском хозяйстве. Отбирались воздушно-сухие листья и стебли на базе филиала ФГБУ

"Россельхозцентр" по Ставропольскому краю. Опад добавлялся в виде воздушно-сухих остатков листьев на поверхность почвы без перемешивания.

Проанализированы образцы: почва; почва с опадом; копролиты *A. caliginosa*; почва с *A. caliginosa*. Вес воздушно-сухой почвы в сосудах – 350г. Вес червей в мезокосме – 10 г. Вес пожнивных остатков – 5г. Экспериментальные сосуды содержали при температуре 17– 22 °С и весовой влажности почвы 35–40 % на протяжении пяти месяцев.

2.2 Методы

2.2.1 Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота

Определение содержания углерода, азота проводилось с использованием метода сухого сжигания с применением элементного анализатора (CHNS) Vario Isotope Cube (Elementar, Германия) Центра коллективного пользования «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии». Измерение изотопного состава углерода и азота проводилось с использованием метода масс-спектрометрии стабильных изотопов (IRMS) precisION IRMS (производства Isoprime, Великобритания). Для 38 почвенных образцов выполнена пробоподготовка и определение содержания углерода (%), азота (%) и соотношения C/N, изотопные метки углерода ($\delta^{13}C$, ‰) и азота ($\delta^{15}N$, ‰). Для анализа образцы отвешивались на высокоточных ультрамикровесах XPR2U (Меттлер Толедо, Швейцария) и упаковывались в индивидуальную капсулу из оловянной фольги, которая помещалась в карусель CHNS анализатора для сжигания. Для проведения измерений в каждой партии образцов проводился анализ стандартов. Для определения углерода и азота сухим сжиганием с применением элементного анализатора (CHNS) использовали стандарт Acetanilide B2114 в трех повторностях. При анализе изотопного состава образцы были проанализированы относительно референтных газов высокой чистоты (N_2 и CO_2), откалиброванных по стандартным материалам МАГАТЭ (IAEA-CH3-целлюлоза, IAEA-600-кофеин). Стандарты Casein B2155, Urea B2174 и Sorghum Flour B2159 использовали в качестве рабочих лабораторных стандартов, построения

калибровочной кривой. Образцы рабочих стандартов анализировали перед партией образцов и после каждой 10-й пробы. Аналитическая погрешность определения изотопного состава углерода и азота в пределах ±0.2‰.

Для образцов почвы является обязательной процедура удаления из образцов карбонатов (Wang G. et al., 2015). В данном случае для почвы проводили процедуру очистки образцов от карбонатов парами HCl (Harris at al., 2001). Образцы опада (клён, кукуруза) были гомогенизированы до состояния тонкой пыли без химической обработки.

$\delta^{13}C$, ‰ – отклонение изотопного состава углерода исследуемого образца от изотопного состава углерода вещества, принятого в качестве стандарта в промилле, рассчитанное по формуле 1:

$$\delta C\ \text{образец}\ (‰) = [(C\ \text{образец} - C\ \text{эталон}) / C\ \text{эталон}] * 1000 \qquad (1)$$

$\delta^{15}N$, ‰ – отклонение изотопного состава азота исследуемого образца от изотопного состава азота вещества, принятого в качестве стандарта в промилле, рассчитанное по формуле 2:

$$\delta N\ \text{образец}\ (‰) = [(N\ \text{образец} - N\ \text{эталон}) / N\ \text{эталон}] * 1000 \qquad (2)$$

Для оценки изменения содержания углерода и азота на основании анализа стабильных изотопов использовали простой моделью смешивания. Расчет проводился по формуле 3 и 4:

$$C = (\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2) / (\delta^{13}C_3 - \delta^{13}C_2), \qquad (3)$$

C – доля углерода из растительных остатков в образцах,

$\delta^{13}C_1$ – изотопная подпись (копролитов, почвы, где жили черви или почвы с опадом клена/пожнивных остатков кукурузы),

$\delta^{13}C_2$ – изотопная подпись (исходная почва),

$\delta^{13}C_3$ – изотопная подпись опада клена/пожнивных остатков кукурузы

При использовании формулы 3 сделаны следующие допущения: сходная эффективность ассимиляции, отсутствие фракционирования изотопов, изменение изотопных подписей копролитов за сутки нахождения на

поверхности почвы было не существенным, источниками поступления углерода для копролитов являются исходная почва и растительные остатки.

2.2.2 Содержание органического углерода

Общее содержание углерода после сухого сжигания в токе кислорода при 1000°C измеряли на анализаторе углерода АН-7529 (Гомельский завод измерительных приборов, Республика Беларусь) методом автоматического кулонометрического титрования. В пахотном горизонте чернозема карбонаты отсутствуют (они глубже 40 см), а весь анализируемый углерод – органический углерод (Юдина, Милановский, 2017).

2.2.3 Окисление органического вещества почвы

Мокрое окисление органического вещества H_2O_2 проводили по методике, описанной в работе (Eusterhues et al., 2005). В этой процедуре использовали количество образца, обеспечивающее уровень затемнения лазерного луча ≥ 10% при определении ГС. 1-2 мл 30% H_2O_2 добавляли к 100-110 мг образца в пробирке «Falcon» (50 мл) при комнатной температуре. На следующий день образцы помещали в термостат (40°C); Ежедневно добавляли H_2O_2 до прекращения вскипания (10-15 дней). После окисления образцы высушивали (40°C) и использовали для гранулометрического анализа.

2.2.4 Гранулометрический состав

Одна из ключевых характеристик почвы – гранулометрический состав (ГС). Вопрос, а что же именно является объектом измерения встает достаточно остро, т.к. нет единого мнения по данному вопросу. Одни ученые утверждают, что оценка ГС – это оценка лишь минеральной части почвы и предлагают проводить анализ лишь после удаления органики (этот подход реализован в ISO11277:2009). Другие (Розанов, 1983; Воронин, 1984; Шеин, 2005) полагают, что достаточно провести разрушение агрегатов до уровня элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) и необязательно проводить удаление органического вещества (например, сжиганием в H_2O_2) для получения гранулометрического состава, т.к. при таком воздействие произойдет слишком большая

модификация ЭПЧ. Таким образом, камнем преткновения служит не только метод определения гранулометрического состава, но способ пробоподготовки необходимый для максимально полной диспергации. Важно также отметить, что изначально есть ограничения при определении ГС. Так Марк Пансу в своей книге пишет: «Lastly, particle size analysis accounts for the size but not for the shape of the particles, or their nature» (Pansu, Gautheyrou, 2007). Хотя, формально это не совсем корректно, т.к. при пробоподготовке, автор предлагает проводить ряд мер: удаление органики, цементирующих веществ (Al, Fe, Si) и др. Таким образом, до некоторой степени предсказать «природу» измеряемых частиц возможно. Впрочем, в книге не раз акцентируется внимание, что гранулометрический анализ является лабораторным методом, а основной задачей пробоподготовки является – разрушить образец до ЭПЧ, но при этом не создать искусственных частиц (*neo-particles*).

В рамках поставленных задач в исследование, а также специфики объекта, был выбран метод лазерной дифрактометрии (ЛД). Это связано с тем, что данный метод имеет ряд преимуществ. Малая величина навески, что достаточно важно при работе с такими образцами как копролиты, где нет возможности отобрать большие навески однородные по свойствам. Отсутствие необходимости определять дополнительные характеристики, например, плотность твердой фазы (p_s).

Расчеты реализованы по оптической теории Ми (Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie). «Теория Ми учитывает процессы преломления и поглощения света в сферических частицах, однако требует знания оптических свойств (показателей преломления n_R и поглощения n_I) для исследуемого объекта и показателя преломления для дисперсионной среды. Вводится комплексный показатель преломления n. Средняя атомная поляризуемость α(ω) является комплексным числом, поэтому показатель преломления n аналогично является комплексным и может быть записан в виде вещественной и мнимой частей (формула 4):

$$n = n_R - in_I \quad (4),$$

где n_R и n_I – вещественные функции ω, и являются соответственно показателем преломления и поглощения. Таким образом, в уравнении содержится не только теория показателя преломления вещества, но и теория поглощения им света» (Юдина, 2018). Значение n_R для минеральной составляющей почвы варьирует от 1,48 до 1,70 и выше. В случае, когда не известен минералогический состав, то при применении метода ЛД значение показателя преломления принято брать 1,55. Значение n_I рекомендуется брать 0,01i-0.03i (ISO 13320:2009). Расчеты реализованы для несферических частиц, согласно исследованию (Taubner, и др., 2009). Так как объем частиц рассчитывается через диаметр частиц, причем, пропорционально D^3, завышение размера частиц из-за их несферичности влечет за собой значительное увеличение при расчете занимаемого объема частиц (Campbell, 2003).

В данной работе гранулометрический состав определялся с пробоподготовкой: перетирание воздушно-сухих образцов (почвы и копролитов) резиновым пестиком, диспергация ультразвуком Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasound, США) (с уровнем энергии ультразвуковой диспергации 450 Дж·мл$^{-1}$). Уровень энергии был выбран исходя из литературных данных (Schmidt at al.,1999; Amelung, Zech,1999; Yudina et al., 2018). Анализ проводился на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical). Для обсчета данных использовалась теория Ми (n_R =1,55; n_I = 0,01; и для среды n_R = 1,33). Классификация фракций ГС проведена по USDA/FAO: ил (0–2 мкм), пыль (мелкая 2–20 мкм, крупная 20–50 мкм) и песок (очень мелкий 50–100 мкм, мелкий 100–250 мкм, средний 250–500 мкм; крупный 500–1000 мкм), обеспечивающая детализацию фракций пыли и песка.

2.2.5 Микроагрегатный анализ

Вариант пробоподготовки был выбран исходя из литературных данных (Филиппова и др., 2019) и экспериментального сравнения результатов для данных объектов исследования. В данной работе микроагрегатный состав определялся с пробоподготовкой №3. Анализ проводился на дифрактометре

Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical). Образцы диспергировали с помощью предварительно откалиброванного ультразвукового диспергатора Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasound, США). Для обсчета данных использовалась теория Ми (n_R =1,55; n_I = 0,01; и для среды n_R = 1,33). Классификация фракций микроагрегатов проведена по USDA/FAO: ил (0–2 мкм), пыль (мелкая 2–20 мкм, крупная 20–50 мкм) и песок (очень мелкий 50–100 мкм, мелкий 100–250 мкм, средний 250–500 мкм; крупный 500– 1000 мкм), обеспечивающая детализацию фракций пыли и песка.

Были рассмотрены несколько вариантов подготовки образцов к анализу:

1. Перетирание пальцем с H_2O и просеивание через сито 250 мкм; анализ на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical)
2. Встряхивание на вортексе 25 мин; аликвота 1,5мл (в пробирке эппиндорф); перед анализом просеивание через сито 250 мкм; анализ на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical)
3. Встряхивание на вортексе 55 мин; аликвота 1,5мл (в пробирке эппендорф); перед анализом просеивание через сито 250 мкм; анализ на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical)
4. Встряхивание на вортексе 25 мин; аликвота 1,5мл (в пробирке эппиндорф); без просеивания через сито250 мкм; анализ на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical)
5. 15 измерений на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical) с постоянной циркуляцией (60с между измерениями)
6. 20 измерений на дифрактометре Mastersize 3000E с Hydro EV (Malvern Panalytical) с постоянной циркуляцией (60с между измерениями)

2.2.6 Анализ морфологии гранулометрических фракций

Люминесцентная микроскопия. После мокрого просеивания образцов копролитов *L.rubellus* и *A.caliginosa* на ситах 250, 50 мкм отбирались и высушивались при 25°С фракции >250, 250-50, <50 мкм. Анализировали на

люминесцентном микроскопе «Биомед 6» (фирмы «Биомед», Россия), увеличение x100; x400. Расчетная площадь зрения 0,10178 мм^2.

Электронная микроскопия. В образцах (при 4х кратной повторности) копролитов и опада клена (в 6-ой повторности) проводили оксиление ОВ. Окисление органического вещества проводили с помощью H_2O_2 по методике, описанной в работе (Eusterhues et al., 2005). Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния при 25°С. После образцы были переданы Гольевой А.А. для стандартной пробоподготовки (Гольева, 2001).

Электронно-микроскопическое исследование проводили при помощи растрового электронного микроскопа JEOL-6060A с микро-рентгеноспектральной приставкой JED-2300 (фирмы “JEOL”, Япония) лаборатории экологического почвоведения (фирмы “JEOL”, Япония) с вольфрамовым катодом при ускоряющем напряжении 2–5 кВ. На образцы перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC-1600 (фирмы “JEOL”, Япония). Спектр энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии получали с помощью детектора рентгеновского излучения (JED-2300 (фирмы “JEOL”, Япония)). При облучении пучков электронов в центре отдельных частиц с ускоряющим напряжением 0-20 кВ и временем счета 50–100 с. (Колесникова и др.,2023). Процентное содержание элементов определено с помощью метода рентгенофлуоресцентный анализа (РФА) (Castaing, 1952; Рид, 1979; Scott, Love, 1983; Малви, 1986; Филиппов, 2020).

2.2.7 Реологические параметры

Для исследования вязкоупругих свойств был использован метод амплитудной развертки (Mezger, 2020) с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия). PP = 25мм, сила <= 1 Ньютон, 30 точек (15 сек/точка), t=20 С, частота 0,5 герц, деформация 0,001-100%. Для каждого объекта была 3-х кратная повторность (Шеин и др., 2017).

Были определены следующие реологические параметры: G′ – модуль накопления, как составляющая вязкоупругого поведения;

G″ – модуль потерь, как составляющая вязкоупругого поведения; LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости (пределы устойчивости почвенной пасты к разрушению структуры); CROSSOVER (G′=G″) – точка разрушения структуры (точка равенства модулей накопления и потерь) (Хайдапова и др., 2016; Клюева, 2019).

2.2.8 Определение удельной поверхности

Определение удельной поверхности (Sуд.) образцов проводили на анализаторе площади поверхности (Сорбтометр-М, КАТАКОН, Россия) по низкотемпературной адсорбции азота (Шеин и др., 2017). Использовали метод тепловой десорбции азота с поверхности исследуемых образцов в динамических условиях. Сорбция при температуре кипения жидкого азота 77К и относительном давлении P/Po = 0,20 (одноточечный метод). Площадь поверхности вычислялась при помощи модели BET (Brunauer, Emmett, Teller, 1938). Расчет проводился по 10 точкам. P_0=760 мм.рт.ст.

Для удаления гигроскопической влаги образцы предварительно выдерживались в вакуумном шкафу при 105ºС не менее 24 часов. Перед началом измерения производился прогрев (30 мин) образца в потоке азота при температуре 100°С для удаления с его поверхности поглощенных газов и паров воды.

В ходе анализа выполнялся согласно следующим операциям:

- установление заданного состава газовой смеси (P/Po= 0.2);
- адсорбция газа-адсорбата на поверхности образца из потока газовой смеси заданного состава при температуре жидкого азота (-196°С или 77К) до установления равновесия между содержанием газа-адсорбата в газовой и адсорбционной фазах;
- десорбция газа-адсорбата с поверхности образца в поток газовой смеси при нагревании образца до температуры полной десорбции газа-адсорбата (-100°С);

- автоматический расчёт удельной поверхности исследуемого образца.

2.2.9 Краевой угол смачивания (КУС) поверхности твердой фазы

Фиксация образца для определения КУС осуществлялась на мембранном фильтре (Матвеева и др., 2019). К навеске (0.1 г) воздушно-сухого образца (растерт резиновым пестиком, сито 250 мкм) добавляли 15 мл дистиллированной воды и диспергировали УЗ (Branson Digital Sonifier, США) при энергии диспергации 445 Дж/мл. Для удаления из диспергированной суспензиии единичных крупных песчаных зерен использовали сито 100 мкм. 5 мл суспензии образца фильтровали при разрежении через мембранный фильтр с порами 0,45 мкм и диаметром 47 мм (МФАС-ОС-2, Владипор, Россия). Влажные фильтры с образцом помещали на предметное стекло с двухсторонней клейкой лентой; сушили при комнатной температуре в течение недели.

Определение КУС проводили методом статической сидячей капли (Ryley, Khoshaim, 1977), на цифровом гониометре (Система Анализа Формы Капли, DSA100, Kruss, Германия), оснащенном видеокамерой и программным обеспечением. КУС определялся по первому четкому кадру в момент посадки капли на образец, сообразно характеристикам впитывания почвы (Shang et al., 2008), скорость капли 100–150 мкм/сек. Аппроксимацию формы капли проводили методом Лапласа-Юнга. Для объектов ≈60 измерений на один объект.

2.2.10 Численность микроорганизмов (метод посева)

Общую численность культивируемых гетеротрофных аэробных бактерий определяли посевом (чашечным методом Коха) на среде “Rich” – разбавленной глюкозо-пептонно-дрожжевой среде (ГПД). Пробоподготовка: почвенная суспензия (1 : 10), десорбция клеток на вортексе “Multi Reax” фирмы Heidolph 20 мин. при 2000 об./мин. Для подавления роста грибов в суспензии добавляется нистатин. Концентрация бактерий в исходных суспензиях

определялась посевом на агаризованную глюкозо-пептоно-дрожжевую среду (ГПД) - агар-агар 15 г/л, глюкоза 1г/л, пептон 1г/л, дрожжевой экстракт 1г/л.

Оценивалась численность колоний на протяжении двух недель. За искомую численность принималась численность колониеобразующих единиц (КОЕ) на 1г почвы после выхода численность на плато. Анализ численности культивируемых бактерий проводился в 3-кратной повторности; результаты представлены как медиана и квартили.

2.2.11 Численность микроорганизмов (метод прямой люминесцентной микроскопии)

Пробоподготовка: почвенная суспензия (1 : 10), десорбция клеток на вортексе “Multi Reax” фирмы Heidolph 20 мин. при 2000 об./мин. Аликвота 1 мл суспензи добавлялась к 20 мл дистиллята и озвучивали при энергии ультразвуковой диспергации 22,7 Дж/мл на Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) для отделения клеток от почвенных и органических частиц. Аликвоту 10 мкл добавляли на предметное стекло, равномерно распределяя на площадь 400 мм^2. Окрашивали акридином оранжевым (Звягинцев, 1991.) и флуоресцеином диацетатом (ФДА) (Chrzanowski, 1984). Микроскопирование проводили на люминесцентном микроскопе «Биомед 6», увеличение х1000. Расчетная площадь зрения 0,10178 мм. Одна площадь мазка соответствует 3930 полям зрения. Для каждого объекта воспроизведена трехкратная повторность. Количество полей зрения на одну повторность от 20 до 30 в зависимости от уменьшения свечения.

2.2.12 Дегидрогеназная активность

Метод основан на колориметрическом измерении формазана (ТТФ), образующегося в результате восстановления 2,3,5-трифенилтетразолийхлорида (ТТХ) (Колешко, 1981). Для определения активности дегидрогеназ почвы в качестве акцептора водорода применяют бесцветные соли тетразолия (2,3,5-трифенилтетразолий хлористый, ТТХ), которые восстанавливаются в красные соединения формазанов (трифенилформазан, ТФФ). Использовали 0,1 М раствор глюкозы, 1%-й раствор 2,3,5- трифенилтетразолия хлористого (ТТХ),

CaCO3, этиловый спирт. Средние образцы почвы и копролитов отобраны через 2 недели культивирования. Для всех объектов pH_{H2O} (7.00 ± 0.6). Навеска проб 100 мг. Навеску воздушно-сухой почвы 0,1 г помещали в пробирку, добавляли 1 мг CaCO3, 0,1 мл 0,1 М раствора глюкозы, и 0,1 мл 1%-ного раствора ТТХ и тщательно смешивали. Инкубировали при 30°С в течение 24 часов. По истечении срока инкубации образовавшийся ТФФ экстрагировали этанолом (25 мл), фильтровали и определяли оптическую плотность при λ = 540 нм на иммунно-ферментном анализаторе «Sunrise» фирмы «Tecan». Количество формазана в миллиграммах рассчитывают по стандартной кривой (К 20 мл 2% -ного р-ра ТТХ (2,3,5-тетразолий хлористый) добавляли сухой $NaHSO_3$ и 20 мл этилового спирта. Итоговая концетрация на 50 мл 8 мг ТФФ (2,3,5-трифенилформазан), или 160 мкг/мл. Серия: 1, 2, 5, 8, 10, 20 мл (соответственно: 160, 320, 800, 1280, 1600, 3200 мкг ТФФ/л). Ошибка определения до 8%. (Звягинцев, 1991.)

2.2.13 Эстеразная активность[1]

Использование реакции гидролиза флуоресцеина диацетата (ФДА) предложили (Schnürer, Rosswall, 1982) для исследования почвы и подстилки при определении ферментативной активности. Средние образцы почвы и копролитов отобраны через 2 недели культивирования. Для всех объектов pH_{H2O} (7.00 ± 0.6). В пробирки (20 мл) 0,5 г почвы/копролитов и 10 мл H_2O. Десорбция клеток на вортексе “Multi Reax” фирмы Heidolph 20 мин. при 2000 об./мин. Во всех вариантах к почвенной суспензии добавлялся один объем аликвоты 10 мкл и оставляли на 8 часов. Единый объема аликвоты для разных концентраций получали за счет добавления ацетона к раствору ФДА (например, для концентрации 11,04 мкмоль/л в 100 мкл (90 мкл - почвенная суспензия, 1 мкл раствора ФДА и 9 мкл ацетона), для концентрации 22,08 мкмоль/л в 100 мкл (90 мкл - почвенная суспензия, 2 мкл раствора ФДА и 8

[1] **Фролов О.А.,** Терехин А.В., Якушев А.В., Милановский Е.Ю. Method for determining microbial activity (hydrolysis of fluorescein diacetate (FDA), 490 nm) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1093. – №. 1. – С. 012016. – DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012016 - 0,57 п.л., личный вклад – 0,3 п.л.

мкл ацетона) и т.д.). Почвенную суспензию центрифугировали 10 минут при 6000 rpm, 100 мкл надосадочной жидкости добавляли в 96 луночной планшету. Оптическую плотность определяли при 490 нм на иммунно-ферментном анализаторе «Sunrise» фирмы «Tecan». Оптическая плотность контроля (почва без добавления ФДА) вычиталась из оптической плотности растворов разной серии концентрации.

Для расчета константы Михаэлиса (*K*m) и максимальной скорости реакции (*V*m) применялась серия растворов из 15 возрастающих концентраций FDA в диапазоне от 0 до 160 мкмоль/л. Для построения градировочного графика (концентрация флуоресцеина от оптической плотности) готовили матричные растворы из ФДА. Каждая концентрация FDA для каждого исследуемого мезокосма была 6-кратной повторности при 3-кратном измерение на приборе, данные усреднялись (Фролов и др, 2022).

2.2.14 Анализ кривых роста бактерий[2]

Микробиологический анализ проводили комплексным структурно-функциональным методом (Якушев. 2015). Использовали водные суспензии (1:10) почвы и копролитов дождевого червя. Микроорганизмы десорбировались на вортексе «Multi Reax» фирмы Heidolph 20 мин. при 2000 об./мин. Для подавления роста грибов в суспензии добавлялся нистатин. Концентрация бактерий в исходных суспензиях определялась посевом на разбавленную агаризованную глюкозо-пептоно-дрожжевую среду (среда Rich) - агар-агар 15 г/л, глюкоза 1г/л, пептон 1г/л, дрожжевой экстракт 1г/л. Готовились маточные (2^x) жидкие среды, содержащие 5 г/л биополимеров (хитин, целлюлоза, пектин, крахмал, ксилан, декстран 500, твин 20, казеин, нуклеиновая кислота, инулин и кератин), соли среды Чапека ($NaNO_3$ - 1г/л, KH_2PO_4 – 0,5 г/л, $MgSO_4*6H_2O$ - 0,25 г/л, KCl- 0,25 г/) и вода. Среды вносились

[2] Раздел написан на основе материалов, опубликованных в работе:
Фролов О.А., Якушев А.В. Влияние на бактериальный гидролитиче-ский комплекс гумусо-аккумулятивного горизонта техноурбанозема пассажа через кишечник дождевого червя Aporrectodea caliginosa // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. – 2018. – №. 94. – С. 57-73. – DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-57-73 – ИФ по РИНЦ (2022) – 1, 411, 1 п.л., личный вклад – 0,5 п.л.

по 100 мкл в ячейки 96-луночной культуральной планшеты. Предусмотрены контроль на стерильность и на рост за счёт органического вещества суспензии. Рост ассоциаций бактерий определялся в динамике (измерение каждые полчаса на протяжении 200 часов) по оптической плотности при 620 нм на иммунно-ферментном анализаторе «Sunrise» фирмы «Tecan». Температура инкубаций 25°С. По данным посева из ячеек устанавливалась корреляция между оптической плотностью и концентрацией бактерий.

Поведение ассоциаций в лаг-фазе и экспоненциальный рост описывали уравнением, взятым из комплексной модели периодической культуры А.В. Якушева, которая для этих стадий роста очень близка к синтетической хемостатной модели Н.С. Паникова. Эта модель может быть записана в виде одного интегрального уравнения (5):

$$x(t) = x_0 \cdot (1 - p_0 + p_0 \cdot e^{\mu_m \cdot t}) \qquad (5)$$

где μ_m – максимальная удельная скорость роста (1/ч)

$x(t)$ – концентрация клеток (КОЕ/мл) в момент времени t (ч)

ρ_0 – начальное значение переменной физиологического состояния ρ

x_0 – начальная концентрация клеток бактерий в момент инокуляции (КОЕ/мл).

В модели x (концентрация клеток в среде), x_0 (исходная концентрация в суспензии культивируемых бактерий) и t (время) – экспериментальные данные, а μ_m и ρ_0 параметры. μ_m - максимальная удельная скорость роста. ρ_0 - функция физиологического состояние растущей культуры, отражающее отличие удельная скорость роста μ от μ_m в лаг-фазе. Параметр ρ_0 характеризует физиологическое состояние в момент интродукции (в почве). На основании этого параметра вводится метаболическая готовность к росту (это готовность организма к росту на определенной среде).

Рассмотрим конкретный пример полученных параметров. Возьмем случайную кривую роста и отметим на ней участки, описываемые разными параметрами (рис.2).

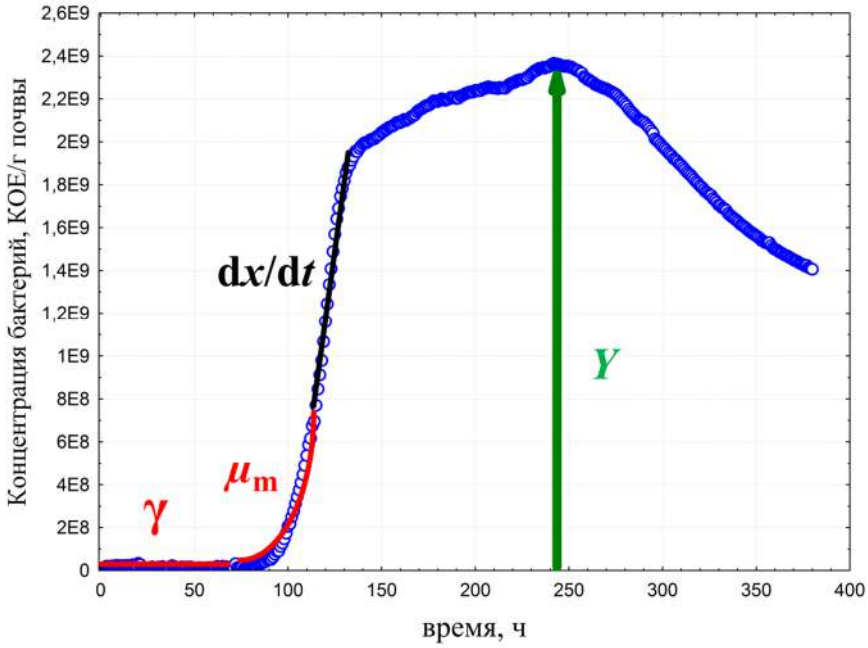


Рисунок 2. Кривая роста ассоциации бактерий (копролиты *Aporrectodea caliginosa* на декстране 500). Красным цветом параметры из уравнения (1), черным цветом линейный участок роста, зеленым цветом максимальное значение численности микроорганизмов на кривой роста (отмечается на кривой значение выхода на на плато).

В результате обработки кривой роста получается 4 параметра (рис.2) (Фролов и др., 2018), где

μ_m - максимальная удельная скорость роста, γ - метаболическая готовность к росту. Чем больше γ, тем метаболическая готовность к росту больше; γ характеризует как метаболически активную, так и покоящуюся культуру микроорганизмов.

$Y = \frac{x_m - x_0}{s_0}$ – микробный экономический коэффициент, где x_m – максимальная концентрация клеток, достигаемая на питательной среде, x_0 – исходная концентрация “культивируемых” бактерий в инокулируемой суспензии, определенная методом посева исходной почвенной суспензии на агаризованную глюкозо-пептоннодрожжевую среду (ГПД), s_0 –концентрация полимеров.

$\frac{dx}{dt}$ - линейная скорость роста смешанной культуры, участок лимитированного роста.

После анализа кривых роста было принято решение, что наиболее оптимальным для работы является параметр Y. Это связанно с тем, что расчет метаболической готовности к росту(γ) существенно изменяется в зависимости от значения начальной численности микроорганизмов (для близких объектов требуется точность выше, чем $¼*10^n$. К сожалению, при оценке численности методом посева или прямой люминесцентной микроскопии точность оценки не превышает порядка, в лучшем случае –половины порядка. Это вносит существенные искажения и приводит к невозможности корректной оценки.

Расчет максимальной удельной скорости роста (μ_m) или линейной скорости роста смешанной культуры, участок лимитированного роста ($\frac{dx}{dt}$) рассчитать сложно для кривых роста, где присутствует несколько ступеней. Таким образом, неясно, какую из ступеней следует выбирать или, возможно, следует брать среднее значение. Возникают сложности при сравнении кривой роста с одной и несколькими ступенями (рис.3). Для расчета и оценки кривых роста использовался только один параметр: Y – микробный экономический коэффициент.

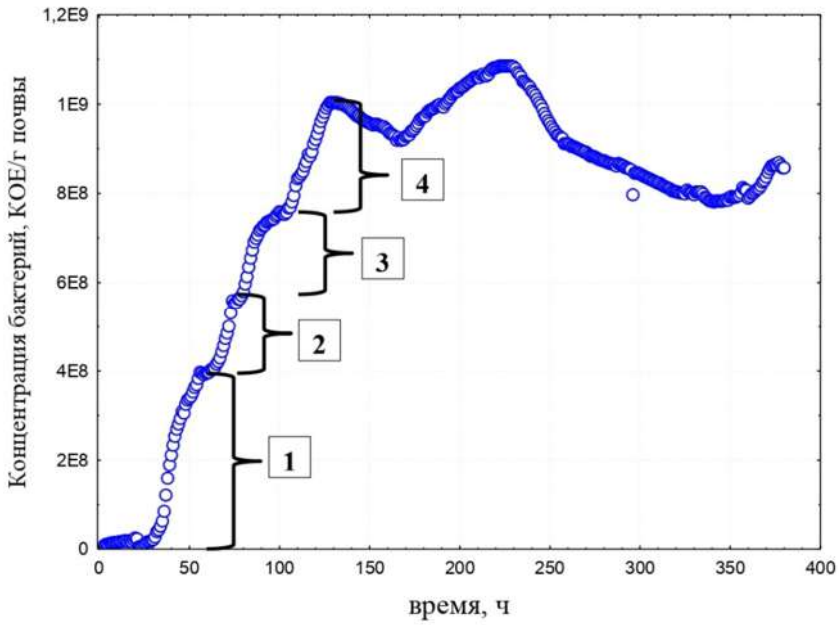


Рисунок 3. Пример кривой роста с несколькими ступенями (копролиты *Aporrectodea caliginosa* на декстране 500). Фигурными скобками отмечены ступени на кривой роста.

2.2.15 Комплексный статистистический анализ изученных свойств

Свойства копролитов определяли в трех последовательных экспериментах. Для анализа свойств объектов использовали не менее трехкратной повторности. Статистическую обработку проводили с использованием программного пакета Excel и Statistica. Использовали дисперсионный анализ (ANOVA), метод главных компонент (МГК), корреляционный анализ, сравнение средних по U-критерию Манна-Уитни, сравнения средних по t-критерию Стьюдента. На рисунках данные, соответствующие нормальному распределению, представлены в виде средних с 95% доверительным интервалом, не соответствующие нормальному распределению – представлены в виде медианы и квартилей.

2.2.15.1 Дисперсионный анализ (ANOVA)

Параметры биологических и агрофизических свойств копролитов, исходной почвы и исходной почвы с опадом (для №1 эксперимента II этап и №2 эксперимента) сведены в единую таблицу. Для каждого мезокосма

значения параметров усреднены. На основании полученной таблицы проведен дисперсионный анализ (ANOVA).

2.2.15.2 Метод главных компонент (МГК)

Всего в анализе оценивалось 47 параметров биологических и агрофизических свойств копролитов, исходной почвы и исходной почвы с опадом (для №1 эксперимента II этап и №2 эксперимента). Данные предварительно преобразованы с помощью аддитивного преобразования логарифмического отношения (alr). Ко всем значениям предварительно прибавлена единица (чтобы избежать наличия нуля) и отрицательные значения (для $\delta^{13}C$) взяты по модулю.

2.2.15.3 Корреляционный анализ

Корреляционный анализ проведен по изменению свойств в 4-х объектах: копролиты двух видов дождевых червей, исходная почва и исходная почва с опадом. В рамках одной точки бралось среднее значение выбранного параметра для одного мезокосма. Корреляция построена на 12 точках.

Глава 3. Результаты и обсуждение[3]

Далее представлены результаты по всем измеренным параметром в виде графиков Box&Whiskers. Для каждого из параметров проведена проверка отклонения распределения от нормального Результаты представлены в приложении. Почти все значения имеют перекрытие либо доверительных интервалов, либо квартилей. Для оценки достоверностей отличий использовался статистический тест. В завивисимости от типа распределения выбрано сравнение средних по U-критерию Манна-Уитни (для не нормального распределения) или по t-критерию (для нормального распределения). Подробные таблицы сравнения представлены в приложении. Для комплексного описания всех параметров проведен дискриминантный анализ и анализ методом главных компонент. Построены графики и выделены основные параметры, выделяющие копролиты червей, исходную почву и почву с опадом. Построена корреляционная матрица и сделан вывод о линейной корреляции исследованных параметров.

3.1 Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота (с кленовым опадом).

Результаты анализов представлены на рисунке 4. Для определения различий в средних значениях по параметрам использовалось сравнение средних. Ввиду малого объема выборки критерии оценки нормальности не применимы, поэтому сделано допущение, что отклонения значений

---

[3] Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах:
Фролов О.А., Якушев А.В., Милановский Е. Ю. Гетерогенность свойств копролитов дождевых червей Aporrectodea caliginosa и Lumbricus rubellus в модельном опыте на черноземе // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. – 2019. – №. 99. – С. 92-116. – DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-92-116 – ИФ по РИНЦ (2022) – 1,411, 1,4 п.л., 0,7 п.л.
Фролов О.А., Милановский Е.Ю. Размер и содержание органических частиц в копролитах Aporrectodea caliginosa и Lumbricus rubellus // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2022. – №. 58. – С. 6-27. – DOI: 10.17223/19988591/58/1 – Q4 – SRJ– 0,17, 1,9 п.л., 1,2 п.л.
Фролов О.А., Якушев А.В. Влияние на бактериальный гидролитический комплекс гумусо-аккумулятивного горизонта техноурбанозема пассажа через кишечник дождевого червя Aporrectodea caliginosa // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. – 2018. – №. 94. – С. 57-73. – DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-57-73 – ИФ по РИНЦ (2022) – 1, 411,– 1п.л., личный вклад – 0,5 п.л.
Фролов О.А., Терехин А.В., Якушев А.В., Милановский Е.Ю. Method for determining microbial activity (hydrolysis of fluorescein diacetate (FDA), 490 nm) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1093. – №. 1. – С. 012016. – DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012016 - количество печатных листов (п.л.) – 0,57, личный вклад – 0,3 п.л.

подчиняются нормальному распределению. Сравнению по U-критерию Манна-Уитни невозможно, т.к. не соблюдается ограничение метода (отсутствие в сравниваемых группах совпадающих значений признака). Для детальной оценки проведено сравнение средних по t-критерию для всех параметров (таблица 1).

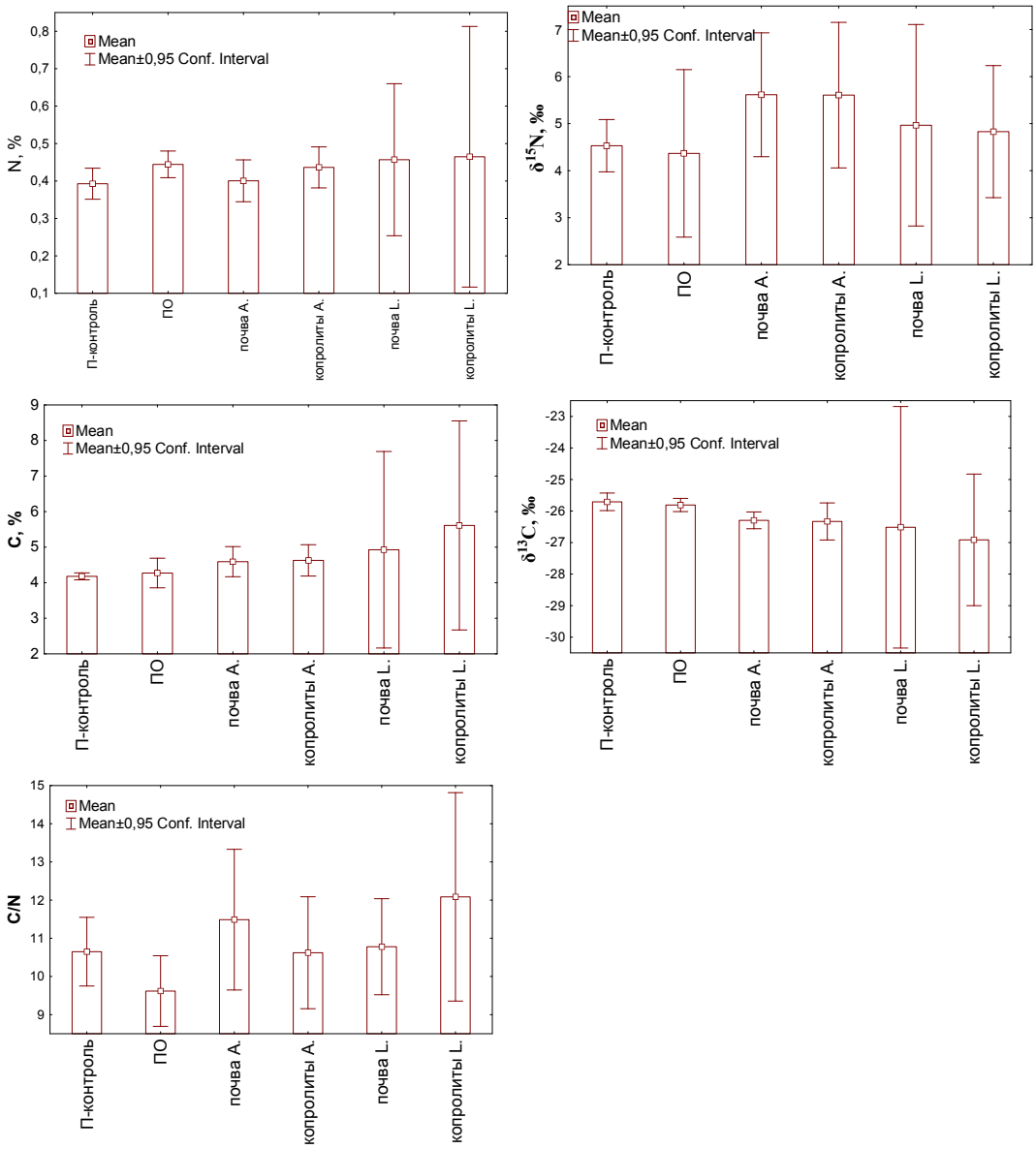


Рисунок 4. Содержание углерода (C,%), изотопа углерода (δ^{13}C,‰), азота (N,%), изотопа азота (δ^{15}N ,‰), соотношение углерода к азоту (C/N) в объектах эксперимента №2. П-контроль – исходная почва; ПО –почва с опадом; А – копролиты *A. caliginosa*; почва А – почва с *A. caliginosa*; копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Графики Box&Whisker, значения представлены в виде средних с 95% доверительным интервалом.

Таблица 1. Результаты сравнения средних по t-критерию для содержания $C_{орг}$ (C, %); содержания азота (N, %); соотношения C/N; изотопного состава углерода ($\delta^{13}C$,‰); изотопного состава азота ($\delta^{15}N$,‰). Для объектов: клён – опад клёна; П-контроль – почва; ПО – почва с опадом; А – копролиты *A. caliginosa*; почва А – почва с *A. caliginosa*; копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Ср.знач. - среднее значение выборки; p – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Объект в первом столбце (выделен жирным шрифтом) сравнивается по очереди с остальными. Подробную таблицу см. в приложение.

	Ср. знач.	Ср.знач.	p	Ср.знач..	P	Ср.знач	p	Ср.знач.	p
	клён	П-контроль		ПО		копролиты А		почва А	
C, %	*30,0*	*4,2*	*0*	*4,3*	*0,001*	*4,6*	*0,001*	*4,6*	*0,001*
N, %	*1,6*	*0,4*	*0*	*0,4*	*0*	*0,4*	*0*	*0,4*	*0*
C/N	19,8	10,7	0,08	9,6	0,057	10,6	0,08	11,5	0,106
$\delta^{15}N$,‰	3,1	4,5	0,388	4,4	0,445	5,6	0,16	5,6	0,157
$\delta^{13}C$,‰	*-29,1*	*-25,7*	*0*	*-25,8*	*0*	*-26,3*	*0*	*-26,3*	*0*
	клён	копролиты L		почва L					
C, %	*30,0*	*4,6*	*0,001*	*4,9*	*0,003*				
N, %	*1,6*	*0,4*	*0*	*0,5*	*0,002*				
C/N	19,8	12,1	0,106	10,8	0,157				
$\delta^{15}N$,‰	3,1	5,6	0,157	5,0	0,377				
$\delta^{13}C$,‰	*-29,1*	*-26,3*	*0*	*-26,5*	*0*				
	Ср. знач.	Ср. знач.	p	Ср. знач.	P	Ср. знач.	p	Ср. знач.	p
	ПО	П-контроль		копролиты А		почва А			
C, %	4,3	4,2	0,397	4,6	0,065	4,6	0,082		
N, %	*0,4*	*0,4*	*0,015*	0,4	0,624	*0,4*	*0,047*		
C/N	9,6	*10,7*	*0,026*	10,6	0,067	*11,5*	*0,017*		
$\delta^{15}N$,‰	4,4	4,5	0,725	5,6	0,087	5,6	0,073		
$\delta^{13}C$,‰	-25,8	-25,7	0,281	*-26,3*	*0,023*	*-26,3*	*0,003*		
	ПО	копролиты L		почва L					
C, %	4,3	*5,6*	*0,008*	*4,9*	*0,049*				
N, %	0,4	0,5	0,443	0,5	0,49				
C/N	9,6	*12,1*	*0,005*	*10,8*	*0,027*				
$\delta^{15}N$,‰	4,4	4,8	0,455	5,0	0,355				
$\delta^{13}C$,‰	-25,8	*-26,9*	*0,004*	-26,5	0,056				

Продолжение таблицы 1.

	П-контр.	копролиты A		почва A		копролиты L		почва L	
C, %	4,2	*4,6*	*0,013*	*4,6*	*0,015*	*5,6*	*0,004*	*4,9*	*0,02*
N, %	0,4	0,4	0,052	0,4	0,657	0,5	0,057	*0,5*	*0,034*
C/N	10,7	10,6	0,949	11,5	0,153	*12,1*	*0,02*	10,8	0,674
δ^{15}N,‰	4,5	*5,6*	*0,048*	*5,6*	*0,031*	4,8	0,207	5,0	0,129
δ^{13}C,‰	-25,7	*-26,3*	*0,015*	*-26,3*	*0,003*	*-26,9*	*0,004*	*-26,5*	*0,043*

	копролиты A	почва A		копролиты L		почва L	
C, %	4,6	4,6	0,809	*5,6*	*0,02*	4,9	0,249
N, %	0,4	0,4	0,12	0,5	0,358	0,5	0,385
C/N	10,6	11,5	0,189	12,1	0,052	10,8	0,748
δ^{15}N,‰	5,6	5,6	0,987	4,8	0,198	5,0	0,275
δ^{13}C,‰	-26,3	-26,3	0,829	-26,9	0,072	-26,5	0,563

	копр. L	почва L	
C, %	5,6	4,9	0,164
N, %	0,5	0,5	0,829
C/N	12,1	*10,8*	*0,031*
δ^{15}N,‰	4,8	5,0	0,57
δ^{13}C,‰	-26,9	-26,5	0,364

	почва A	почва L	
C, %	4,6	4,9	0,202
N, %	0,4	0,5	0,071
C/N	11,5	10,8	0,293
δ^{15}N,‰	5,6	5,0	0,216
δ^{13}C,‰	-26,3	-26,5	0,424

Здесь и далее отличия обозначенные знаками больше и меньше значимы (согласно сравнению средних по t-критерию). Содержание органического углерода ($C_{орг}$,%) уменьшается в ряду: опад клёна (30,0) >> копролиты *L.rubellus* (5,6) > почва с *L.rubellus* (4,9); копролиты *A.caliginosa* (4,6); почва с *A.caliginosa* (4,6); > почва с опадом (4,3); почва (4,2). Изотопная подпись

(δ^{13}C,‰) изменяется в ряду: опад клёна (-29,1) < копролиты *A.caliginosa* (-26,3); почва с *A.caliginosa* (-26,3); копролиты *L.rubellus* (-26,9); почва с *L.rubellus* (-26,5) < почва с опадом (-25,8*)*; почва (-25,7).

Содержание азота (N,%) уменьшается в ряду: опад клёна (1,6) >> почва с опадом (0,4); почва с *L.rubellus* (0,4); копролиты *L.rubellus* (0,5); копролиты *A.caliginosa* (0,4); почва с *A.caliginosa* (*0,4*); почва (0,4). Соотношение углерода к азоту (C/N) возрастает в ряду: опад клёна (19,8) >> копролиты *L.rubellus* (12) > почва с *L.rubellus* (10,8); копролиты *A.caliginosa* (10,6); почва с *A.caliginosa* (11,5); почва (10,6) > почва с опадом (9,6). Изотопная подпись (δ^{15}N ,‰) увеличивается в ряду: опад клёна (3,0) < копролиты *L.rubellus* (4,8); почва с *L.rubellus* (5,0)*;*почва с опадом (4,4); почва (4,5) < копролиты *A.caliginosa* (5,6); почва с *A.caliginosa* (5,6).

3.2 Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота (с кукурузой).

Содержание $C_{орг}$ уменьшается в ряду (рис. 5): пожнивные остатки кукурузы (33,6) >> копролиты *A.caliginosa* (3,7); почва с *A.caliginosa* (3,8); > почва (3,2); почва с опадом (3,2). Изотопная подпись (δ^{13}C,‰) изменяется в ряду: опад кукурузы (-14,6) > копролиты *A.caliginosa* (-24,0); почва с *A.caliginosa* (-23,4) > почва (-25,6); почва с опадом (-25,5).

Содержание азота (N,%) уменьшается в ряду: пожнивные остатки кукурузы (1,2) >> копролиты *A.caliginosa* (0,4) > почва с опадом (0,3); почва (0,3); почва с *A.caliginosa* (0,3). Соотношение углерода к азоту (C/N) возрастает в ряду: пожнивные остатки кукурузы (35,5) >> почва с *A.caliginosa* (11,9) > копролиты *A.caliginosa* (10,3); почва с опадом (9,7); почва (10,1). Изотопная подпись (δ^{15}N ,‰) увеличивается в ряду: пожнивные остатки кукурузы (-2,2) < почва с опадом (3,3) <копролиты *A.caliginosa* (4,8); почва с *A.caliginosa* (5,4); почва (4,7).

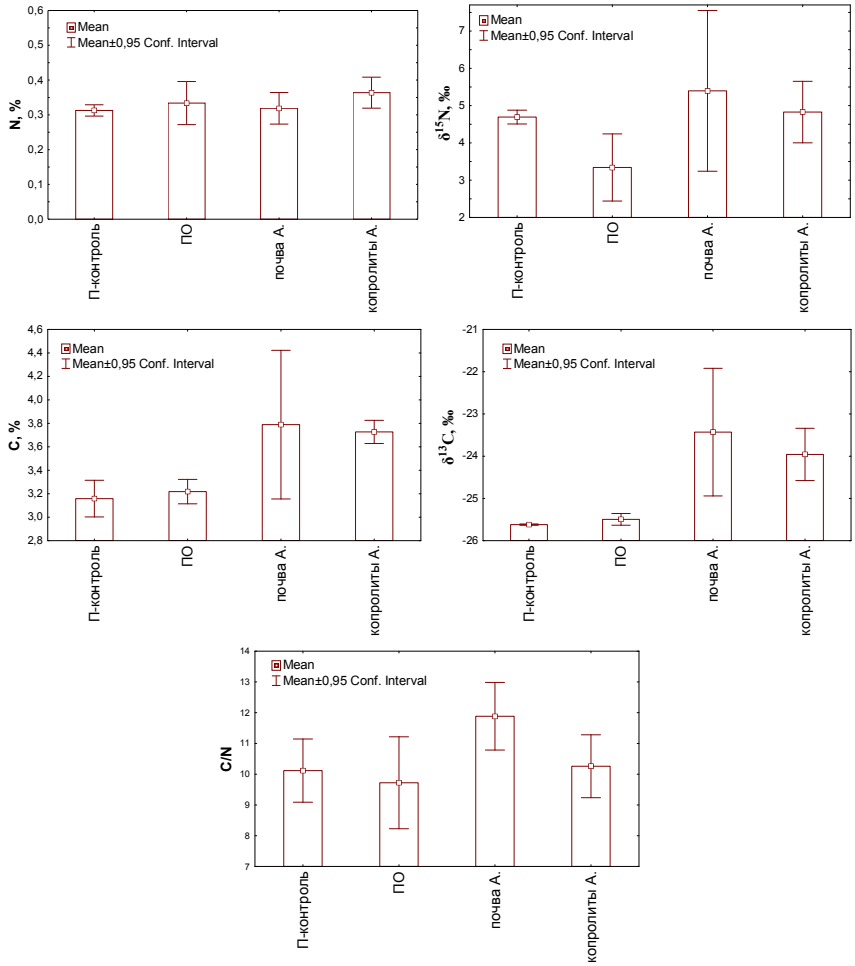


Рисунок 5. Содержание углерода (C,%), изотопная подпись (δ^{13}C,‰), азота (N,%), изотопная подпись (δ^{15}N ,‰), соотношение углерода к азоту (C/N) в объектах эксперимента №3. П-контроль – почва; ПО – почва с остатками пожнивными кукурузы; А – копролиты *A. caliginosa*; копролиты L – копролиты *L.rubellus.* Графики Box&Whisker, значения представлены в виде средних с 95% доверительным интервалом.

Для определения различий в средних значениях по параметрам использовалось сравнение средних. Ввиду малого объема выборки критерии оценки нормальности не применимы, поэтому делаем допущение, что отклонения значений подчиняются нормальному распределению. Сравнение по U-критерию Манна-Уитни невозможно, т.к. не соблюдается ограничение метода (отсутствие в сравниваемых группах совпадающих значений признака). Для детальной оценки проведем сравнение средних по t-критерию для всех параметров (таблица 2).

Таблица 2. Результаты сравнения средних по t-критерию для содержания $C_{орг}$ (C, %); содержания азота (N, %); соотношения C/N; изотопного состава углерода ($\delta^{13}C$,‰); изотопного состава азота ($\delta^{15}N$,‰). Для объектов: кук-за – опад кукурузы; П-контроль – почва; ПО – почва с опадом; А – копролиты *A.caliginosa*; почва А – почва с *A.caliginosa*. Ср.знач. - среднее значение выборки; р – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Подробную таблицу см. в приложении.

	Ср. знач.	Ср. знач.	Р	Ср. знач.	р	Ср. знач.	р	Ср. знач.	р
	кукуруза	П-контроль		ПО		почва А		копролиты А	
C, %	*33,6*	*3,2*	*0,002*	*3,2*	*0,002*	*3,8*	*0*	*3,7*	*0*
N, %	1,3	0,3	0,095	0,3	0,101	*0,3*	*0,044*	0,4	0,052
C/N	35,5	10,1	0,202	9,7	0,196	11,9	0,14	10,3	0,119
$\delta^{15}N$,‰	-2,2	4,7	0,108	3,3	0,18	*5,4*	*0,036*	*4,8*	*0,047*
$\delta^{13}C$,‰	*-14,6*	*-25,6*	*0*	*-25,5*	*0*	*-23,4*	*0*	*-24*	*0*
	ПО	П-контроль		копролиты А		почва А			
C, %	*3,2*	3,2	0,618	*3,7*	*0,002*	3,8	0,061		
N, %	0,3	0,3	0,606	0,4	0,371	0,3	0,636		
C/N	9,7	10,1	0,727	10,3	0,487	11,9	0,052		
$\delta^{15}N$,‰	*3,3*	4,7	0,114	*4,8*	*0,043*	5,4	0,07		
$\delta^{13}C$,‰	*-25,5*	-25,6	0,243	*-24*	*0,004*	*-23,4*	*0,02*		
	П-контр.	почва А		копролиты А					
C, %	3,2	3,8	0,051	*3,7*	*0,004*				
N, %	0,3	0,3	0,712	*0,4*	*0,042*				
C/N	*10,1*	*11,9*	*0,045*	10,3	0,802				
$\delta^{15}N$,‰	4,7	5,4	0,359	4,8	0,641				
$\delta^{13}C$,‰	*-25,6*	*-23,4*	*0,017*	*-24,0*	*0,003*				
	почва А	копролиты А							
C, %	3,8	3,7	0,699						
N, %	*0,3*	*0,4*	*0,038*						
C/N	*11,9*	*10,3*	*0,01*						
$\delta^{15}N$,‰	5,4	4,8	0,348						
$\delta^{13}C$,‰	-23,4	-24,0	0,236						

Для достоверно отличающихся значений (согласно таблице 1 и 2) был проведен расчет доли экспериментально внесенного за счет опада углерода и азота в почву и копролиты. В присутствии дождевых червей из растительных остатков переходит порядка 17-20% (*A.caliginosa*) и 23-35% (*L.rubellus*) углерода в копролиты/почву, в отсутствие дождевых червей 1-3% в почву (таблица 3). Эти результаты косвенным образом согласуются с работой (Шиленкова, Тиунов, 2014), где было показано, что доля ассимилированого углерода в тканях почвенных червей составляет менее 10% углерода из опада.

Таблица 3. Доля (%) поступившего из растительных остатков углерода в объекты: ПО – почва с опадом; A – копролиты *A. caliginosa*; почва A – почва с *A. caliginosa*; копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Результаты даны в процентах (среднее значение выборки ± стандартная ошибка).

ПО	почва A.	копролиты A.	почва L.	копролиты L.
клён (δ13C)				
2,7±0,5	17,1±0,5	18,1±0,7	23,6±1,1	35,4±0,7
кукуруза (δ13C)				
1,7±0,1	18,1±0,9	20,2±0,7	-	-

В аналогичном эксперименте (Wachendorf et al., 2014) получили схожие результаты с *A.caliginosa* и почвой (leptosol согласно классификации WRB). Авторы отметили стимулирующее влияние дождевых червей на минерализацию углерода и активизацию микробного сообщества в присутствии дождевых червей. Увеличение углерода в копролитах по сравнению с контролем согласуется с литературными данными (Lavelle et al., 1997; Blanchart et al., 1997; Makeschin, 1997; Brown et al., 2000; Lavelle, Spain, 2001; Tanner, 2001; Schmidt et al., 2011). Увеличение азота в копролитах по сравнению с контролем согласуется с литературными данными (Karsten, Drake, 1997; Matthies at al., 1999; Drake, Horn, 2007; Битюцкий и др., 2007; Харин, Кураков, 2009). Большее значение изотопной подписи азота в копролитах *A. caliginosa,* чем в копролитах *L.rubellus*, по всей видимости, связано с принадлежностью к разным морфо-экологическим группам (Гераськина, 2020).

Видоспецифичность преобразования углерода и азота в почве дождевыми червями (оценка с использованием стабильных изотопов) отмечают и другие исследователи (Chang et al., 2016; Groffman et al., 2015). В работе (Groffman et al., 2015) отмечается, что соотношение дождевых червей *L.rubellus* и *L. terrestris* влияет на способность к удержанию азота в микроагрегатах (у *L. terrestris* эта способность выше согласно работе (Fahey et al.,2013b)). Интересно, что отмечается и обратная ситуация для углерода в работах (Fahey et al., 2013a; Paul et al., 2012). В их исследовании *L. terrestris* обладает меньшей способностью стабилизировать общий почвенный углерод, чем *L.rubellus*. Согласно работе (Groffman et al., 2015) в присутствии дождевых червей изотопы углерода и азота переходят из подстилки в микробную биомассу активнее, чем без них. Это согласуется с полученными нами результатами, а также подтверждается увеличением численности микроорганизмов в копролитах.

3.3 Гранулометрический состав

Рассмотривались два варианта. Первый вариант с удалением ПОВ (рис 6а, 7), стандартный вариант пробоподготовки применяемый за рубежом. Данный анализ показывает изменение в соотношении минеральных частиц. Это позволяет оценить избирательность дождевых червей в поглощении фракций почвы.

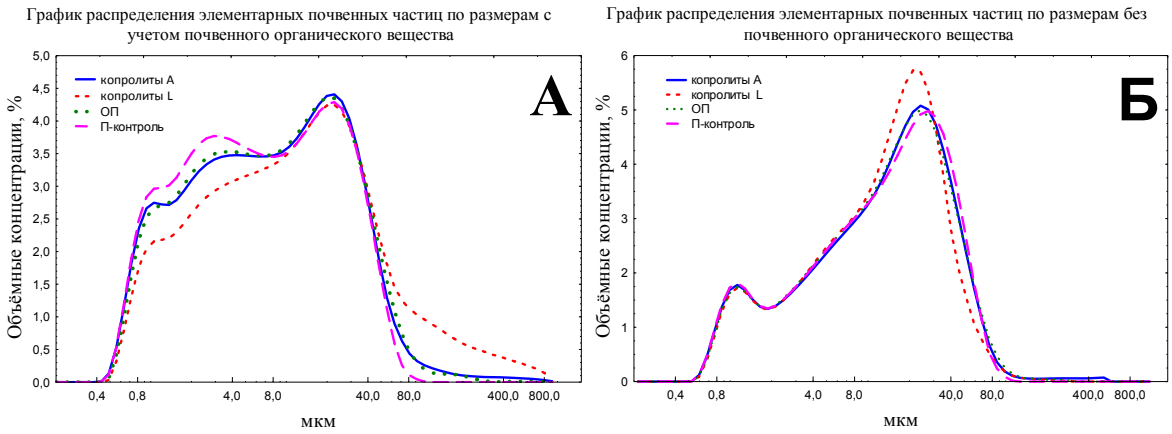


Рисунок 6 График распределения элементарных почвенных частиц по размерам; А – с учетом почвенного органического вещества, Б – без учёта почвенного органического вещества

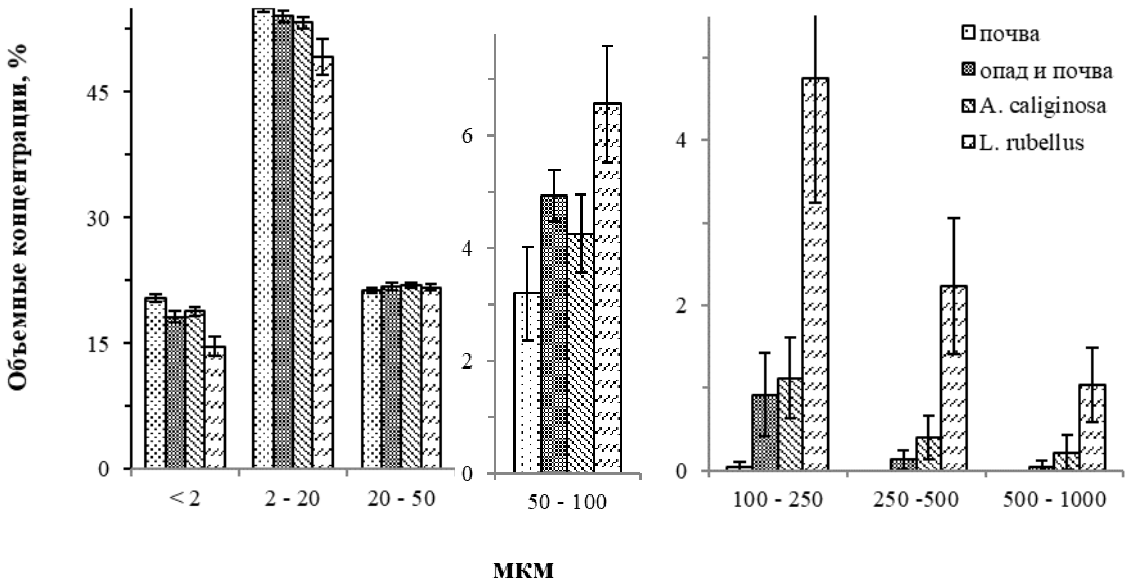


Рисунок 7. Гранулометрический состав без удаления ПОВ. По оси Y – доля частиц (%), по оси X – размеры фракций в мкм. Soil – % содержание в контрольной почве; Soil&litter – % содержание в контрольной почве с опадом; A.caliginosa – % содержание в копролитах *A. caliginosa*; L.rubellus – % содержание в копролитах *L.rubellus*. Данные представлены в виде средних с 95% доверительным интервалом

Второй вариант (рис 6б, 8) без удаления ПОВ. Этот способ позволил оценить вклад дождевых червей в ОВ поступающее в почву за счет

преобразования ими опада. Можно рассмотреть до какого размера происходит перетирание опада и в какие фракции происходит вклад органических частиц.

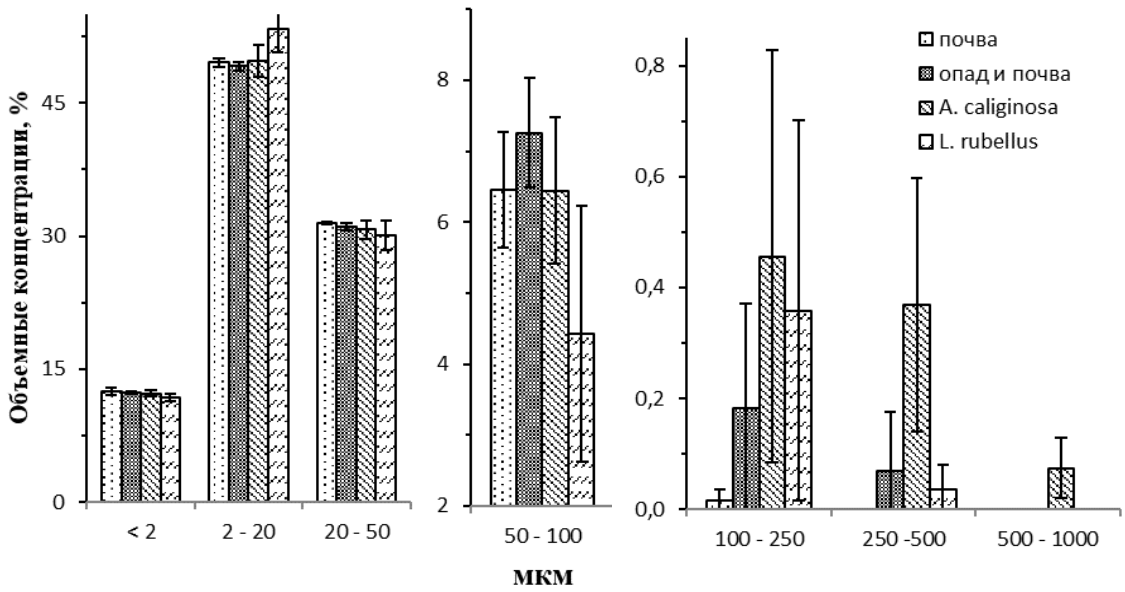


Рисунок 8. Гранулометрический состав после окисления ПОВ. По оси Y – доля частиц (%), по оси X – размеры фракций в мкм. Soil- % содержание в контрольной почве; Soil&litter – % содержание в контрольной почве с опадом; A.caliginosa – % содержание в копролитах *A. caliginosa*; L.rubellus – % содержание в копролитах *L.rubellus*. Данные представлены в виде средних с 95% доверительным интервалом

Данные распределены не нормально (см. приложение). Для детальной оценки проведено сравнение средних значений доли каждой фракции с помощью U-критерия Манна-Уитни (таблица 4). Для варианта с удалением ПОВ критерий не работал корректно для сравнения копролитов, т.к. для почвы, почвы с опадом и копролитов *L.rubellus* встречалось одно значение – ноль. Таким образом, обращать внимание необходимо на значение p-level 2, а не только на p-level 1 (см. приложение).

Таблица 4. Сравнение средних % содержания гранулометрических фракций по U-критерию Манна-Уитни, где p – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. p^1 – сравнение с копролитами *A. caliginosa*, p^2 – сравнение с копролитами *L.rubellus**. Подробную таблицу см. в приложении.

Фракция мкм	Окисление ОВ	копролиты *A. caliginosa*	копролиты *L.rubellus*		Опад и почва			почва		
		среднее	среднее	p^1	среднее	p^1	p^2	среднее	p^1	p^2
0-2	До	18,8	14,6	***0***	18,2	0,15	***0***	20,4	***0***	***0***
	После	12,3	11,8	***0***	12,3	***0***	***0***	12,5	***0,02***	***0***
2-20	До	53,3	49,1	***0***	54,0	0,62	***0***	55,0	***0***	***0***
	После	49,7	53,4	0,23	49,1	***0,01***	0,98	49,6	***0***	0,41
20 50	До	21,9	21,7	***0***	21,8	0,85	***0***	21,4	***0,04***	***0***
	После	30,7	30,0	0,28	31,1	0,59	***0,03***	31,5	***0,05***	***0,01***
50-100	До	4,3	6,6	***0***	4,9	0,85	***0***	3,2	***0,04***	***0***
	После	6,4	4,4	0,28	7,3	0,59	***0,03***	6,5	***0,05***	***0,01***
100-250	До	1,1	4,7	***0***	0,9	0,4	***0***	0,0	***0,03***	***0***
	После	0,5	0,4	0,55	0,2	0,63	0,86	0,0	***0,01***	***0,01***
250-500	До	0,4	2,2	***0***	0,1	0,66	***0***	0,0	***0,02***	***0***
	После	0,4	0,0	0,21	0,1	0,1	0,93	0,0	***0***	***0,02***
500-1000	До	0,2	1,0	***0***	0,0	0,52	*0*	0,0	***0***	***0***
	После	0,1	0,0	***0,03***	0,0	***0***	1	0,0	***0***	1
*Жирный шрифт - достоверно различающиеся пары при $p < 0,05$										

Проведен анализ методом главных компонент (МГК) для визуализации влияния видов дождевых червей и опада на фракции (объемные %) гранулометричского состава (рис.9). Результаты анализа МГК выявляют важные фракции для обнаружения органических (фракции больше> 100 мкм) и минеральных (фракции: 250–500 мкм, 500–1000 мкм) частиц в копролитах и контрольной почве.

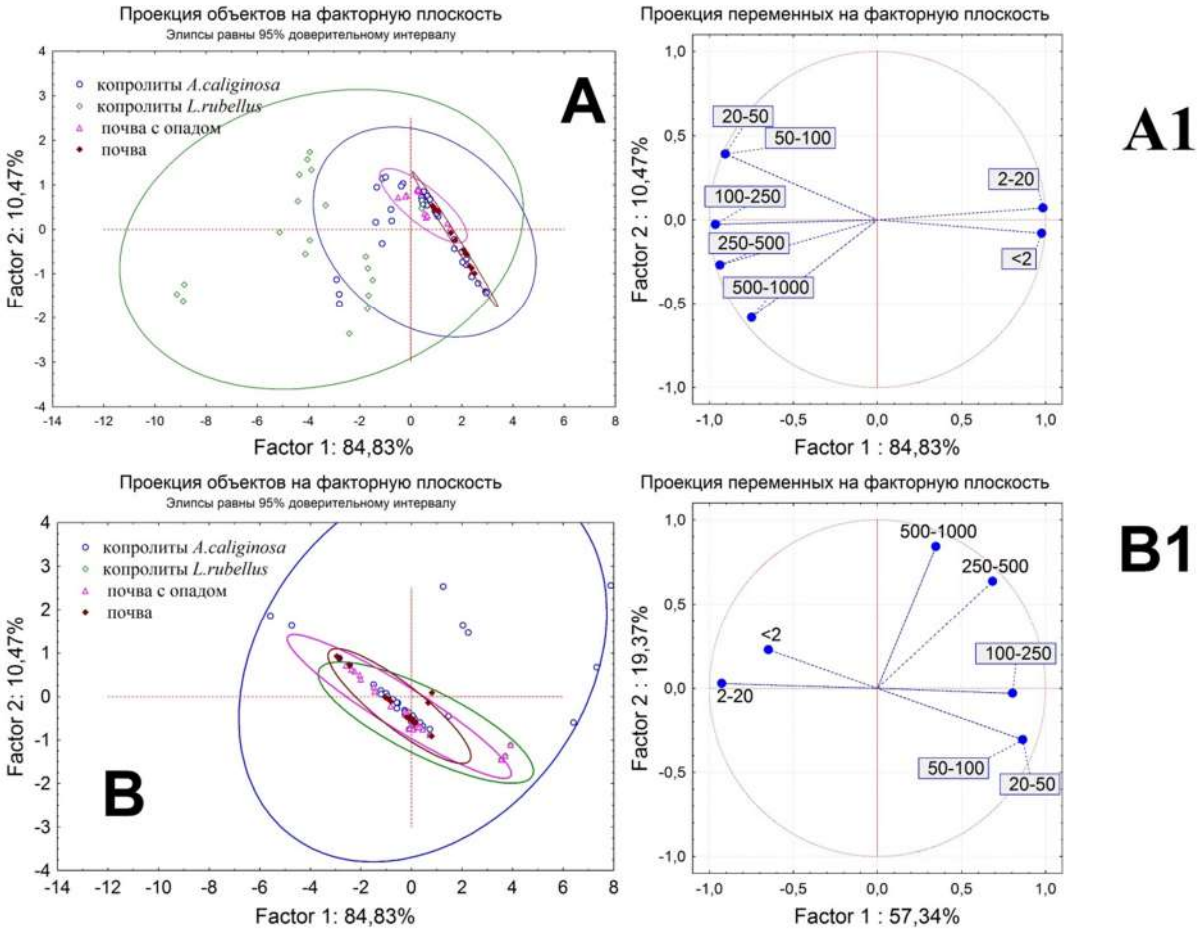


Рисунок 9. Метод главных компонент (МГК) проекция на факторную плоскость, основанная на объемных процентах фракций ГС (**А** – с учетом ОВ почвы, **В** – без учета ОВ почвы) для различных образцов (почва, почва с опадом, копролиты *A. caliginosa*, копролиты *L.rubellus*).

Органические частицы в составе копролитов распределены по фракциям песка. *A.caliginosa* (очень мелкий песок (+ 1% относительно контрольной почвы), мелкий песок (+ 1,1% относительно контрольной почвы), средний песок (+ 0,4% относительно контрольной почвы), крупный песок (+ 0,2% относительно контрольной почвы) and *L.rubellus* (очень мелкий песок (+ 3,4% относительно контрольной почвы), мелкий песок (+ 4,7% относительно контрольной почвы), средний песок (+ 2,2% относительно контрольной почвы), крупный песок (+ 1% относительно контрольной почвы). Увеличение во фракциях происходит за счет добавления органического вещества путем преобразования растительных остатков. Это согласуется с литературными

данными (Bottinelli et al., 2020): для дождевого червя *Amynthas khami* показано увеличение ОВ во всех физических фракциях почвы.

При ничтожном и/или отсутствии в почве без червей и подстилке минеральных частиц больше 100 мкм, они идентифицированы в составе копролитов *A.caliginosa* (средний песок + 0,3%, крупный песок (+ 0,1%) и *L.rubellus* (мелкий песок + 0,1%, средний песок +0,1%). В копролитах существенно увеличивается доля крупных частиц. Это заметно по фракциям более 100 мкм. Увеличение происходит как за счет органических ЭПЧ, так и за счет минеральных частиц. Как показано в работе (Marhana, Scheub, 2005), дождевые черви накапливают крупные минеральные песчинки для измельчения растительных остатков. Хотя в дальнейшем для компостных дождевых червей показывалось, что песок не является обязательным компонентом (Karthikeyan at al., 2014). Косвенным указанием на избирательное накопление песка дождевыми червями является работа (Georgiadis et al., 2019), где отмечается увеличение содержания кремния в копролитах. В работе (Прусак и др, 2008) для копролитов (*Lumbricus rubellus, Aporrectodea rosea*) отмечается увеличение крупных частиц относительно контрольной почвы (метод лазерной дифракции).

Отличия в грансоставе с удалением ПОВ (в особенности отклонение средних для почвы с опадом) в том числе, вызвано преобразованием опада микроорганизмами и дождевыми червям и внесения фитолитов в почву. По литературным данным кремния достаточно много содержится в зеленых (Айдинян, 1953) и опавших листьях клена (Воронков и др.,1971; Ремезов, 1962; Ремезов и др.,1959). Среди лиственных деревьев в опаде клёна встречается достаточно большое количество фитолитов размером до 100 мкм (Ge et al., 2020).

Источником минеральных частиц в копролитах больше 100 мкм, с одной стороны, могут являться фитолиты из листьев клёна *Acer platanoides,* с другой стороны это могут быть не окисляемые остатки органического вещества почвы

(Eusterhues et al.,2005). Однако, неполное окисление растительных остатков не может полностью объяснить различия во всех вариантах. Возможным механизмом образования крупных минеральных частиц в копролитах может быть объединение в кишечнике дождевых червей минеральных ЭПЧ почвы и фитолитов при помощи кальциевых желез.

Отличие в копролитах разных видов объясняется разными эколого-физиологическими группами. Подстилочные черви *L.rubellus* сильнее, чем почвенно-подстилочные черви *A.caliginosa* воздействуют на субстрат. Вероятно, с разрушением сочлененных фитолитов в кишечнике *L.rubellus* связано увеличение частиц тонкой пыли в PSD_{H2O2}.

3.4 Морфология гранулометрических фракций

Причину наличия в гранулометрическом составе копролитов фракций, практически отсутствующих в почве, раскрывают результаты их микроскопических исследований. Для оценки отличий при анализе гранулометрического состава во фракциях, а также оценке частиц, которые вносят вклад в увеличение доли фракций, проведено микроскопирование фракций копролитов >250мкм, 50-250мкм, <50 мкм. Наибольший интерес представляли фракции копролитов более 250 мкм, т.к. в исходной почве таких частиц не наблюдалось по результатам ГС. Для почвы фракция >250мкм на ситах отсутствует, это согласуется с полученными результатами по ГС.

Результаты микроскопии приведены на рисунках 10 – 13. Во фракции >250 мкм видны мало преобразованные фрагменты растительных тканей (части листовой пластины, жилки, растительные волокна) и единичные минеральные частицы (рис 10, 11). При микроскопировании в проходящем свете не всегда понятно минеральные зерна или органические остатки в поле зрения (рис 10). Для частичной компенсации этого недостатка сделано несколько снимков в поляризованном свете, позволяющие лучше выделить минеральные частицы (рис 11).

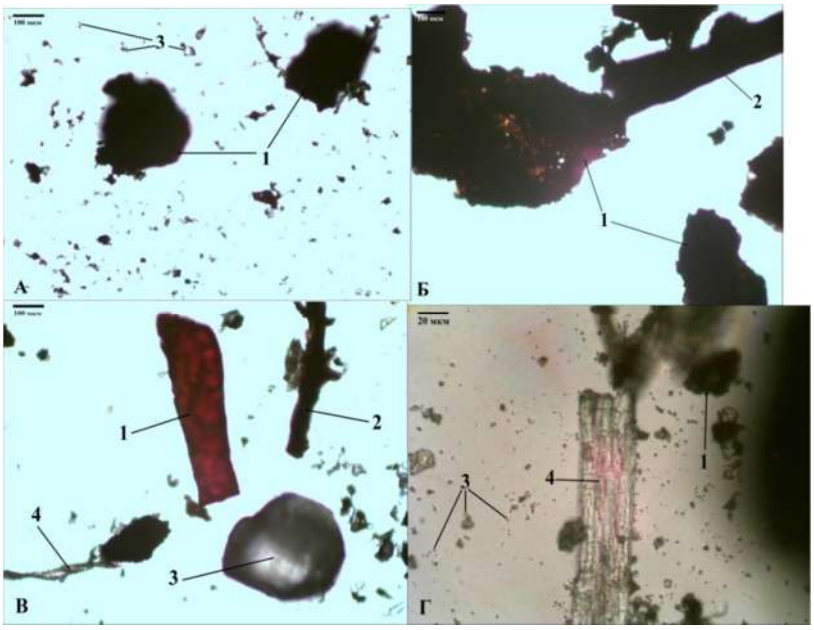


Рисунок 10. Фракция копролитов >250 мкм. В проходящем свете. Увеличение 100 (а,б,в), увеличение 400 (г). 1– части листовой пластины, 2 – жилки листа, 3 – минеральные частицы, 4 – растительные волокна листьев.

Рисунок 11. Фракция копролитов >250 мкм. В поляризованном свете. Увеличение 100 (а),увеличение 400 (б). 1– скопление жилок листа, 2 – части листовой пластины, 3 – минеральные частицы.

Фракция 250 – 50 мкм содержит минеральными и органическими частицами в равных долях. Часть растительных фрагментов представлена остатками листовой пластины, наблюдаются аморфные органические частицы (рис 12).

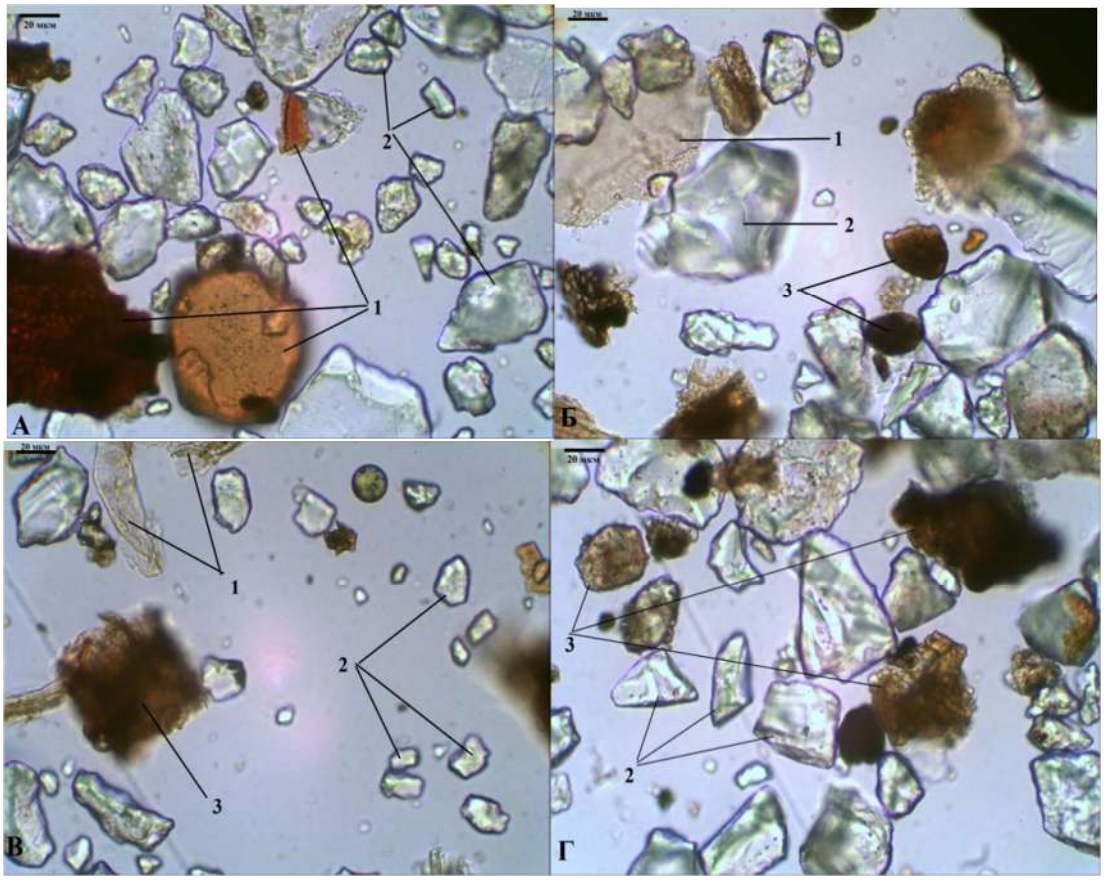


Рисунок 12. Фракция копролитов 250 – 50 мкм. В проходящем свете. Увеличение 400 (а,б,в, г). 1– части листовой пластины, 2 — минеральные частицы, 3 — аморфные органические частицы.

Фракция <50 мкм содержит минеральные и органические частицы в равных долях. Большая часть растительных фрагментов сильно преобразована. Наблюдаются скопления минеральных и органических частиц (рис 13).

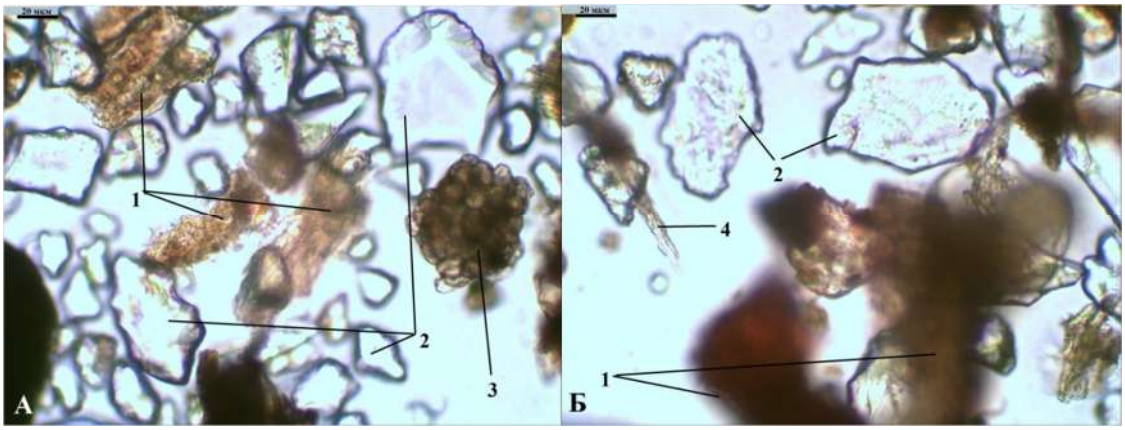


Рисунок 13. Фракция копролитов < 50 мкм. В проходящем свете. Увеличение 400 (а, б). 1– органические частицы, 2 — минеральные частицы, 3 — аморфные предположительно органоминеральные частицы, 4 – растительные волокна.

Изменения частиц >50 мкм во фракциях копролитов связаны с наличием частиц растительных остатков за счет их потребления дождевыми червями, это подтверждается литературными данными (Schulmann, Tiunov, 1999; Прусак и др, 2008). Фрагменты растительной ткани наблюдаются во всем изученном диапазоне размера частиц. Частицы можно разделить на 3 группы: остатки листовой пластины (отмечено цифрой 1 на рис. 10,12); переплетения жилок и волокон листовой пластины (отмечено цифрой 2 и 4 на рис.10, цифрой 1 на рис.11); минеральные частицы, сцепленные с растительными остатками (отмечено цифрой 3 рис. 13). В составе фракций > 250, 250-50, < 50 по морфологическим признакам диагностированы эти три формы при изменении их соотношений. Для фракции < 50 мкм характерны органические частицы аморфной формы и измельченные части листовой пластины; соотношение минеральных и органических частиц в равных долях.

Электронная микроскопия с микроанализом.

Присутствие биогенного кремнезема в почве хорошо известно (Боброва, 1995; Чижикова,2013; Константинов, 2019; Мехтиев, 2020). Одним из источников его в почве являются фитолиты. В работе (Ge et al., 2020) не рассматривается вид *Acer platanoides* L., но указывается, что для других видов клёна характерно большое содержание фитолитов. На основании проведенной электронной микроскопии можно заключить, что в листьях клёна содержится большое количество окремневающих структур (рис. 14-19). Подтверждая литературные данные (Ремезов и др.,1959; Ремезов, 1962; Воронков и др.,1971).

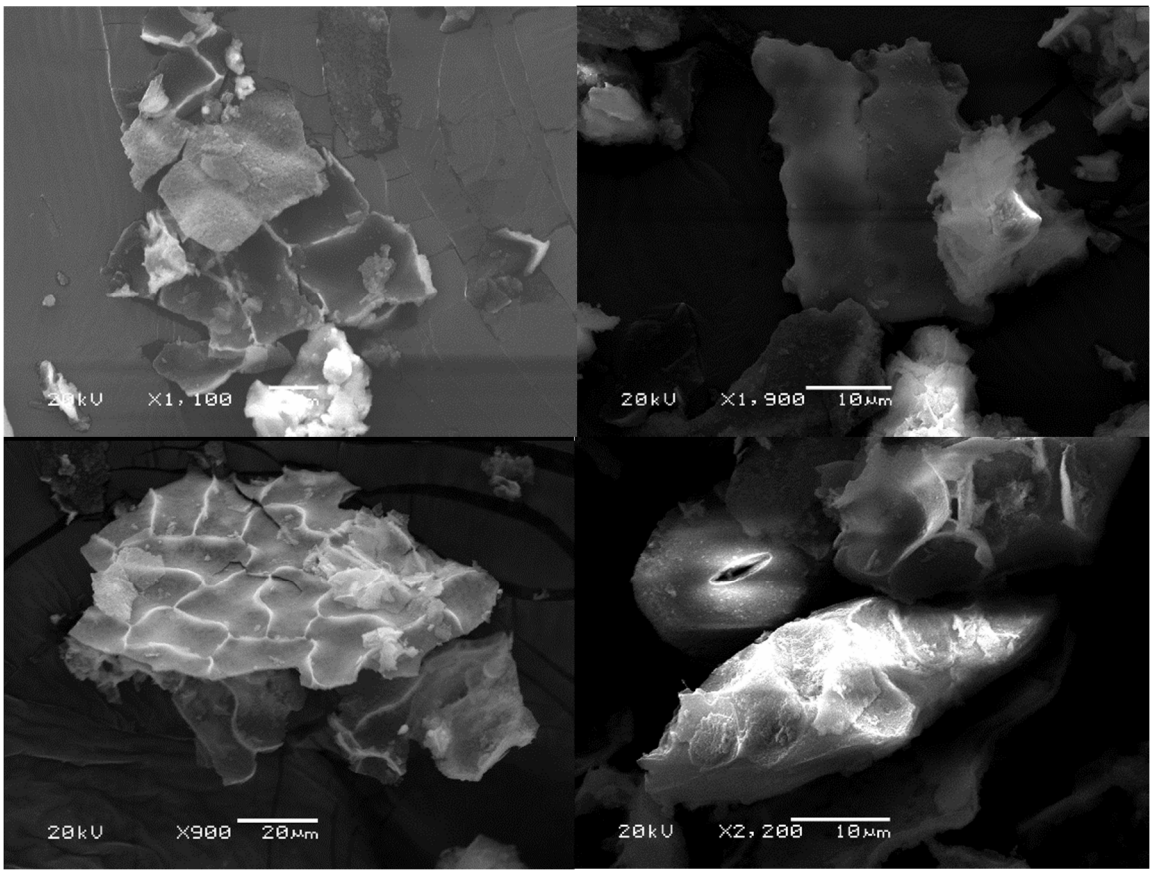


Рисунок 14. Снимок сканирующей электронной микроскопии. Фитолиты (окремневающие клетки) в листьях клёна *A.platanoides* после окисления ОВ.

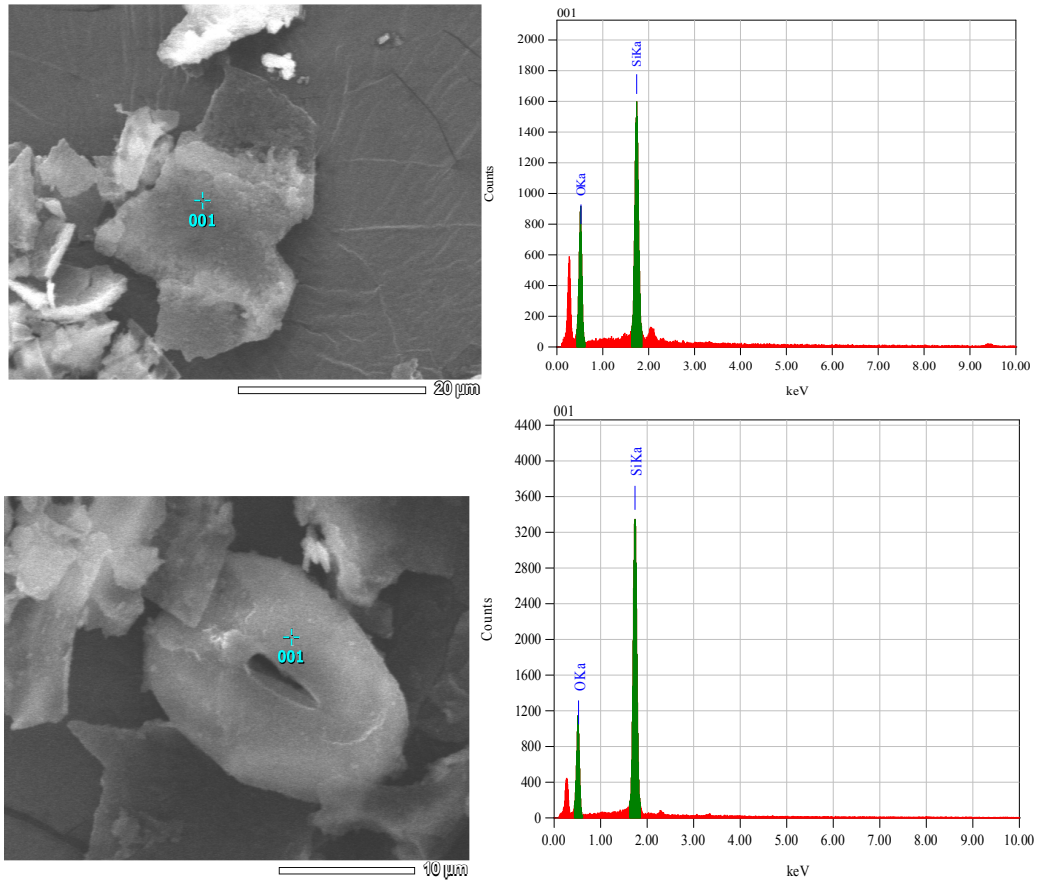


Рисунок 15. Фитолиты (окремневающие клетки) в листьях клёна *A.platanoides* после окисления ОВ. Слева: снимок сканирующей электронной микроскопии; листья клёна после окисления ОВ. Справа: результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) в точке, отмеченной на левом рисунке.

Фитолиты, наблюдаемые в листьях клёна *A.platanoides,* преимущественно относятся к классу фитолитов: окремневающие клетки (рис. 14), трихомы (рис. 16) согласно работам (Ge et al., 2020; Liu et al., 2021). Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС) подтверждают, что фитолиты состоят из аморфного кремния (рис. 15), который в некоторых случаях дополнен другими элементами, часто встречающимися в фитолитах (рис. 17).

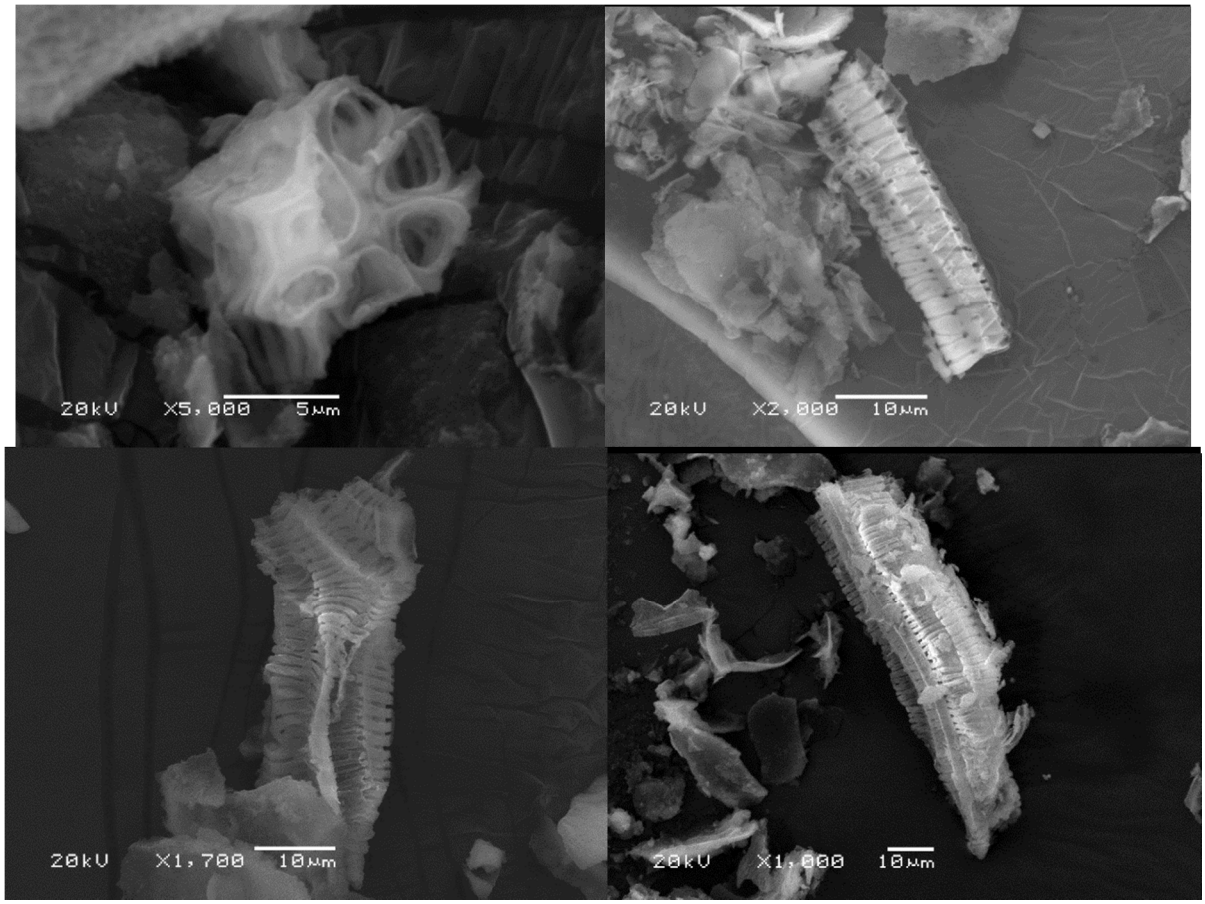


Рисунок 16. Снимок сканирующей электронной микроскопии. Фитолиты (трихомы) в листьях клёна после окисления ОВ.

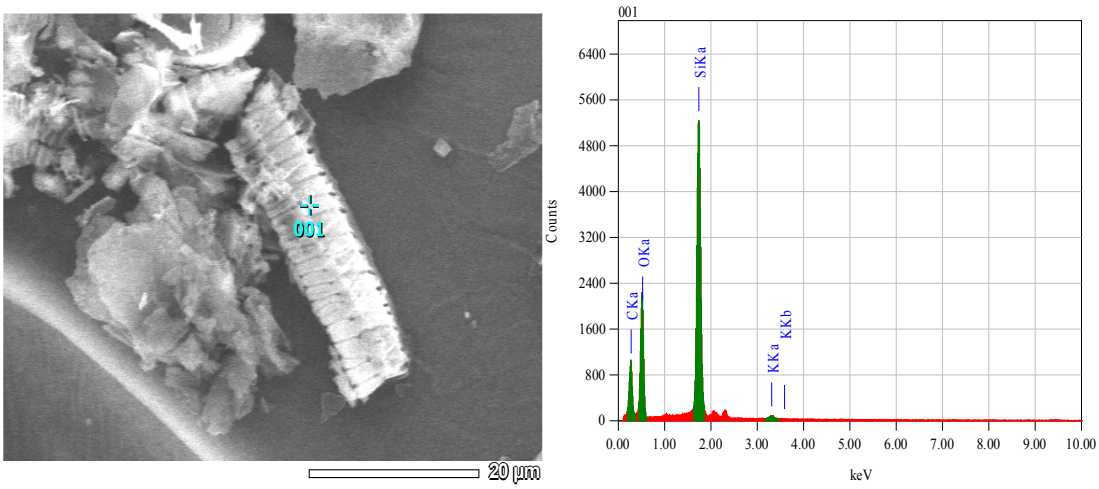


Рисунок 17. Фитолиты (трихомы) в листьях клёна после окисления ОВ. Слева: снимок сканирующей электронной микроскопии сканирующей электронной микроскопии. Справа результаты бесстандартного количественного рентгеновского микроанализа в точке, отмеченной на левом рисунке.

Фитолиты сохраняются при прохождении через кишечник дождевых червей, образуя аморфные скопления в копролитах *L.rubellus* (рис 18) и *A.caliginosa* (рис 19-21). Согласно результатам ЭДС аморфные структуры состоят из оксида кремния (SiO_2) с примесью других оксидов (Al_2O_3, FeO, K_2O, MgO, CaO, ZrO_2, TiO_2).

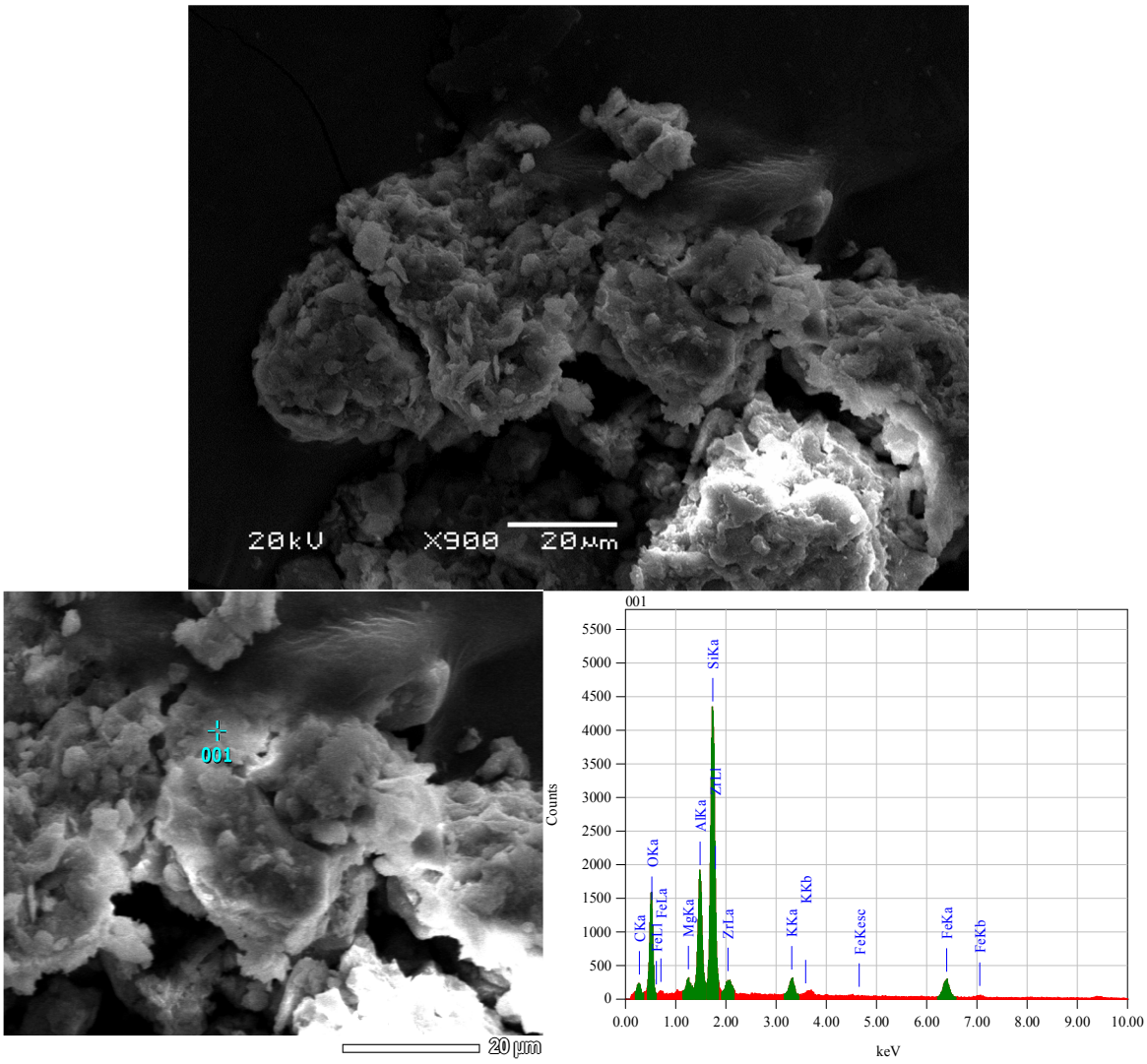


Рисунок 18. Копролиты *L.rubellus* после окисления ОВ фракция >100 мкм. Сверху и слева: снимки сканирующей электронной микроскопии. Справа результаты бесстандартного количественного рентгеновского микроанализа в точке, отмеченной на левом рисунке.

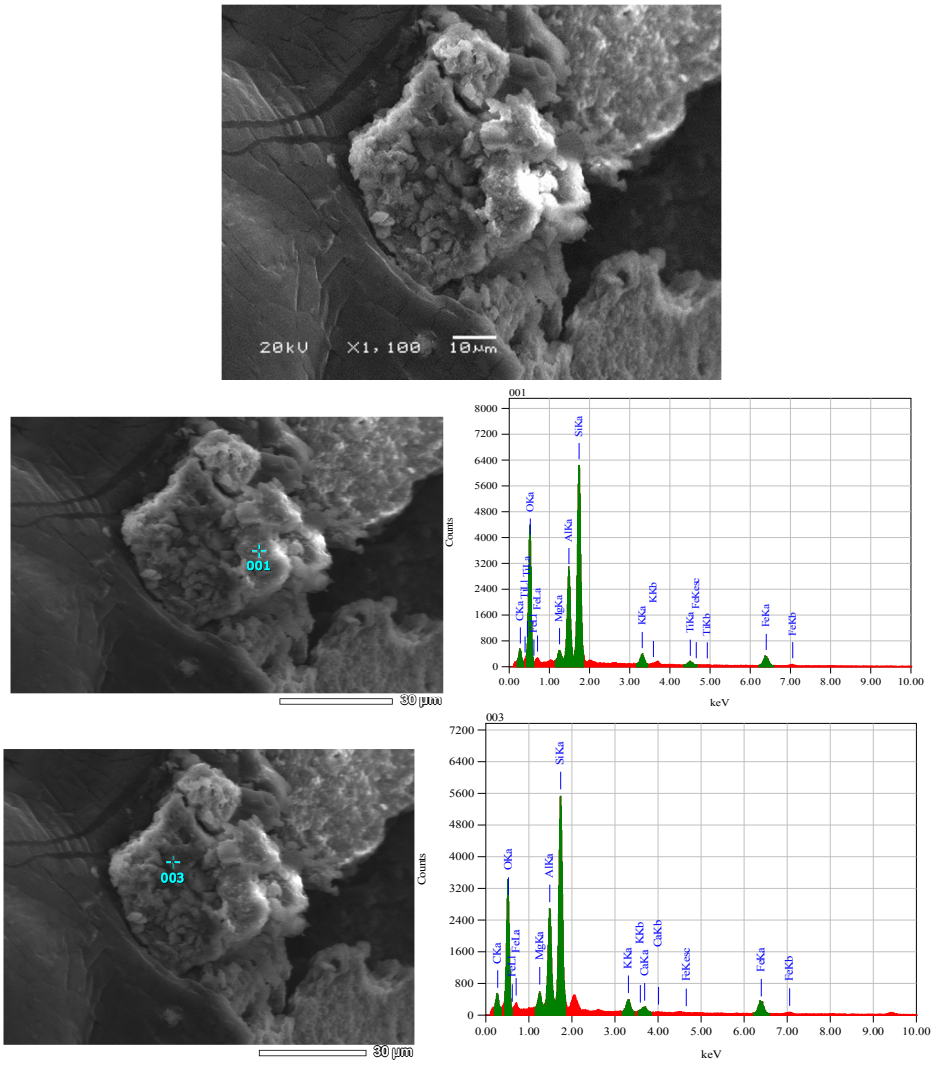


Рисунок 19. Копролиты *A.caliginosa* после окисления ОВ фракция >100 мкм. Сверху и слева: снимки сканирующей электронной микроскопии. Справа результаты бесстандартного количественного рентгеновского микроанализа в точках, отмеченных на левых рисунках.

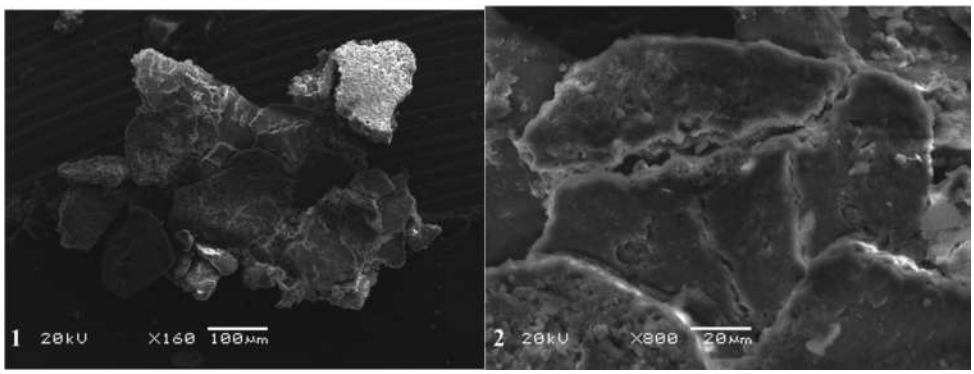


Рисунок 20. Снимки сканирующей электронной микроскопии. Копролиты *A.caliginosa* после окисления ОВ (1 увеличение 160, 2 увеличение 800).

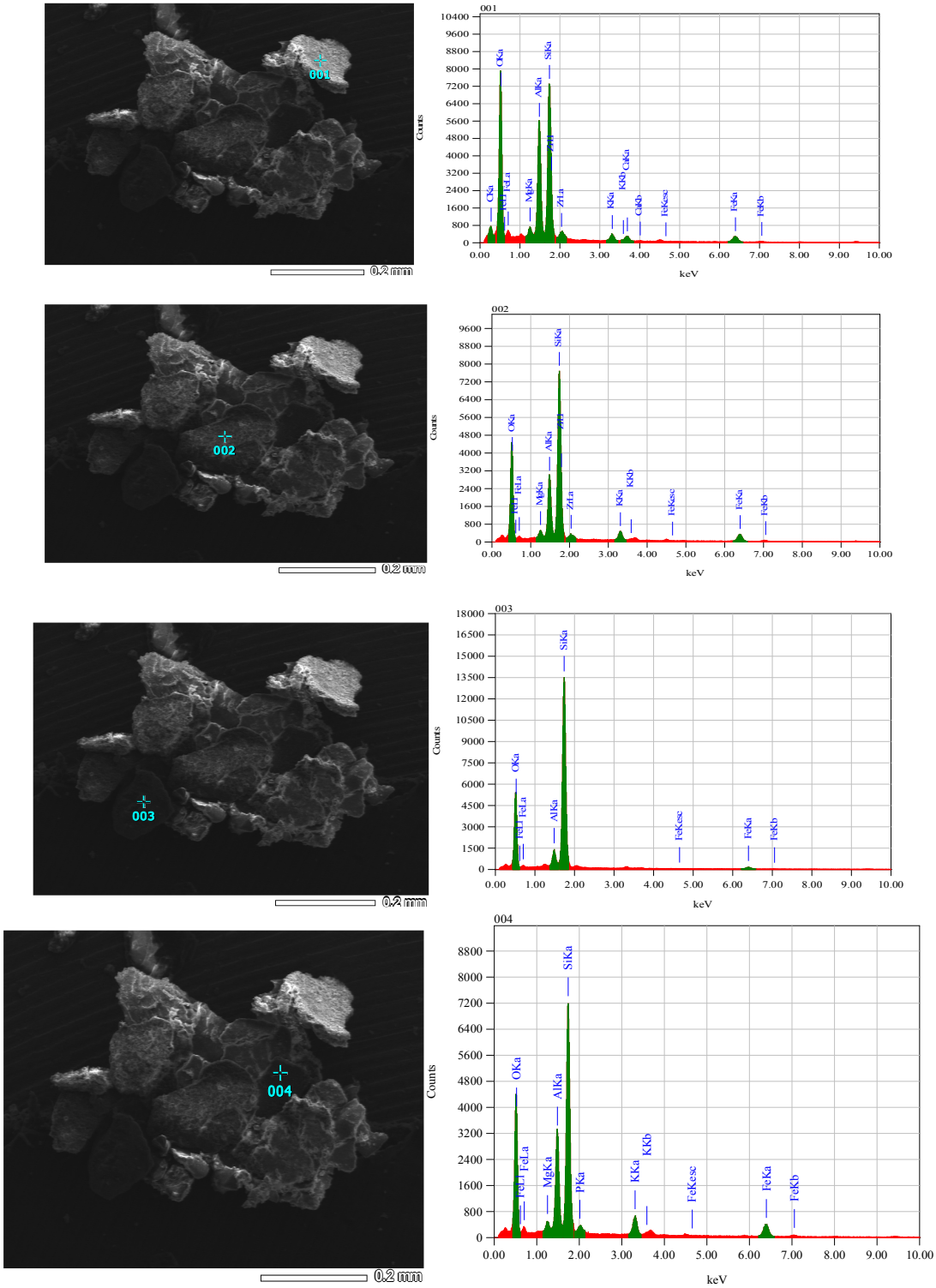


Рисунок 21. Копролиты *A.caliginosa* после окисления ОВ (№1 рис. 20). Слева снимки сканирующей электронной микроскопии. Справа результаты бесстандартного количественного рентгеновского микроанализа в точках, отмеченных на левых рисунках.

Минеральные частицы крупных размеров присутствуют в копролитах обоих видов дождевых червей (рис 22, 23). Согласно результатам ЭДС

минеральные частицы состоят из оксида кремния (SiO_2). Окатанность и общая форма частиц позволяют предположить, что дождевые черви концентрируют в себе крупные частицы и используют их для перетирания растительных остатков. Это согласуется с утверждением в работах по изучению влияния песка на потребление опада дождевыми червями (Schulmann, Tiunov, 1999; Marhana, Scheub, 2005).

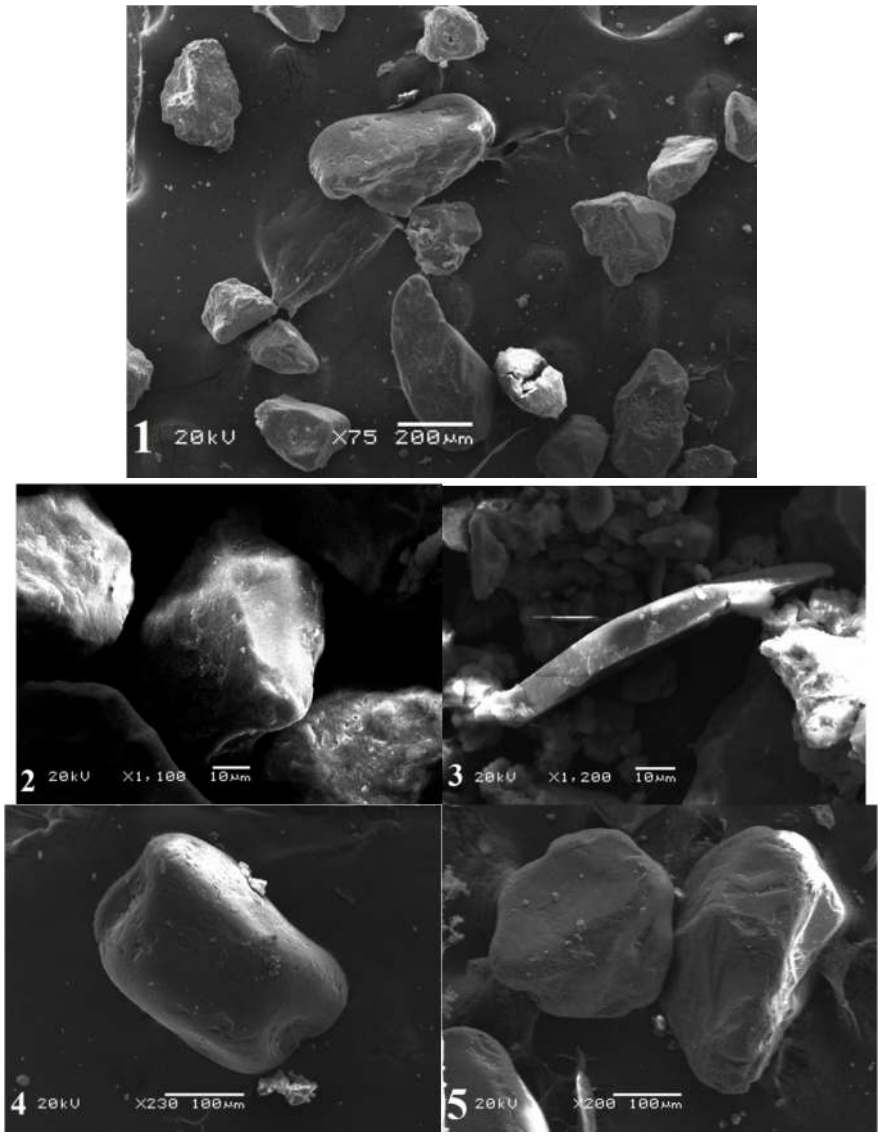


Рисунок 22. Снимки сканирующей электронной микроскопии. Копролиты *A.caliginosa* (№1,4,5) и *L.rubellus* (№2,3) после окисления ОВ.

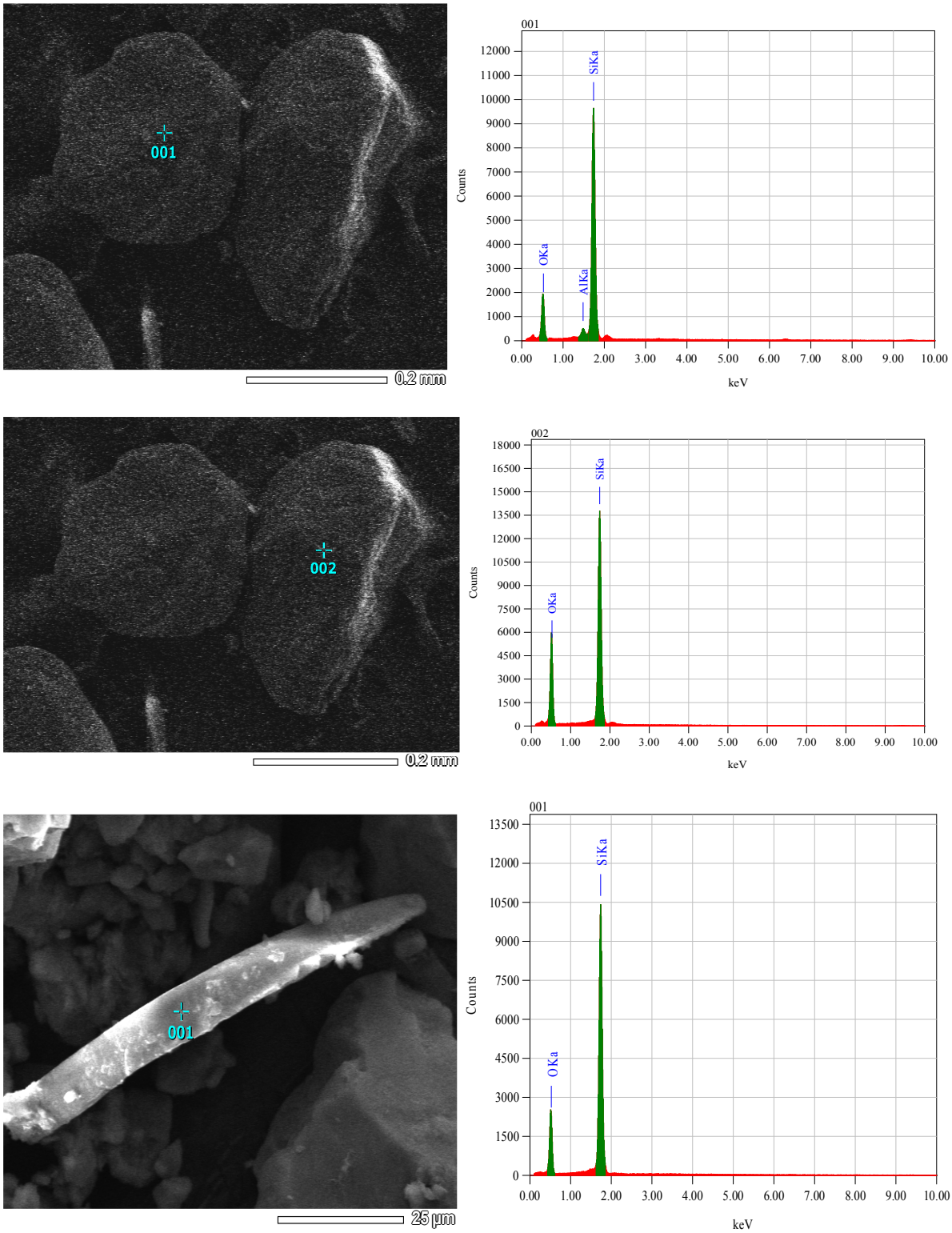


Рисунок 23. Копролиты *A.caliginosa* (1,2) и *L.rubellus* (3) после окисления ОВ (№5 рис. 22). Слева: снимки сканирующей электронной микроскопии. Справа результаты бесстандартного количественного рентгеновского микроанализа в точках, отмеченных на левых рисунках.

Результаты микроскопических исследований показали, что причину наличия частиц > 50 мкм в ГС исходных образцов копролитов обуславливают органические частицы из подстилки, утилизируемой дождевыми червями. Обнаруженные в ГС копролитов после окисления органического вещества ЭПЧ > 100 мкм связаны с наличием окатанных минеральных частиц и биогенного кремнезема (фитолитов), находящихся исходно в составе листьев клена.

3.5 Микроагрегатный состав.

Микроагрегаты в составе почвы и почвы с опадом представлены двумя фракциями с преимущественными диаметрами частиц 15-30 мкм и 100-200 мкм (рис.24). Диаметр частиц первой (15-30 мкм) фракции микроагрегатов сохраняется у всех вариантах почв и копролитов с увеличением доли для копролитов и почвы с червями относительно контроля. Фракция микроагрегатов размером 100-200 мкм характерна только для контрольной почвы и почвы с опадом (рис 24). Медианные значения для фракций (классификация согласно USDA/FAO) представлены на рисунке 25.

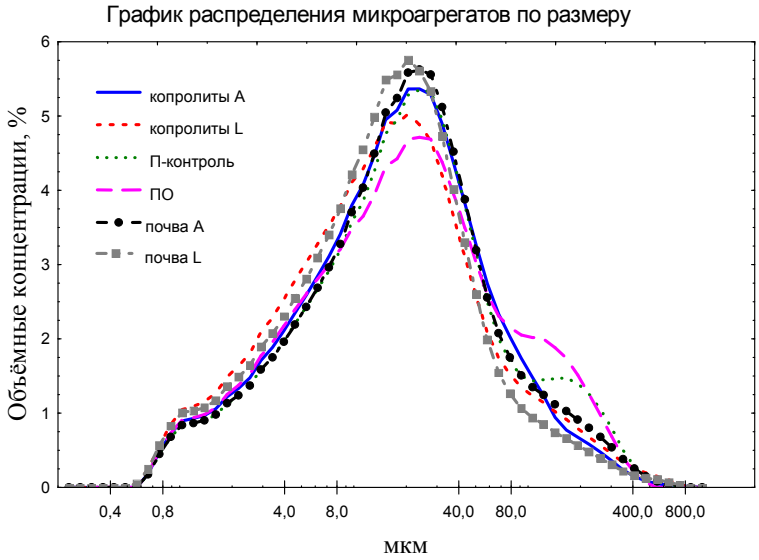


Рисунок 24 График распределения микроагрегатов по размерам.

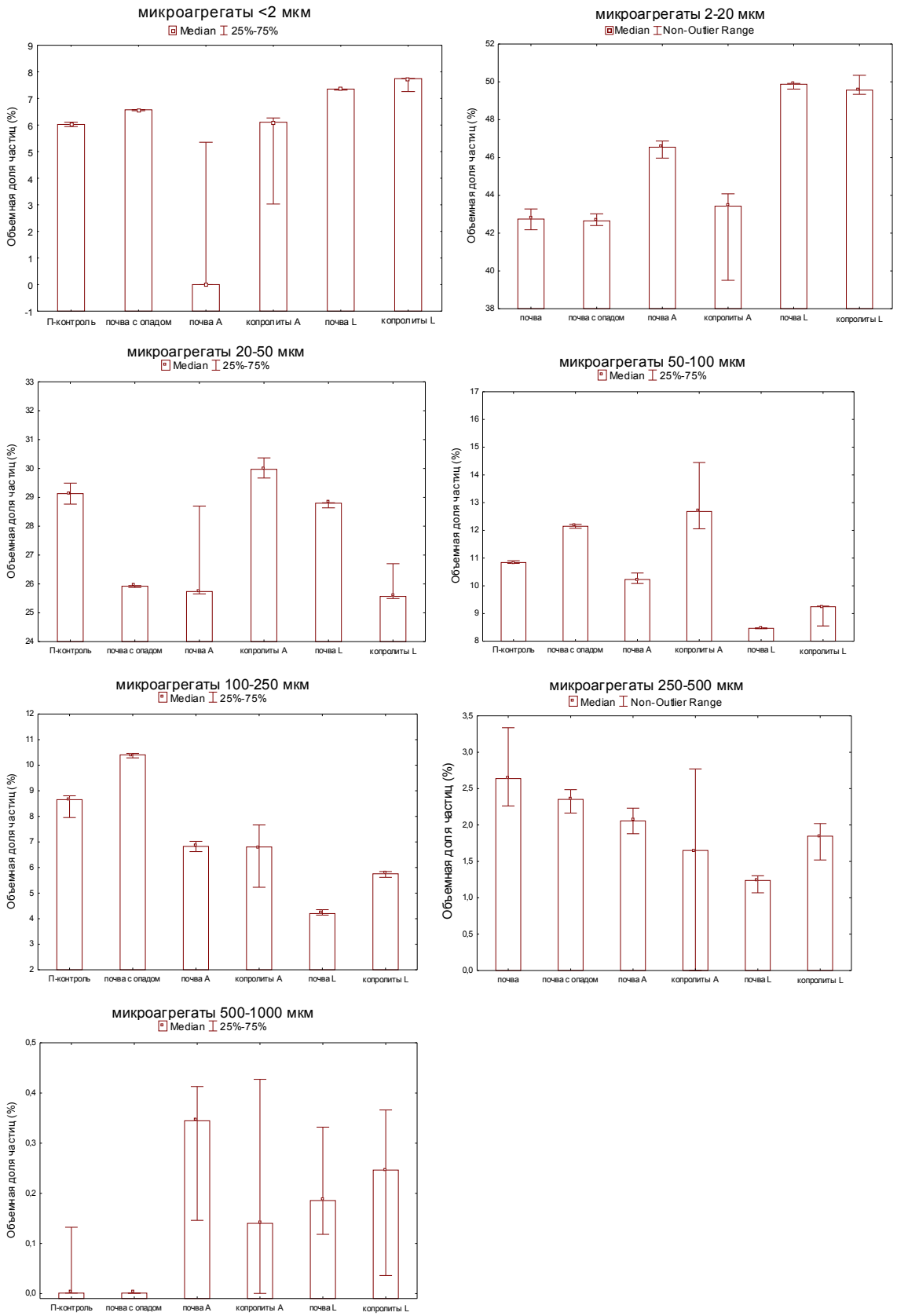


Рисунок 25. График содержания (%) микроагрегатов размером: <2, 2-20, 20-50, 50-100, 100-250, 250-500, 500-1000 мкм. Обозначения как на рис.4.

Данные распределены не нормально (см. приложение). Для детальной оценки проведено сравнение средних значений по U-критерию Манна-Уитни (таблица 5).

Таблица 5 Сравнение средних % содержания микроагрегатов по U-критерию Манна-Уитни, p – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. ПО – почва с опадом; А – копролиты *A. caliginosa*; почва А – почва с *A. caliginosa*, копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Курсивом отмечены достоверные отличия. Подробную таблицу см. в приложение.

		p	**p**	**p**	**p**	**p**
мкм		копролиты L	ПО	почва	почва А	почва L
<2	копролиты А	*0,0001*	*0,002*	0,387	0,165	*0,009*
2-20		*0,0001*	0,114	0,312	*0,003*	*0,009*
20-50		*0,0001*	*0,002*	*0,021*	*0,014*	*0,009*
50-100		*0,0001*	0,206	*0,009*	*0,001*	*0,009*
100-250		0,055	*0,002*	*0,03*	0,959	0,194
250-500		0,67	0,114	*0,043*	0,08	0,194
500-1000		0,523	0,206	0,564	0,181	0,665
		ПО	почва	почва L	почва А	
<2	копролиты L	*0,003*	*0,013*	0,405	*0,0001*	
2-20		*0,003*	*0,013*	0,517	*0,0001*	
20-50		0,317	*0,013*	*0,013*	0,078	
50-100		*0,003*	*0,013*	*0,021*	*0,0001*	
100-250		*0,003*	*0,013*	*0,013*	*0,0001*	
250-500		*0,003*	*0,013*	*0,013*	*0,002*	
500-1000		*0,014*	0,165	0,926	0,147	

Продолжение таблицы 5.

мкм		**P** почва L	**p** почва	**p** ПО
<2	почва A	*0,008*	0,131	0,064
2-20		*0,008*	0,131	0,064
20-50		0,166	0,131	0,643
50-100		*0,008*	0,131	0,064
100-250		*0,008*	*0,008*	*0,001*
250-500		*0,008*	*0,023*	*0,026*
500-1000		0,378	*0,023*	*0,001*
		Почва	ПО	
<2	почва L	*0,049*	*0,025*	
2-20		*0,049*	*0,025*	
20-50		0,275	*0,025*	
50-100		*0,049*	*0,025*	
100-250		*0,049*	*0,025*	
250-500		*0,049*	*0,025*	
500-1000		0,127	*0,025*	
		ПО		
<2	почва	*0,025*		
2-20		0,655		
20-50		*0,025*		
50-100		*0,025*		
100-250		*0,025*		
250-500		0,18		
500-1000		0,297		

Ряд работ (Карпачевский, 1983; Манаенков и др., 1997; Guhra et al., 2021; Józefowska et al., 2021) свидетельствует о том, что существенная доля агрегатов в почве имеют копролитное происхождение, однако согласно полученным данным в нашем случае микроагрегаты почвы существенно отличаются от микроагрегатов копролитов дождевых червей. В работе (Knowles et al., 2016) отмечается увеличение макроагрегатов (>2 мм) на 67% по сравнению с контролем. В данном эксперименте наблюдается уменьшение микроагрегатов,

обратная ситуация; при прохождении через кишечник дождевых червей увеличивается доля меньших фракций относительно больших. При этом изменения затрагивают практически весь диапазон (неизменной относительно контроля остается в копролитах фракция 500-1000мкм). Для *L.rubellus* происходит увеличение во фракциях >2; 2-20 мкм и уменьшение во фракциях 20-50; 50-100; 100-250; 250-500 мкм. Для *A.caliginosa* происходит увеличение во фракциях 20-50; 50-100 мкм и уменьшение во фракциях 100-250; 250-500 мкм.

3.6 Определение удельной поверхности

Удельная поверхность в копролитах отличается от контроля (рис. 26), но копролиты характеризуются большим разбросом значений

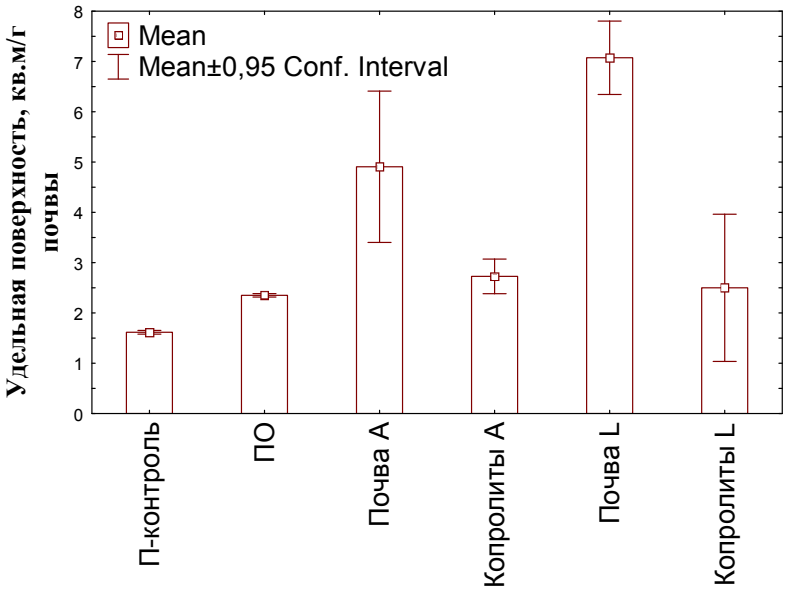


Рисунок 26. Удельная поверхность. Обозначения как на рис.4.

Для детальной оценки следует провести сравнение средних (таблица 6). Выборка не позволяет однозначно судить о нормальности распределения (см. приложение), тем не менее, результаты параметрической и не параметрической статистики дают одинаковые результаты. Использовано сравнение средних по t-критерию.

Таблица 6. Результаты сравнения средних по t-критерию для удельной поверхности. Для объектов: ПО – почва с опадом; А – копролиты *A. caliginosa*; почва А – почва с *A. caliginosa*, копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Ср.знач. - среднее значение выборки; p – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Подробную таблицу см. в приложении.

Ср.знач.	Ср. знач.	p	Ср. знач.	p	Ср. знач.	p	Ср. знач.	p	Ср. зна.	p
копролиты А	копролиты L		почва		ПО		почва L		почва А	
2,7	2,3	0,58	*1,6*	*0,0002*	*2,3*	*0,009*	*7,1*	*0*	*4,9*	*0,039*
копролиты L	почва		ПО		почва А		почва L			
2,3	1,6	0,297	2,3	0,996	*4,9*	*0,005*	*7,1*	*0*		
почва А	почва L		почва		почва с опадом					
4,9	*7,1*	*0,008*	*1,6*	*0,006*	*2,3*	*0,02*				
почва L	почва		ПО							
7,1	*1,6*	*0*	*2,3*	*0*						
почва	ПО									
1,6	*2,3*	*0*								
**Курсивом отмечены достоверные отличия.*										

Удельная поверхность (УП) увеличивается в ряду: исходная почва (1,6 $м^2/г$) < исходная почва с опадом (2,3 $м^2/г$); копролиты *L.rubellus* (2,3 $м^2/г$) < копролиты *A.caliginosa* (2,7 $м^2/г$) <почва *A.caliginosa* (4,9 $м^2/г$) < почва *L.rubellus* (7 $м^2/г$) (рис. 26, таблица 6).

В копролитах увеличивается количество органических частиц разного размера (на это указывает эксперименты с изотопом углерода $\delta^{13}C$, а также увеличение %Сорг). В литературе отмечается, что с ростом $C_{орг}$ площадь удельной поверхности по N_2 обычно снижается (Feller et al., 1992; Kaiser, 2003; Bartoli et al., 2007; Zhu et al., 2013). В нашем случае этого не происходит. Причиной этого может быть то, что в копролитах появляются органоминеральные комплексы (это отмечается для фракции тяжелее 1,8 в работе (Vidal et al., 2019)), а также фитолиты из листьев клёна (Ge et al., 2020). Увеличение удельной поверхности в почве, где жили дождевые черви возможно из-за избирательного поглощения и концентрации новых

минеральных частиц в копролитах (на это указывают данные ГС анализа, результаты электронной микроскопии).

3.7 Краевой угол смачивания

Визуальная оценка показывает, что значения КУС копролитов отличаются (рис. 27). Наличие опада не приводит к увеличению краевого угла смачивания (таблица 7). Подробная таблица представлена в приложении. Данные распределены нормально, проверка на нормальность проводилась по критерию Колмогорова-Смирнова и критерию Лилиефорса. Результаты проверки представлены в приложении.

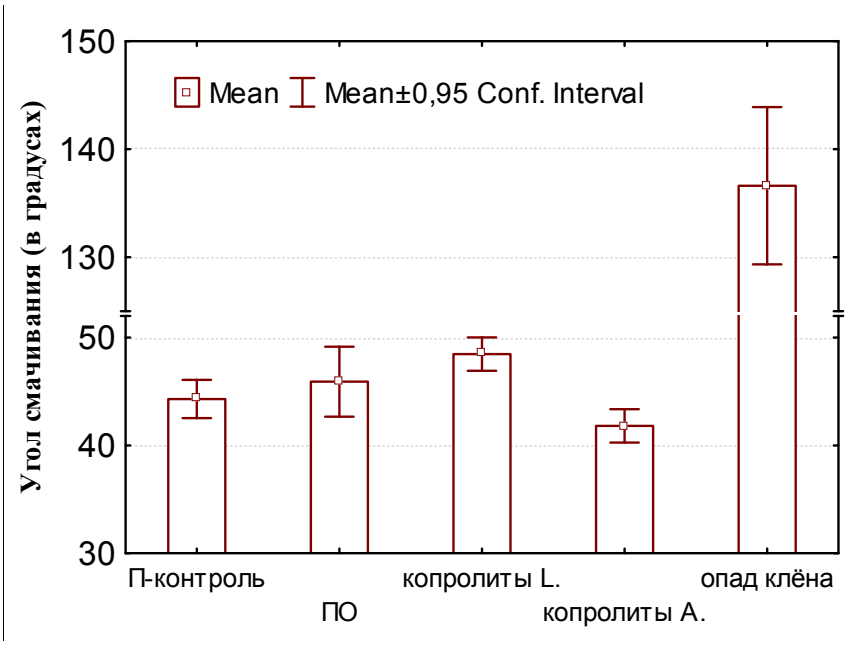


Рисунок 27. Краевой угол смачивания поверхности твердой фазы. Обозначения как на рис.4.

Смачиваемость водой поверхности твердой фазы (ТФ) возрастает в ряду: опад клёна 138±3 << копролиты *A.caliginosa* 42±1°; исходная почва 44°±1° < исходная почва с опадом 46°±2°; копролиты *L.rubellus* 48°±1°.

Таблица 7. Результаты сравнения средних по t-критерию для краевого угла смачивания (в градусах). Для объектов: ПО – почва с опадом; копролиты А – копролиты *A. caliginosa*; почва А – почва с *A. caliginosa*, копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Ср.знач. - среднее значение выборки; p – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Курсивом отмечены достоверные отличия. Подробную таблицу см. в приложение.

Ср.знач.	Ср.знач.	p	Ср.знач.	p	Ср.знач.	p
Копролиты А.	Почва		Почва с опадом		Копролиты L.	
41,8	44	0,087	*46*	*0,013*	*48*	*0*
Копролиты L.	Почва		Почва с опадом			
48,5	*44*	*0,001*	46	0,107		
Почва	Почва с опадом					
44,3	46	0,377				

Исходный опад листьев клёна обладает гидрофобной поверхностью (КУС 138±3°), а КУС исходной почвы 44°±1. Небольшое снижение смачиваемости ТФ почвы с опадом может обуславливать сорбция водорастворимых органических соединений, поступающих в почву из подстилки. При этом, по сравнению с вариантами «почва» и «почвой с опадом», смачиваемость ТФ копролитов *Lumbricus rubellus* снижается, а *Aporrectodea caliginosa* увеличивается. Это указывает на то, что для копролитов отличия в смачиваемости определяются количеством потребления опада и степенью преобразования органических остатков при прохождении через кишечник разных видов дождевых червей. За счет дополнительного ОВ, присутствующего в копролитах изменяются свойства краевого угла смачивания ТФ почв в целом. Подобный эффект, вызван разными экологическими стратегиями у дождевых червей. Копролиты подстилочного дождевого червя (*L.rubellus*) имеют самый высокий КУС (48±1°) близкий с КУС у почвы с опадом (46°±2°). Подстилочный червь поглощает больше растительных остатков с поверхности почвы и хуже их переваривает. В кишечнике *L.rubellus* много «свежего» ОВ. Из ОВ утилизируются преимущественно наиболее доступные органические соединения с полярными

группам (гидрофильные). Накапливаются и сорбируются на твердой фазе гидрофобные соединения, происходит гидрофобизация поверхности частиц. Это подтверждает схожесть угла смачиваемости у почвы с опадом и копролитов L. Почвенный червь в меньшей степени питается опадом и в значительной части поглощает ПОВ уже находящуюся в толще почвы. Это в свою очередь привело к увеличению гидрофильности в копролитах A. Степень потребления червями опада в копролитах видоспецифична, что подтверждается данными гранулометрического анализа до и после окисления ОВ, а также содержанием Сорг. и его изотопов. Именно с этим связанна, отмеченная в литературе (Shipitalo, Protz, 1988; Marinissen, Dexter, 1990; Hindell et al., 1997, Decaëns et al. 2000; Юшкова и др., 2006; Jouquet et al., 2008, Симохина-Прусак, 2009; Gao et al., 2010; Столбовая, Старикова, 2014; Осадчий, 2017; Le Mer et al., 2021), вариабельность значений КУС для разных видов дождевых червей, в том числе при «старении» копролитов.

3.8 Реологические характеристики

Визуальная оценка показывает (рис. 28), что объекты по всем параметрам имеют схожие величины. Ввиду малого объема выборки критерии оценки нормальности не применимы, сделано допущение, что отклонения значений подчиняются нормальному распределению.

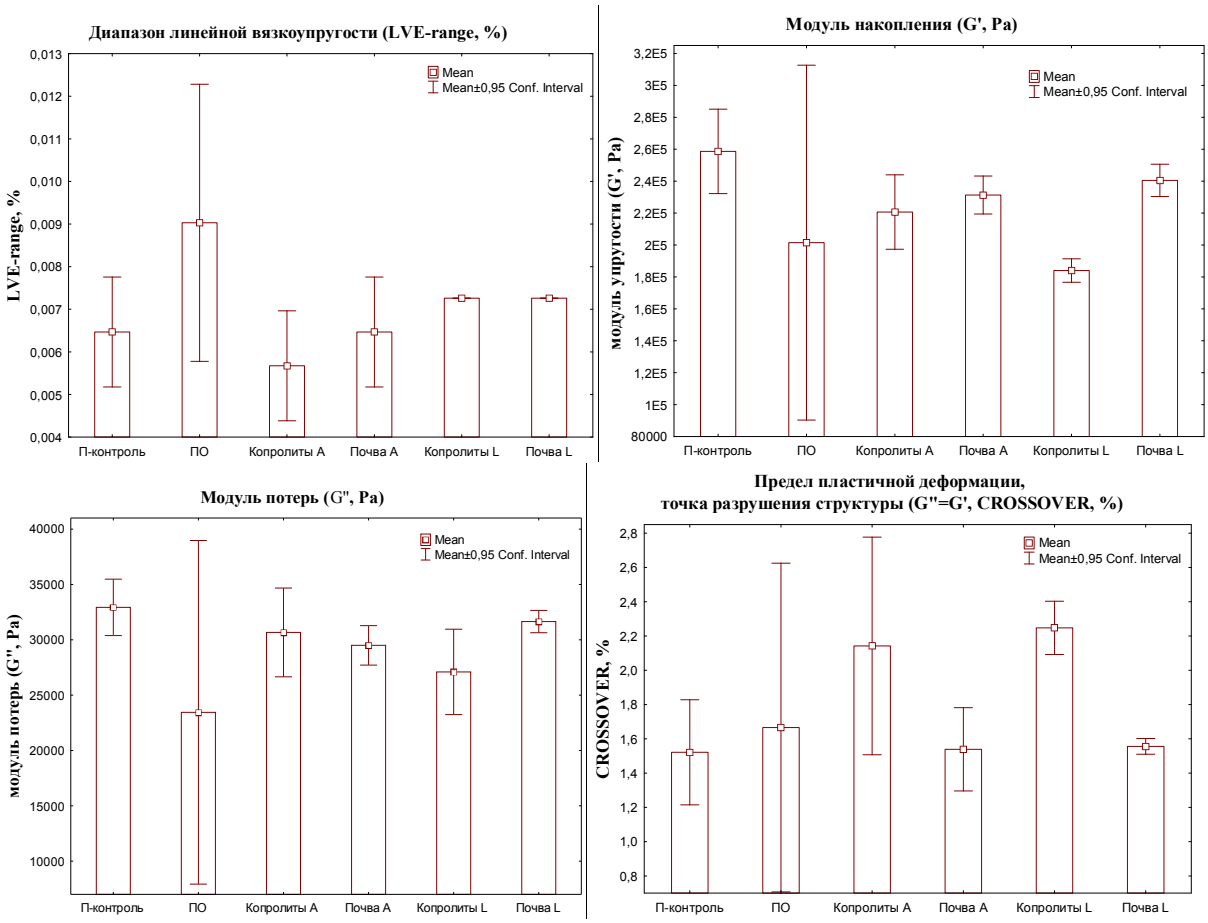


Рисунок 28. Реологические параметры диапазон линейной вязкоупругости (LVE–range, %); модуль накопления (G', Pa); модуль потерь (G", Pa); предел пластичной деформации, точка разрушения структуры (G′=G″, CROSSOVER, %). Обозначения как на рис.4.

Сравнению по U-критерию Манна-Уитни не возможно, т.к. не соблюдается ограничение метода (отсутствие в сравниваемых группах совпадающих значений признака). Для детальной оценки проведено сравнение средних по t-критерию для всех параметров (таблица 8).

Таблица 8. Результаты сравнения средних по t-критерию для реологических параметров: *– диапазон линейной вязкоупругости (LVE–range, %), **– модуль накопления (G', Pa) ***– модуль потерь (G", Pa), **** – предел пластичной деформации, точка разрушения структуры (G′=G″, CROSSOVER, %). Для объектов: ПО – почва с опадом; копр. А – копролиты *A.caliginosa*; почва А – почва с *A.caliginosa*, копр. L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* p-level – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Курсивом отмечены достоверные отличия.

Объекты	Среднее значение ± ст. ошибка среднего	Копр. *L*	Почва L	Копр. А	Почва А	ПО
		p-level				
Почва	*$6{,}5\cdot10^{-3}\pm0{,}4\cdot10^{-3}$	0,242	0,242	0,290	1,000	*0,037*
	**$2{,}5\cdot10^{5}\pm0{,}08\cdot10^{5}$	*0,000*	0,203	*0,020*	*0,036*	0,097
	***$3{,}3\cdot10^{4}\pm0{,}08\cdot10^{4}$	*0,006*	0,340	0,248	*0,018*	*0,047*
	****1,52±0,09	*0,002*	0,824	*0,047*	0,912	0,621
ПО	*$9{,}03\cdot10^{-3}\pm2\cdot10^{-3}$	0,134	0,134	*0,011*	*0,037*	
	**$2\cdot10^{5}\pm0{,}2\cdot10^{5}$	0,635	0,309	0,539	0,321	
	***$2{,}3\cdot10^{4}\pm0{,}3\cdot10^{4}$	0,495	0,145	0,133	0,164	
	****1,7±0,2	0,105	0,728	0,257	0,646	
Почва с *A.*	*$6{,}5\cdot10^{-3}\pm0{,}4\cdot10^{-3}$	0,242	0,242	0,290		
	**$2{,}3\cdot10^{5}\pm0{,}04\cdot10^{5}$	*0,000*	0,184	0,319		
	***$2{,}95\cdot10^{4}\pm0{,}05\cdot10^{4}$	0,100	*0,044*	0,510		
	****1,5±0,075	*0,000*	0,890	*0,046*		
Копролиты А	*$5{,}7\cdot10^{-3}\pm0{,}4\cdot10^{-3}$	*0,035*	*0,035*			
	**$2{,}2\cdot10^{5}\pm0{,}07\cdot10^{5}$	*0,013*	0,126			
	***$3{,}1\cdot10^{4}\pm0{,}12\cdot10^{4}$	0,139	0,630			
	****2,1±0,195	0,743	0,094			
Почва с *L*	*$7{,}2\cdot10^{-3}\pm0{,}0$	*0,000*				
	**$2{,}4\cdot10^{5}\pm0{,}21\cdot10^{5}$	*0,000*				
	***$3{,}2\cdot10^{4}\pm0{,}02\cdot10^{4}$	*0,011*				
	****1,6±0,009	*0,000*				
Копролиты *L*	*$7{,}2\cdot10^{-3}\pm0{,}0$					
	**$1{,}8\cdot10^{5}\pm0{,}15\cdot10^{5}$					
	***$2{,}7\cdot10^{4}\pm0{,}08\cdot10^{4}$					
	****2,2±0,03					

Наличие опада (по сравнению с вариантом исходная почва) оказывает влияние на изменение модуля накопления [Pa] (с $2{,}5\pm0{,}1\cdot10^{5}$ до $2\pm0{,}2\cdot10^{5}$) и предела пластичной деформации [%] (с 1,5±0,1 до 1,7±0,2). По сравнению с

контрольной почвой в копролитах *L.rubellus* увеличивается LVE–range [%] (с $6,5\pm0,4\cdot10^{-3}$ до $7,2\pm0,0\cdot10^{-3}$) и уменьшаются LVE–range в копролитах *A.caliginosa* (с $6,5\pm0,4\cdot10^{-3}$ до $5,7\pm0,4\cdot10^{-3}$) и модуль потерь [Pa] (с $3,3\pm0,1\cdot10^{4}$ до $3,1\pm0,1\cdot10^{4}$). От почвы с опадом отличаются копролиты L по LVE–range (с $9,0\pm2\cdot10^{-3}$ до $7,2\pm0,0\cdot10^{-3}$), по модулю накопления (с $2,0\pm0,2\cdot10^{5}$ до $1,8\pm0,1\cdot10^{5}$) , по модуль потерь (с $2,3\pm0,3\cdot10^{4}$ до $2,7\pm0,1\cdot10^{4}$) и пределу пластичной деформации (с 1,7±0,2 до 2,2±0,0). От почвы с опадом отличаются копролиты A по модулю накопления (с $2,0\pm0,2\cdot10^{5}$ до $2,2\pm0,1\cdot10^{5}$), по модуль потерь (с $2,3\pm0,3\cdot10^{4}$ до $3,1\pm0,1\cdot10^{4}$) и пределу пластичной деформации (с 1,7±0,2 до 2,1±0,2). Между собой копролиты L и A отличаются по модулю потерь (*A.caliginosa (*$3,1\pm0,1\cdot10^{4}$*)* и *L.rubellus (*$2,7\pm0,1\cdot10^{4}$); пределу пластичной деформации (*A.caliginosa (*2,1±0,2*)* и *L.rubellus (*2,2±0,0)). Почва с L не отличается от копролитов L. Почва A отличается от копролитов A по LVE–range (почва A ($6,5\pm0,4\cdot10^{-3}$) и *A.caliginosa (*$5,7\pm0,4\cdot10^{-3}$*)*), по модулю накопления (почва A ($2,3\pm0,1\cdot10^{5}$) и *A.caliginosa (*$2,2\pm0,1\cdot10^{5}$*)*), по модуль потерь (почва A ($2,9\pm0,1\cdot10^{4}$) и *A.caliginosa (*$3,1\pm0,1\cdot10^{4}$*)*).

Копролиты характеризуются большим значением предела пластичной деформации и меньшими значениями модуля накопления. Значение модуля накопления (G', Pa) в диапазоне линейной вязкоупругости при малых амплитудах характеризует жесткость межчастичных связей в образце (Клюева, 2019). При прохождении через кишечник дождевого червя в почве уменьшается жесткость межчастичных связей, что приводит к уменьшению модуля накопления в копролитах. Увеличение предела пластичной деформации свидетельствует о том, что общая устойчивость к деформации у копролитов выше, в то время как почвенные образцы более хрупкие. Одним из ключевых факторов, влияющих на увеличение предела пластичной деформации, является органическое вещество почвы (Клюева, 2019). Это согласуется с полученными данными о том, что в копролитах существенно увеличивается доля органического вещества.

3.9 Численность бактерий

3.9.1 Определение чашечным методом Коха

Абсолютные значения численности, определенные этим методом в первом и втором эксперименте, отличаются на полтора порядка. Это вызвано тем, что в первом случае образцы были отобраны после увлажнения почвы дистиллированной водой в течение 2 часов, а во втором эксперименте отбор был проведен через 2 суток. Несмотря на то, что влажность почвы в обоих случаях была одинаковой, в первом случае произошла активация бактерий. Тем не менее, относительные значения численности микроорганизмов в разных объектах удалось оценить. По первому эксперименту дана оценка численности бактерий в 3 вариантах мезокосмов (рис.29). Анализ представлен медианой и квартилями. Во всех вариантах наблюдается тенденция к увеличению численности микроорганизмов в копролитах и почве, где жили черви. Содержание червей двух видов совместно приводит к активизации микробного сообщества в большей степени, чем присутствие дождевых червей по отдельности.

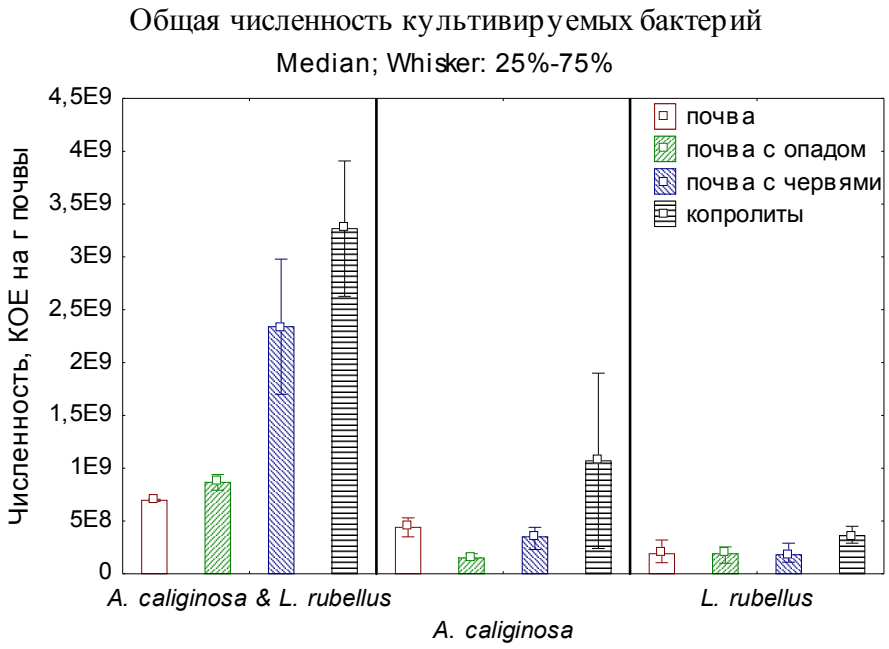


Рисунок 29. Численность микроорганизмов чашечным методом Коха для эксперимента №1

Для эксперимента №2 воспроизводятся аналогичные зависимости (рис.30). Наблюдается тенденция к увеличению численности микроорганизмов в копролитах *A.caliginosa* и почве, где он обитал относительно копролитов и почвы, где содержались *L.rubellus*.

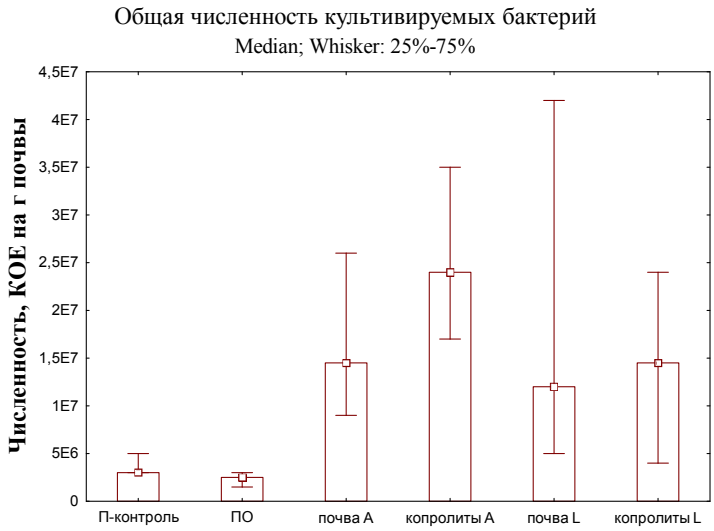


Рисунок 30. Численность микроорганизмов чашечным методом Коха для эксперимента №2. Обозначения как на рис.4.

3.9.2 Определение численности с помощью прямой люминесцентной микроскопии

Для второго эксперимента из той же суспензии были отобраны пробы для проведения люминесцентной микроскопии. Данные распределены отлично от нормального распределения см. приложение. Для копролитов *L.rubellus* численность выше, чем для других объектов (рис.31). Это вызвано в первую очередь тем, что в копролитах присутствовали кластеры – большие скопления клеток, – связанные с растительными волокнами. В результате внутри и по краям растительных волокон наблюдались скопления до 50 клеток на одно поле зрения. Подобных объектов для копролитов *A. caliginosa*, почвы или почвы с опадом обнаружено не было.

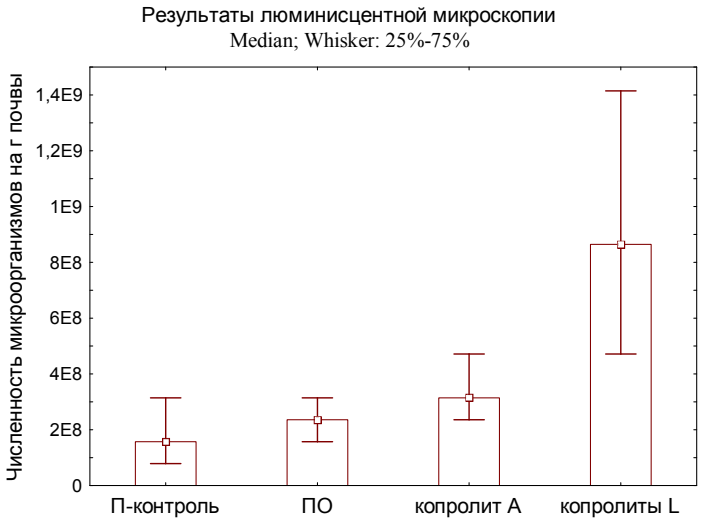


Рисунок 31. Численность микробных клеток методом люминесцентной микроскопии для эксперимента №2. Обозначения как на рис.4.

Для сравнения средних значений проведено с помощью U-критерия Манна-Уитни (таблица 9). Почва и почва с опадом по численности микроорганизмов не различаются. Копролиты имеют численность выше, чем почва и почва с опадом. При этом для копролитов *L.rubellus* численность выше, чем для копролитов *A. caliginosa*.

Таблица 9. Сравнение средних значений численности микроорганизмов по результатам прямой люминесцентной микроскопии по U-критерию Манна-Уитни. Z – значение переменной нормального распределения (нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни); U – рассчитанный критерий Манна-Уитни; p-level 1 – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Курсивом отмечены достоверные отличия. Подробную таблицу см. в приложении.

Объект сравнения 1	Объект сравнения 2	U	Z	p-level 1
почва	почва с опадом	2391,0	-1,949	0,051
почва	копролиты А	*1688,0*	*-5,209*	*0,000*
почва	копролиты L	*253,5*	*-8,388*	*0,000*
почва с опадом	копролиты А	*2306,0*	*-3,451*	*0,001*
почва с опадом	копролиты L	*357,5*	*-8,017*	*0,000*
копролиты А	копролиты L	*677,0*	*-6,947*	*0,000*

В наших экспериментах оценка микробного сообщества была проведена на его прокариотной составляющей. Предпосылкой для этого служат результаты показывающие, что в присутствии дождевых червей в микробном сообществе преобладают бактерии (Frouz et al., 2014). Необходимо отметить, что при оценке влияния червей в основном оценивается почва, в которой живут черви и сравнивается с контролем (почвой без червей). Однако, данный подход не позволяет ясно оценить, за счет чего происходят изменения в тех или иных свойствах. В частности, не всегда ясно, произошло ли изменение за счет появления растительных остатков на поверхности и их преобразованием микроорганизмами, или же отличия вызваны именно деятельностью почвенных животных. Также при оценке всей почвы, где жили черви, неизбежно произойдет усреднение результата, в то время как наиболее активные процессы и изменения происходят именно в копролитах. Именно они являются «hot points» для микроорганизмов (Medina-Sauza et al. 2019). В работе (Angst et al., 2019) утверждается, что добавление слизи дождевых червей к почве ускоряет разложение органического вещества. Следует отметить, что указанное ускорение во многом вызвано увеличением удельной поверхности органических частиц за счет измельчения растительных остатков, а не только добавлением органического углерода (слизи). В основном микроорганизмы находятся в почве в адгезированном состоянии (Звягинцев и др., 2005). Увеличение доступной для адгезии поверхности будет приводить к увеличению численности микроорганизмов, а, следовательно, и к увеличению общей скорости процессов (согласно уравнению скорости для гетерогенных реакций), которые они осуществляют. Микроорганизмам необходима большая удельная поверхность для эффективной работы и именно её обеспечивают дождевые черви, измельчая растительные остатки. Также следует отметить, что, согласно нашему исследованию, виды (*Lumbricus rubellus, Aporrectodea caliginosa*) преобразуют и измельчают растительные остатки не одинаково, что приводит к разному содержанию органических частиц во фракциях почвы.

В работе (Hedĕnec et al., 2020) приводится похожий эксперимент с *Lumbricus rubellus,* где указывается, что наибольшая численность микроорганизмов, а также их высокая активность сосредоточена в drilosphere. К сожалению, исследователи не выделяли отдельно группу копролитов, а включили их в «drilosphere». Тем не менее, полученные ими результаты согласуются с нашим предположением, что наибольший вклад в почву, где живут черви, следует рассматривать именно в копролитах. Общее же увеличение по сравнению с контролем следует соотнести с увеличением доли органических частиц в копролитах.

Оценка методом посева показывает, что копролиты при содержании вместе двух видов дают большую численность бактерий, чем копролиты при содержании двух видов раздельно. Численность в копролитах примерно одинаковая с небольшим увеличением в копролитах *L.rubellus.* Уменьшение численности бактерий происходит в ряду: копролиты> почва, где жили черви> исходная почва; исходная почва с опадом. Оценка методом прямой люминесцентной микроскопии показывает, что уменьшение численности происходит в ряду: копролиты *L.rubellus* ($1*10^9$)> копролиты *A.caliginosa* ($3,4*10^8$)> исходная почва ($1,9*10^8$); исходная почва с опадом ($2,3*10^8$). Увеличение численности бактерий согласуется с литературными данными (Daane et al., 1996; Schmidt et al., 1997; Бызов, 2005), где указывается возрастание численности микроорганизмов в копролитах, от 2-х кратного роста до увеличения на порядок.

3.10 Ферментативная активность

3.10.1 Дегидрогеназная активность

Все объекты характеризовались низкой дегидрогеназной активностью и большой степенью разброса. Данные для каждого мезокосма представлены на рис. (32).

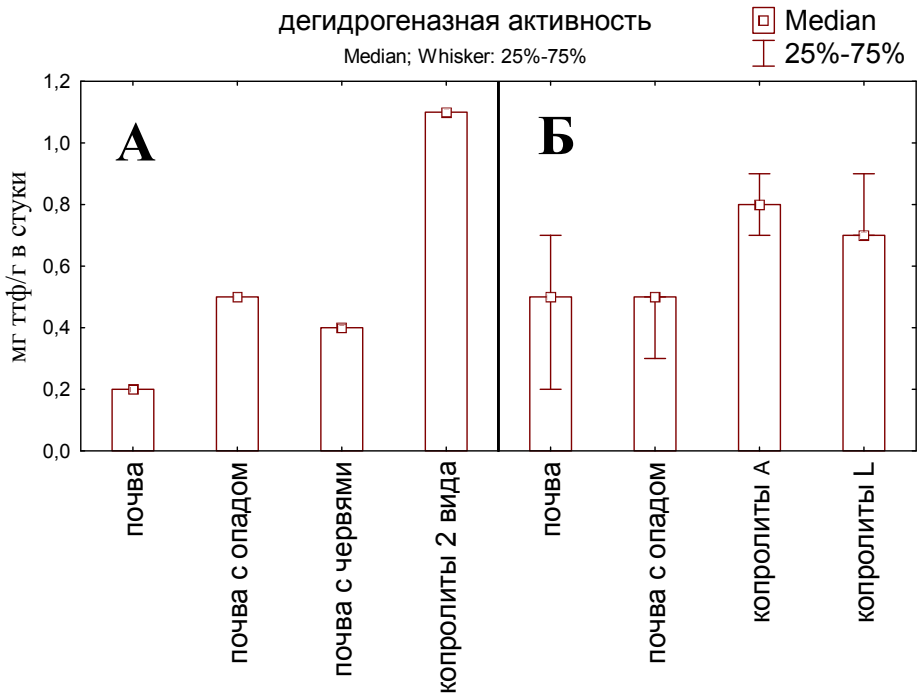


Рисунок 32. Дегидрогеназная активность, А – данные эксперимента №1 этапа I, Б – для эксперимента по содержанию дождевых червей совместно (данные эксперимента №1 этапа II и данные эксперимента №2).

В общем и целом, наблюдается увеличение дегидрогеназной активности в копролитах. Многочисленные работы (Tiwari et al., 1989; Олейник, Бызов, 2008; Kızılkaya, 2008; Бызов и др., 2015;) подтверждают эту закономерность. При содержании двух видов раздельно объекты разделяются на две группы: (копролиты *A.caliginosa* (0,08[мг тфф/г в стуки]); копролиты *L.rubellus* (0,076[мг тфф/г в стуки])) <(исходная почва (0,046[мг тфф/г в стуки]); исходная почва с опадом (0,043[мг тфф/г в стуки])). Копролиты, при содержании вместе двух видов червей (1,1[мг тфф/г в стуки]), обладают большей дегидрогеназной активностью, чем копролиты при содержании двух видов раздельно (копролиты *A.caliginosa* (0,08[мг тфф/г в стуки]); копролиты *L.rubellus* (0,076[мг тфф/г в стуки])). Это согласуется с литературными данными. Так в статье (Suthar, 2008) отмечается усиление дегидрогеназной активности, при содержании вместе подстилочных червей (*Eisenia fetida* (Savigny)) и норников (*Lampito mauritii* (Kinberg)). Отсутствие отличий между копролитами скорее всего вызвано тем, что несмотря на различие в составе микробного сообщества

(т.к. дегидрогеназная активность не специфичный маркер для каких-то отдельных групп микроорганизмов), эффект активизации происходит примерно одинаково для различных копролитов. Наблюдается чуть большая активизация в копролитах при содержании двух видов червей вместе.

3.10.2 Эстеразная активность

Максимальная скорость реакции (*V*m) показывает, что копролиты при содержании вместе двух видов дают большие значения параметра, чем копролиты при содержании двух видов раздельно (рис. 33). Уменьшение максимальной скорости реакции происходит в ряду: копролиты *A. caliginosa*> исходная почва; исходная почва с опадом> копролиты *L.rubellus*; почва, где жили *L.rubellus*> почва, где жили *A. caliginosa*).

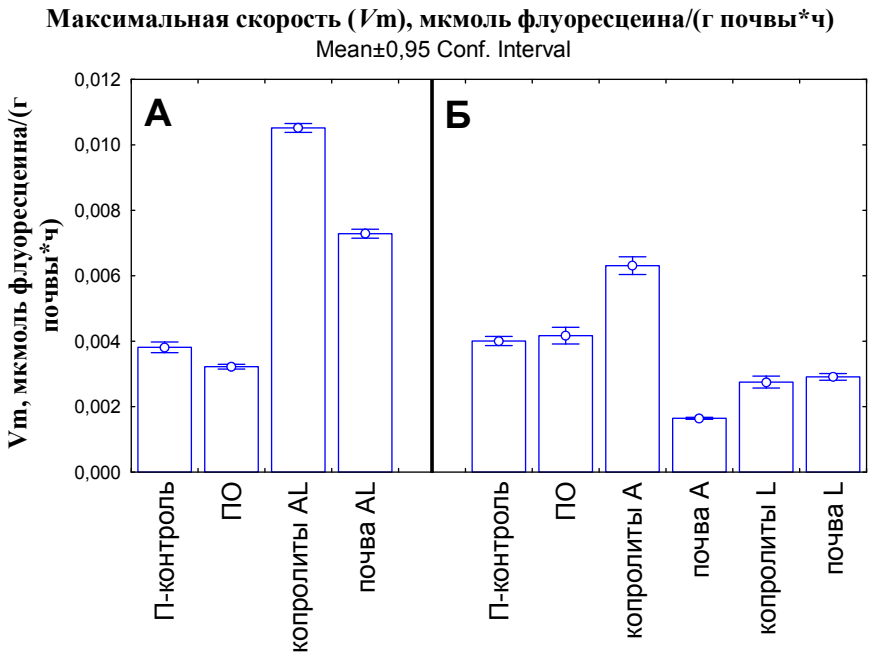


Рисунок 33. Значения максимальной скорости реакции (*V*m). Обозначения как на рис.4.

Константа Михаэлиса (*K*m) ниже для копролитов при содержании вместе двух видов (рис. 34). Уменьшение константы происходит в ряду: копролиты *L.rubellus*> почва, где жили *L.rubellus*> копролиты *A. caliginosa*> исходная почва с опадом> исходная почва> почва, где жили *A. caliginosa*. Сродство к субстрату ниже в копролитах дождевых червей относительно контроля, что означает меньшую начальную скорость ферментативной реакции.

Максимально возможная скорость реакции для копролитов *A.caliginosa* выше относительно контроля, а для копролитов *L.rubellus* - ниже.

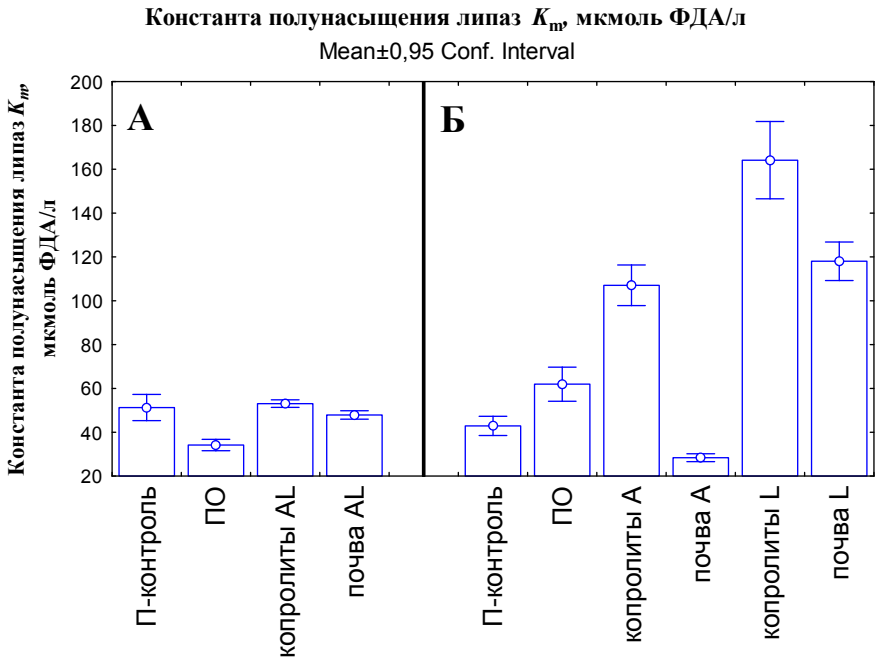


Рисунок 34. Значения константы Михаэлиса (*K*m). Обозначения как на рис.4.

3.11 Параметры кривых роста

Полученные в ходе эксперимента кривые роста представлены в приложении 20. Следует отметить, что максимальная удельная скорость роста, метаболическая готовность к росту и линейная скорость роста определяются не достоверно. Параметр обилие ассоциаций микроорганизмов проанализирован для двух экспериментов. Исключены из анализа данные, полученные на хитине, т.к. мутность раствора не позволяет корректно расчитать параметр в одном из повторов. Три субстрата разделяют копролиты и контроль по параметру обилия ассоциаций микроорганизмов. Кератин (копролиты *A.caliginosa* ($1{,}5\cdot10^9$)> исходной почвы ($1{,}3\cdot10^8$)), пектин (копролиты *L.rubellus* ($1{,}4\cdot10^9$)> исходной почвы с опадом ($7{,}2\cdot10^8$); почва, где жили *L.rubellus* ($2{,}4\cdot10^9$)> исходной почвы с опадом ($7{,}2\cdot10^8$); исходная почва ($1{,}4\cdot10^9$) <исходной почвы с опадом; ($7{,}2\cdot10^8$)) и нуклеиновая кислота (копролиты *L.rubellus* ($8{,}8\cdot10^8$)> исходной почвы с опадом ($6{,}7\cdot10^8$)) (рис. 35; рис. 36).

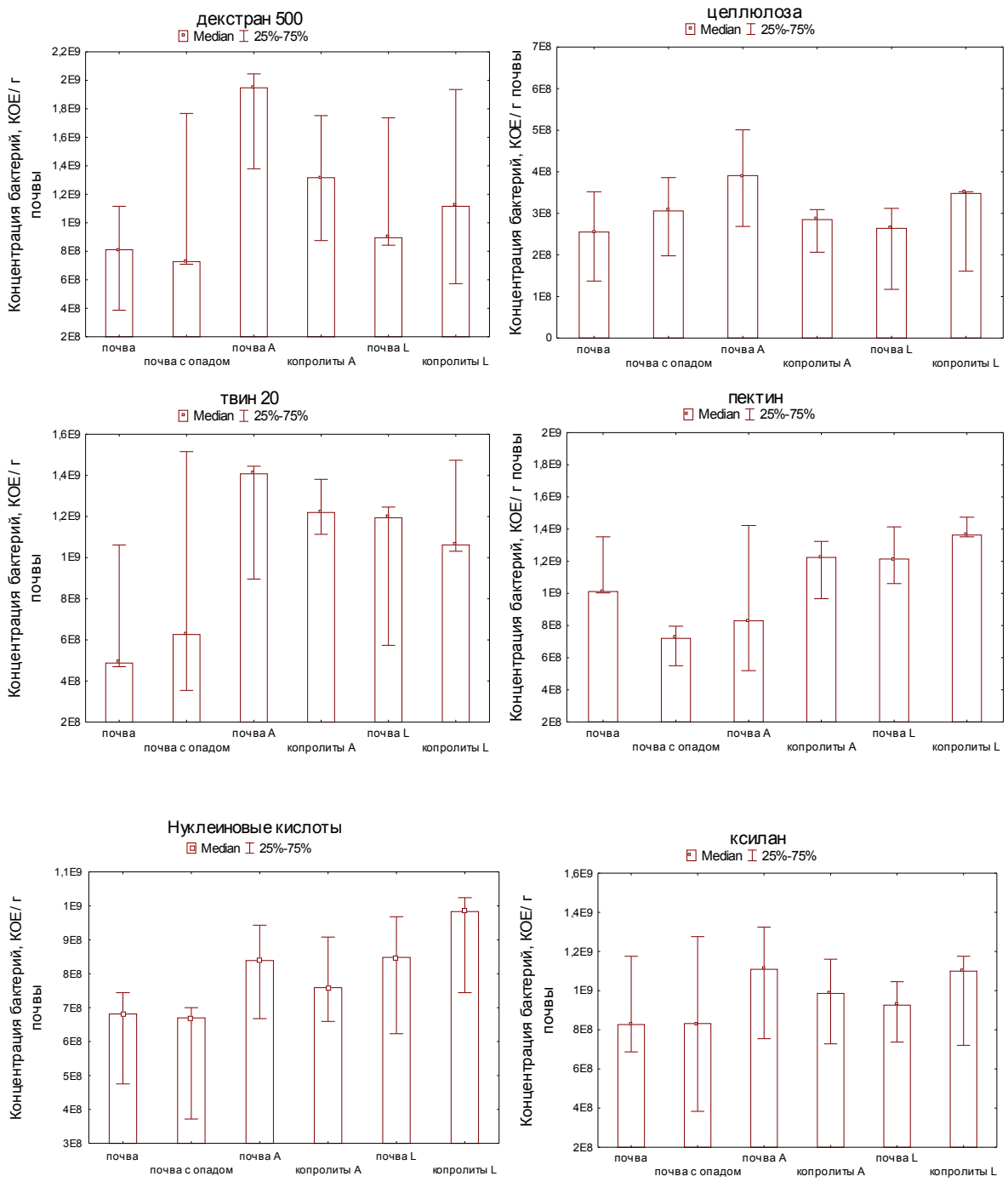


Рисунок 35. Параметр обилия ассоциаций микроорганизмов (микробный экономический коэффициент) проанализирован для двух экспериментов на субстратах: декстран 500, целлюлоза, твин 20, пектин,нуклеиновая кислота, ксилан. Почва –исходная почва; ПО – почва с кленовым опадом; А – копролиты *A. caliginosa*; почва А – почва с *A. caliginosa*; копролиты L – копролиты *L.rubellus*; почва L – почва с *L.rubellus.* Графики Box&Whisker, значения представлены в виде средних с 95% доверительным интервалом.

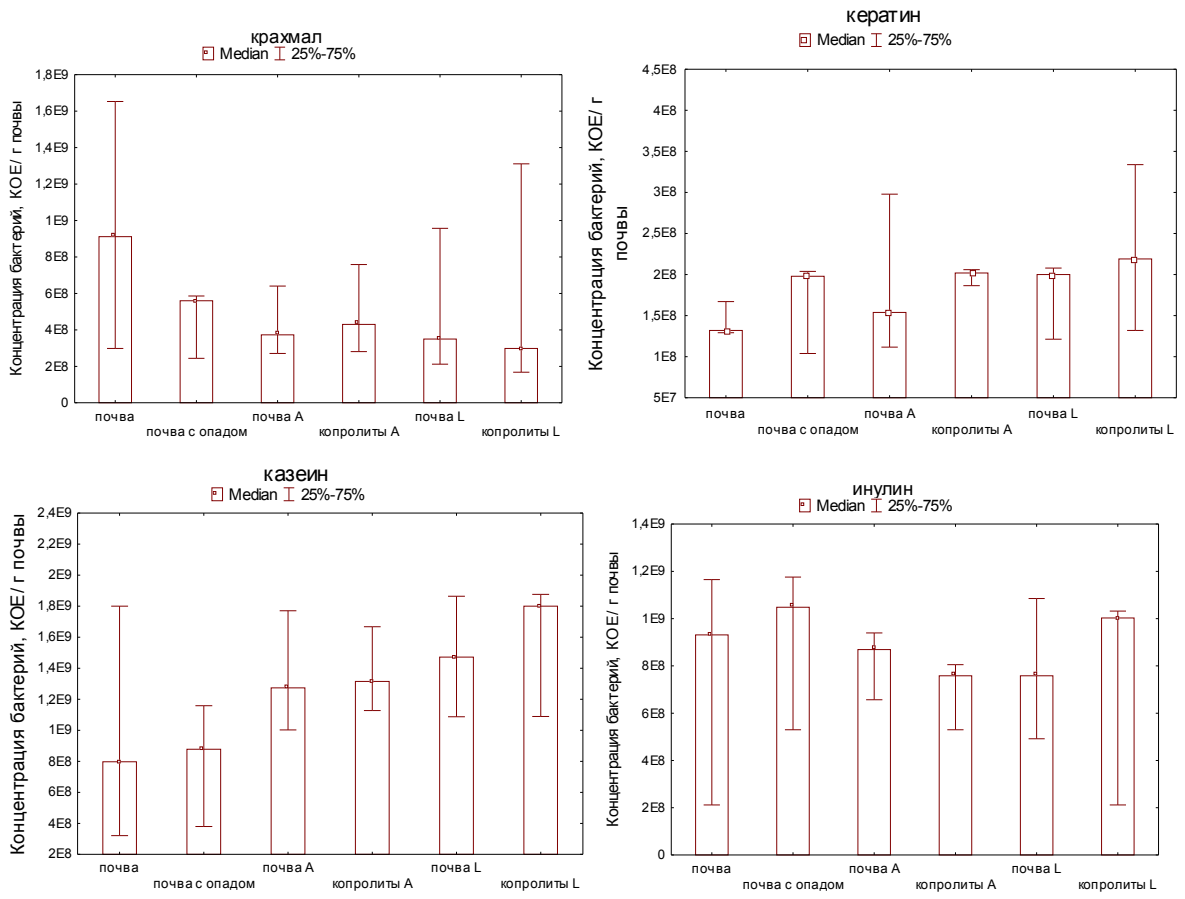


Рисунок 36. Параметр обилия ассоциаций микроорганизмов (микробный экономический коэффициент) проанализирован для двух экспериментов на субстратах: крахмал, кератин, казеин, инулин. Обозначения как на рис.35.

Сравнение средних по U-критерию Манна-Уитни для субстратов (таблица 10) достоверно отличается для почвы и почвы с опадом (пектин), копролитов A и почвы (кератин), копролиты L и почву с опадом (пектин, нуклеиновая кислота), почву L и почву с опадом (пектин). Для копролитов *A.caliginosa* численность микроорганизмов возрастает на кератине с $1{,}3*10^8$ до $1{,}5*10^9$ КОЕ/г. Для копролитов *L.rubellus* численность микроорганизмов возрастает на пектине с $7{,}2*10^8$ до $1{,}4*10^9$ КОЕ/г.

Таблица 10. Сравнение средних значений численности микробных ассоциаций по U-критериб Манна-Уитни. Z – значение переменной нормального распределения (нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни); U – рассчитанный критерий Манна-Уитни; p-level 1 – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются. Курсивом отмечены достоверные отличия. Подробную таблицу см. в приложении.

копролиты A - почва			
	U	Z	p-level
декстран 500	2	1,414	0,157
инулин	3	-0,655	0,513
казеин	3	1,061	0,289
кератин	*0*	*2,121*	*0,034*
крахмал	4	-0,707	0,480
ксилан	5	0,354	0,724
НК	4	0,707	0,480
пектин	5	0,354	0,724
твин 20	1	1,768	0,077
целлюлоза	5	0,354	0,724
почва с опадом – почва			
декстран 500	4	0,218	0,827
инулин	3	0,655	0,513
казеин	4	0,218	0,827
кератин	3	0,655	0,513
крахмал	2	-1,091	0,275
ксилан	4	0,218	0,827
НК	3	-0,655	0,513
пектин	*0*	*-1,964*	*0,050*
твин 20	4	0,218	0,827
целлюлоза	3	0,655	0,513

копролиты L - почва с опадом			
	U	Z	p-level
декстран 500	4	0,218	0,827
инулин	2	-1,091	0,275
казеин	1	1,528	0,127
кератин	2	1,091	0,275
крахмал	4	-0,218	0,827
ксилан	4	0,218	0,827
НК	*0*	*1,964*	*0,050*
пектин	*0*	*1,964*	*0,050*
твин 20	3	0,655	0,513
целлюлоза	4	-0,218	0,827
почва L – почва с опадом			
декстран 500	3	0,655	0,513
инулин	3	-0,655	0,513
казеин	1	1,528	0,127
кератин	3	0,655	0,513
крахмал	4	-0,218	0,827
ксилан	4	0,218	0,827
НК	2	1,091	0,275
пектин	*0*	*1,964*	*0,050*
твин 20	4	0,218	0,827
целлюлоза	3	-0,655	0,513

Для полноценного анализа необходимо комплексное сравнение по всем субстратам (рис. 37). Различия в объектах незначительные. По второй компоненте выделяется почва с опадом, частично выделяется почва, где жили *A. caliginosa*, но в остальном, объекты перекрываются. Более 50% дисперсии для параметра кривых роста объясняется различием в первом и втором экспериментах (рис. 38). Вероятно, это связано с разной начальной численностью микроорганизмов, их готовностью к росту, а также другими внешними и внутренними неучтенными

факторами. В связи с этим расчет выбранного параметра по кривым роста нужно проводить для каждого измерения в отдельности и сравнивать получающиеся тенденции, а не абсолютные значения.

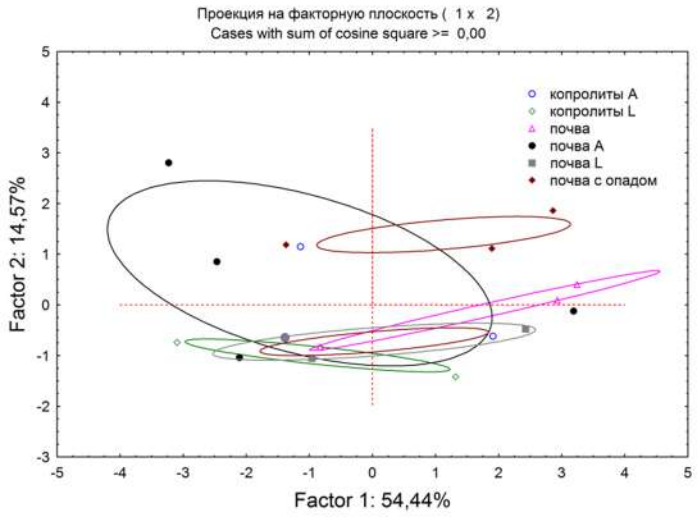


Рисунок 37. МГК, проекция на факторную плоскость (1 и 2). Разделение по объектам.

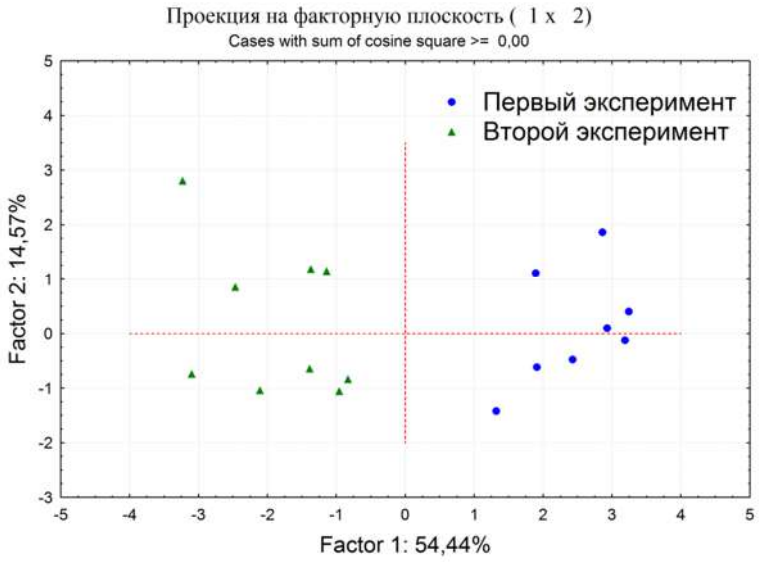


Рисунок 38. МГК, проекция на факторную плоскость (1 и 2). Разделение по экспериментам.

3.12 Определение ключевых факторов для разделения объектов методами многомерной статистики

3.12.1 Дисперсионный анализ (ANOVA)

На основании полученной таблицы проведен дисперсионный анализ (ANOVA). Результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11. Дисперсионный анализ (ANOVA). Многомерный тест значимости, основанный на 47 измеренных параметрах для эффектов: наличие опада, наличие дождевых червей, разделение копролитов разных видов дождевых червей, наличие опада и разделение видов дождевых червей. Уровень значимости (p), различия между средними значениями выборки (F). Сигма-ограниченная параметризация. Курсивом отмечены достоверные отличия.

фактор	p	F
присутствие червей	0,392591	3,5293
наличие опада	0,616305	1,1926
вид червей	*0,001195*	*836,6*
объекты	*0,027589*	*9,944*

Наличие на поверхности почвы опада не играет ключевой роли для объяснения различия параметров в изученных объектах. Отличия обусловлены видами червей. Также возможно разделение всех объектов (исходная почва; исходная почва с опадом; копролиты). Подробная таблица с каждым измеренным параметром представлена в приложении.

По результатам дисперсионного анализа можно заключить, что наибольший вклад в дисперсию вносят копролиты разных видов дождевых червей. Это указывает на то, что наибольшие изменения при преобразовании опада на поверхности почвы происходят в присутствии дождевых червей. В рамках данной работы виды дождевых червей брали из разных эколого-физиологических групп (вид из подстилочных дождевых червей и вид из почвенно-подстилочных дождевых червей). Возможно, что при выборе видов дождевых червей из одной группы различия будут менее выраженными.

Разделение почвы с опадом и исходной почвы возможно в координатах выбранных параметров физических, микробиологических и химических свойст объектов. Однако данное разделение хуже, т.к. почва и почва с опадом разделяются меньшим числом измеренных параметров. Это полностью подтверждает оценку различий между объектами.

3.12.2 Метод главных компонент (МГК)

Проведен анализ методом главных компонент (МГК), построен график каменистой осыпи (рис. 39), значимые компоненты 1 и 2 (рис. 40), 3 и 4 (рис. 41).

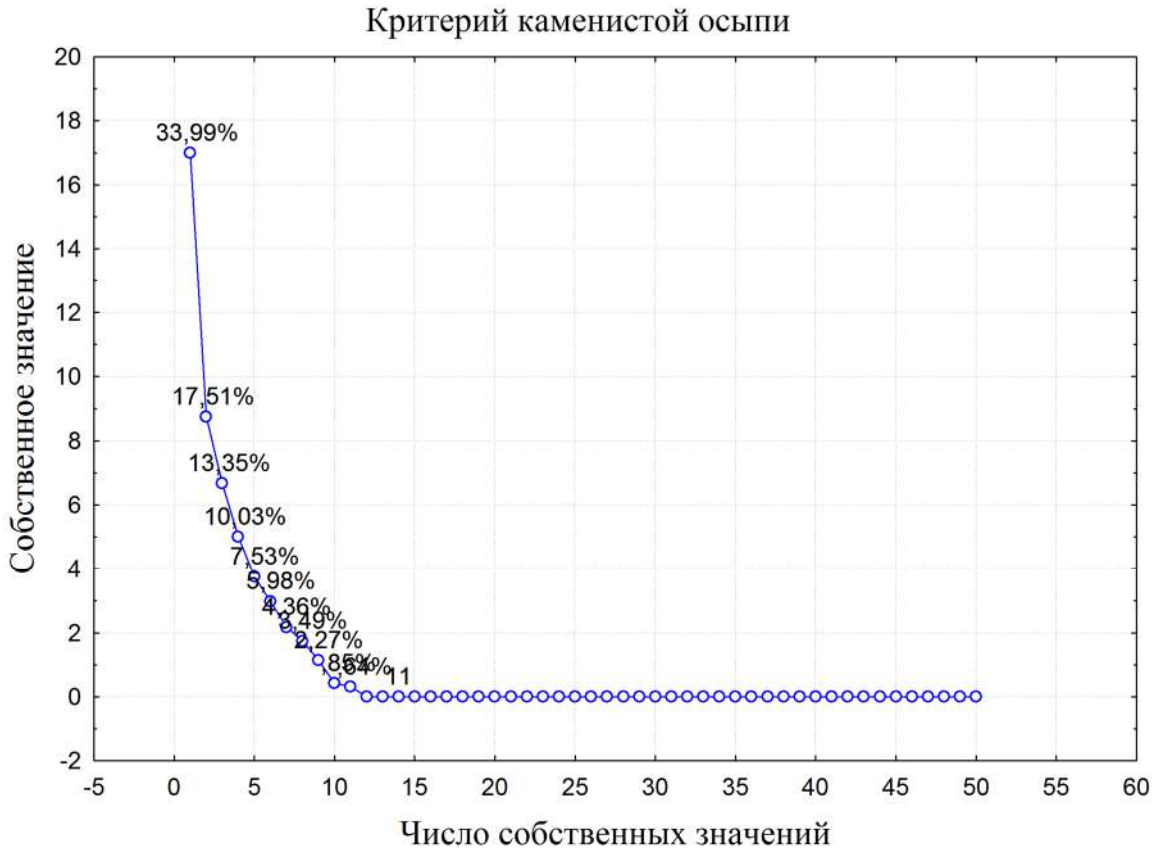


Рисунок 39. График каменной осыпи для всех измеренных свойств различных образцов (почва, почва с опадом, копролиты *A. caliginosa*, копролиты *L.rubellus*).

Рассмотрим проекцию на факторную плоскость 1 и 2 компонент (рис. 40). Разделение всех объектов происходит по обоим компонентам. При этом процент общей объясненной дисперсии составляет 51,5%.

Первая компонента четко отделяет копролиты *L.rubellus*. Вторая компонента отделяет копролиты *A. caliginosa*, в меньшей степени разделяя остальные объекты.

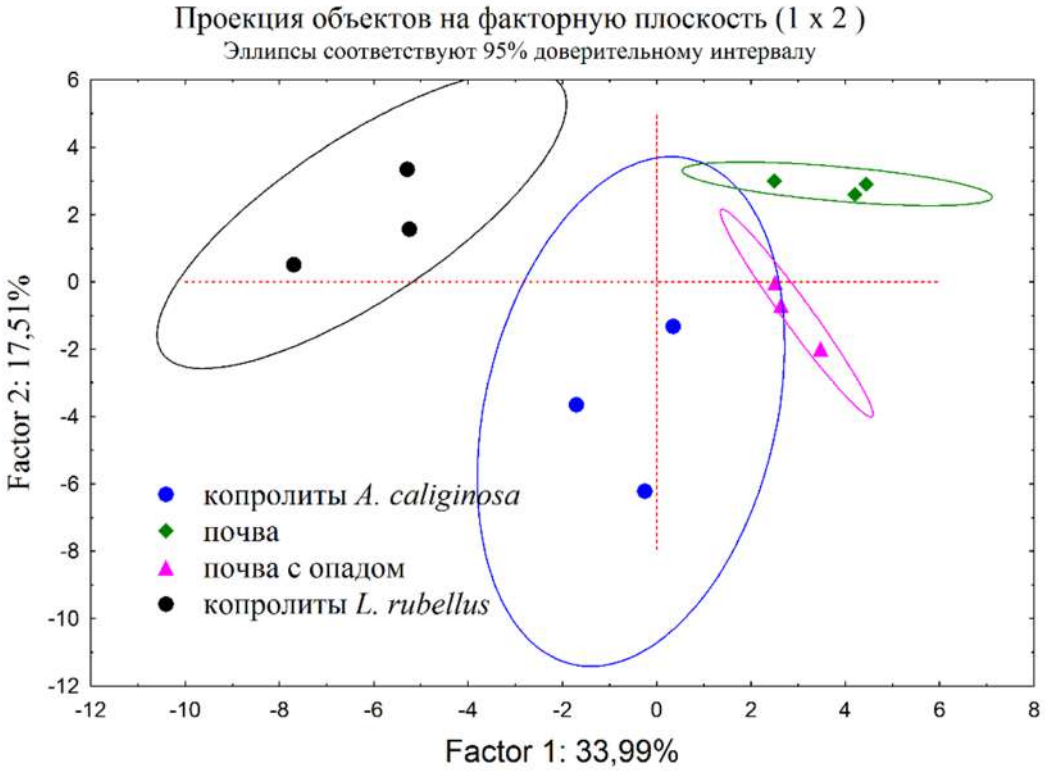


Рисунок 40. Метод главных компонент (МГК) проекция на факторную плоскость первую и вторую компоненты для всех измеренных свойств различных образцов (почва, почва с опадом, копролиты *A. caliginosa*, копролиты *L.rubellus*).

Рассмотрим проекцию на факторную плоскость 3 и 4 компонент (рис. 41). Разделение почвы и почвы с опадом происходит по обоим компонентам. При этом процент общей объясненной дисперсии составляет 23%. Компоненты четко отделяют исходную почву и почву с опадом от копролитов.

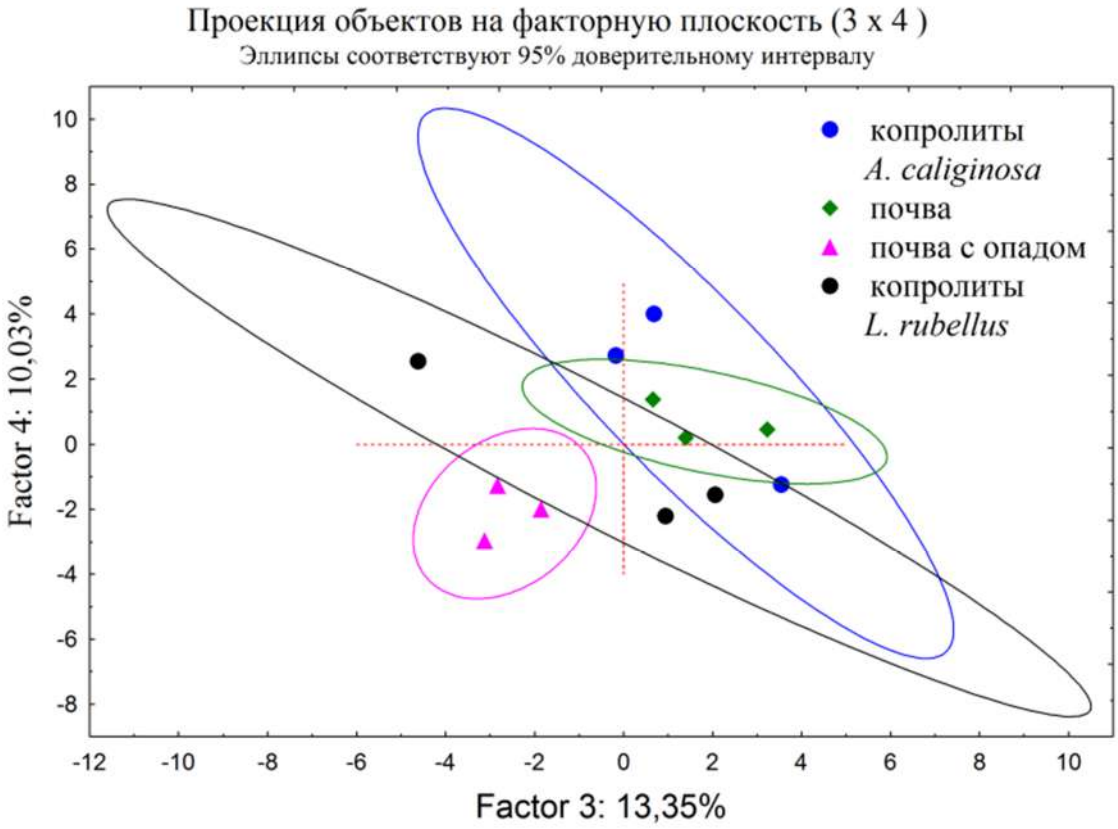


Рисунок 41. Метод главных компонент (МГК) проекция на факторную плоскость третью и четвертую компоненты для различных образцов (почва, почва с опадом, копролиты *A. caliginosa*, копролиты *L.rubellus*).

Оставшиеся компоненты не разделяют объекты и рассматриваться не будут. Проекция переменных на факторную плоскость 1 и 2, также 3 и 4 представлена в приложении. Из-за большого количества параметров удобнее воспользоваться таблицей факторных координат переменных (таблица 12). С подробной таблицей можно ознакомиться в приложении.

Таблица 12. Факторные координаты переменных, основанные на корреляциях для МГК. Жирным шрифтом выделены параметры (значения больше 0,7 и – 0,7), дающие наибольший вклад в фактор (компоненту МГК). Подчеркиванием выделены параметры (значения в диапазоне 0,2 и – 0,2), вклад которых в фактор минимален. G′ – модуль упругости; G″ – модуль вязкости; N удельная - удельная поверхность, измеренная по сорбции азота; LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости; G′=G″ – точка разрушения структуры; Числ.люм. – число клеток рассчитанное с помощью прямой люминесцентной микроскопии; Посев числен. – число колониеобразующих бактерий (КОЕ) на г почвы; ГС ОВ - % содержания фракций с органическим веществом по результатам гранулометрического анализа; ГС - % содержания фракций без органического вещества по результатам гранулометрического анализа; micro - % содержания фракций по результатам микроагрегатного анализа; Vm (Эст) – максимальная скорость реакции (эстеразная активность); Km – константа Михаэлиса (эстеразная активность); декстран 500, инулин, казеин, кератин, крахмал, ксилан, нуклеиновые кислоты, пектин, твин 20, целлюлоза – оценка обилия микроорганизмов на субстратах определенная по кривым роста; мг тфф/10г в стуки – потребление ТФФ (дегидрогеназная активность); Угол смачиваемости – значение угла смачиваемости; C, % - % содержания углерода; N, % - % содержания азота; C/N – соотношение углерода к азоту; $\delta^{15}N$ – промилле изотопа азота; $\delta^{13}C$ – промилле изотопа углерода.

параметры	**Фактор 1**	**Фактор 2**	**Фактор 3**	**Фактор 4**
Crossover G'=G"	-0,6976	-0,3443	0,2813	-0,1886
G"	0,2100	-0,1382	-0,6281	0,1247
N удельная	-0,3082	-0,5676	0,0953	-0,4115
LVE-range	0,6347	0,4649	0,0178	-0,3779
G'	0,5853	-0,0540	-0,5203	0,0543
Числ.люм.	**-0,9145**	0,1313	-0,1367	0,0236
Посев числен.	**-0,9517**	0,0728	0,0967	0,0891
$C_{орг}$	**-0,8538**	0,3434	-0,1774	-0,0434
ГС ОВ 0-2 мкм	**0,8450**	-0,1722	0,2000	0,3410
ГС ОВ 2-20 мкм	**0,8623**	-0,1158	0,0596	0,2670
ГС ОВ 20-50 мкм	0,1067	-0,1177	-0,2632	0,3459
ГС ОВ 50-100 мкм	**-0,7021**	0,0051	-0,2281	-0,5655

Продолжение.Таблица 12.

параметры	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
ГС ОВ 100-250 мкм	**-0,9148**	0,0939	-0,2295	-0,2092
ГС ОВ 250-500 мкм	**-0,9307**	0,1711	-0,1396	-0,1036
ГС ОВ 500-1000 мкм	**-0,8859**	0,1753	-0,1815	-0,0401
ГС 0-2 мкм	0,4045	-0,1699	0,4787	-0,3462
ГС 2-20 мкм	-0,6084	0,0774	0,4406	-0,4424
ГС 20-50 мкм	0,5598	0,1447	-0,0959	0,5413
ГС 50-100 мкм	0,4689	-0,2064	-0,4629	0,2659
ГС 100-250 мкм	-0,3576	-0,1296	-0,6707	0,2969
ГС 250-500 мкм	-0,0532	**-0,7929**	-0,2014	-0,0226
ГС 500-1000 мкм	-0,1207	**-0,8393**	0,0667	0,0151
micro 0-2	-0,0674	**0,7684**	-0,3120	0,2597
micro 2-20	-0,6255	0,5254	-0,1046	0,2542
micro 20-50	-0,0991	-0,4308	0,6451	0,2537
micro 50-100	0,1064	-0,6808	-0,2059	-0,0765
micro 100-250	**0,7930**	0,0788	-0,1315	-0,4441
micro 250-500	0,6410	0,2604	0,2012	-0,2956
micro 500-1000	-0,3681	-0,5546	0,0657	0,2167
Эстеразная активность	0,2859	**-0,8576**	0,2148	0,0177
Эстеразная активность	**-0,8943**	-0,3239	0,1934	-0,1137
декстран 500	-0,1687	-0,2734	**-0,7482**	-0,3490
инулин	-0,3801	-0,4189	**-0,7034**	0,2383
казеин	-0,4221	0,4839	0,3746	0,4890
кератин	-0,4440	-0,2598	**-0,7366**	0,1530
крахмал	0,1764	-0,5862	0,5085	-0,2953
ксилан	0,3203	0,0582	-0,1370	**-0,8399**
НК	-0,5801	0,1369	-0,0853	**0,7429**
пектин	-0,4086	0,4637	0,4239	0,6099
твин 20	-0,0157	-0,4140	**-0,7419**	-0,2936
целлюлоза	-0,1494	**0,7122**	0,4464	-0,0796

Продолжение.Таблица 12.

параметры	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Дегидрогеназная активность (мг ттф/10г в стуки)	-0,6337	-0,6287	-0,2711	0,1437
C, %	**-0,9562**	0,1130	0,0010	-0,0987
N, %	-0,6649	-0,0477	-0,3236	-0,2841
C/N	**-0,7620**	0,2009	0,2764	0,1000
$\delta^{15}N$	-0,2881	-0,6668	0,2970	0,3629
$\delta^{13}C$	**-0,9658**	-0,0827	0,0281	-0,0418
Угол смачивания	-0,3269	0,5372	-0,3122	-0,2199

По результатам анализа массива данных методом главных компонент можно выделить 4 главных компоненты (ГК). Первая и вторая ГК обеспечивает выделение группы копролитов *L.rubellus*, копролитов *A.caliginosa* и, в меньшей степени, почвы и почвы с опадом. Ключевыми параметрами для первой компоненты являются: численность бактерий, определенная методом посева и методом люминесцентной микроскопии; Сорг %, процент фракций гранулометрического состава с ПОВ (<2; 2-20; 50-100; 100-250; 250-500; 500-1000 мкм); % фракции микроагрегатного состава (100-250 мкм); эстеразная активность (*K*m); соотношение C/N; $\delta^{13}C$ (VPDB). Вторая ГК. Ключевыми параметрами для этой компоненты являются: % фракций гранулометрического состава без ПОВ (250-500; 500-1000 мкм); % содержания микроагрегатов (<2 мкм); эстеразная активность (*V*m); обилие ассоциаций микроогранизмов на целлюлозе, определенная комплексным структурно-функциональным методом.

Третья и четвертая ГК разделяют почву с опадом и исходной почву. Ключевыми параметрами для этих компонент являются: обилие ассоциаций микроорганизмов на субстратах (декстран 500; инулин; кератин; твин 20) для 3-ей ГК и (ксилан; нуклеиновая кислота) для 4-ой ГК.

3.12.3 Корреляционный анализ

Корреляционный анализ проведен по изменению свойств в 4-х объектах: копролиты двух видов дождевых червей, исходная почва и исходная почва с опадом. В рамках одной точки бралось среднее значение выбранного параметра для одного мезокосма. Следовательно, корреляция построена на 12 точках. Для многих параметров характерно скачкообразное изменение, т.е. наблюдается резкое изменение для одного объекта, в то время как для остальных – изменения слабые или же вообще отсутствуют. Тем не менее, несмотря на недостатки такого анализа в рамках данного исследования, корреляционный анализ подтверждает точность полученных данных с одной стороны, и дает некоторые новые представления о взаимосвязи свойств – с другой. Полная таблица корреляционного анализа представлена в приложении. Ниже будут рассмотрены наиболее значимые результаты.

Корреляционный анализ подтверждает взаимосвязь параметров, которые частично дублируют друг друга. Например, полученные разными методами данные о численности микроорганизмов R = 0.95 (методом посева и методом люминисцентной микроскопии) и содержании органического углерода, полученные в разных лабораториях на разных приборах R = 0,92. Содержание органического углерода скоррелировано с данными по численности микрооганизмов R = 0,92 (методом люминесцентной микроскопии), R = 0,87 (методом посева), с фракциями ГС без окисления органики 0-2 мкм (R= -0,77), 2-20 мкм (R= -0,70), 100-250 мкм (R = 0,82), 250-500 мкм (R = 0,83), 500 – 1000 мкм (R = 0,77), микроагрегатами 2-20 мкм (R = 0,86). Содержание изотопов углерода коррелирует с данными по численности микрооганизмов R = 0,93 (методом люминисцентной микроскопии), R = 0,89 (методом посева),с фракциями ГС без окисления органики 0-2 мкм (R=-0,76), 2-20 мкм (R= -0,76), 100-250 мкм (R = 0,86), 250-500 мкм (R = 0,85), 500 – 1000 мкм (R = 0,79), микроагрегатами 100-250 мкм (R = 0,78), (Km) эстеразной

активностью (R = 0,92) (что соответствует литературным данным Flegel M., Schrader 2000). Содержание азота скоррелировано с фракциями ГС без окисления органики 50-100 мкм (R = 0,73), 100-250 мкм (R = 0,78). Содержание изотопов азота коррелирует с содержанием микроагрегатов 500-1000 мкм (0,7).

Для микроагрегатов интерес представляет корреляция с данными по комплексному функциональному методу. Корреляция изменения урожайности на субстратах в серии объектов с изменением в соотношении микроагрегатов косвенно указывает на природу микроагрегатов. Микроагрегаты 0-2 мкм скоррелированы с крахмалом (R = -0,77), 50-100 мкм с целлюлозой (R = -0,72), микроагрегаты 100-250 с казеином (R = -0,70), нуклеиновой кислотой (R = -0,72). Наблюдаемая взаимосвязь закономерна, т.к. изменение площади поверхности – важный фактор, определяющий скорость протекания реакции. Измельчение – важнейшая задача, с которой в природе искусно справляются почвенные животные. Увеличение дисперсности растительных остатков в почве вызывает мощное ускорение всех реакций, проводимых микроорганизмами, поскольку увеличивает сорбирующую поверхность, на которой адгезированные микроорганизмы могут активно функционировать. Измельчение растительных остатков является одним из важных элементов в процессе поступления углерода и азота в почву. Соответственно изменение углерода и азота (поступающих в почву из растительных остатков) связано с площадью поверхности (изменения в микроагрегатном, ГС составах) и опосредованно – с увеличением численности и активизацией микроорганизмов (оценка ферментативной активности, оценка комплексным структурно-функциональным методом). Отсутствие линейной зависимости между удельной поверхностью и изученными параметрами может быть вызвано, с одной стороны – нелинейной природой взаимосвязи, и с другой – с недостатками выбранного метода оценки удельной поверхности.

Заключение

Определено 47 параметров, характеризующих комплексную оценку физических, химических, физико-химических и микробиологических свойств копролитов дождевых червей (*A.caliginosa* и *L.rubellus*) и пахотного горизонта чернозема миграционно-мицелярного. По результатам статистического анализа (сравнения средних U-критерием Манна-Уитни или t-критерием Стьюдента), выбранные параметры имеют меньший разброс внутри одного объекта, чем между собой. На основании методов многомерной статистики (метода главных компонент и дисперсионного анализа) выделены параметры, разделяющие копролиты дождевых червей, почву, где жили черви, исходную почву с опадом и без него. Видовая принадлежность дождевых червей оказывает существенное влияние на абсолютные значения изученных параметров. На основании МГК выделены параметры, характеризующие комплексную оценку копролитов позволяющие достоверно выделять их относительно фоновой почвы. Корреляционный анализ показал наличие слабой линейной связи для содержания углерода, азота и микробиологических, физических и агрофизических свойств в ряду изученных объектов. Показано отсутствие линейной связи для большинства определенных параметров.

На основании проведенных анализов выделены два основных механизма, возникающих при прохождении почвы сквозь кишечник дождевых червей. Первый – увеличение содержания органического вещества за счёт преобразования опада (влияет напрямую на содержание $C_{орг}$, изотопов (C, N), ГС и на микробиологические параметры (ферментативная активность микроорганизмов, их численность, скорость потребления субстрата)). Второй – появление крупных минеральных частиц в ГС, что приводит к изменению параметров ГС состава без ОВ, удельной поверхности. Причиной этого с одной стороны является аккумуляция крупных частиц из почвы, с другой стороны образование минеральных частиц из фитолитов. Совместное действие этих двух

механизмов приводит к изменению остальных исследованных в работе параметров.

Выводы:

1. Копролиты дождевых червей выполняют важную экологическую роль в поступлении и сохранении углерода в почву. В копролитах *A.caliginosa* увеличивается содержание органического углерода на 0,4±0,1% в эксперименте с кленовым опадом и на 0,6±0,1% в эксперименте с пожнивными остатками кукурузы. В копролитах *L.rubellus* увеличивается содержания органического углерода на 1,4±0,1% по сравнению с исходной почвой. Дождевые черви *L.rubellus* больше способствуют увеличению органического углерода в почве, чем *A.caliginosa.*
2. Дождевые черви способны изменять гранулометрический состав исходной почвы. Органические частицы в составе копролитов распределены по фракциям песка. Несмотря на незначительное количество и/или отсутствие минеральных частиц размером более 100 мкм в исходной почве без дождевых червей и опада, такие ЭПЧ идентифицированы в составе копролитов. Впервые описано, что гранулометрический состав копролитов включает ЭПЧ песчаных фракций, отсутствующих в исходной почве, содержащих в своем составе частицы размером до 500 мкм. При прохождении через кишечник дождевых червей происходит объединение минеральных ЭПЧ почвы и фитолитов клёна (предположительно за счет работы кальциевых желез дождевых червей).
3. Агрофизические свойства копролитов *A.caliginosa* и *L.rubellus* существенно различаются. В копролитах *A.caliginosa* возрастает доля микроагрегатов 20-100 мкм на 9,2±0,5% за счёт уменьшения доли микроагрегатов >100 мкм, в копролитах *L.rubellus* возрастает доля

микроагрегатов 2-20 мкм на 7,0±0,5% и частиц <2 мкм на 1,6±0,1% за счёт уменьшения доли микроагрегатов >20 мкм.

4. Дождевые черви играют важную экологическую роль для почвенных микроорганизмов, повышают биологическую активность. При этом наблюдаются отличия для разных экологических групп: при меньшей численности бактерий в копролитах *A.caliginosa* относительно копролитов *L.rubellus,* ферментативная активность выше в копролитах *A.caliginosa.* Численность микроорганизмов в копролитах *A.caliginosa* увеличивается с $3*10^6$ до $2,4*10^7$ КОЕ/г почвы и с $1,9*10^8$ до $3,4*10^8$ кл/г почвы. В копролитах *L.rubellus* увеличивается с $3*10^6$ до $1,45*10^7$ КОЕ/г почвы, с $1,9*10^8$ до $1*10^9$ кл/г почвы. Константа Михаэлиса (*K*m) для эстеразной активности показывает уменьшение в копролитах начальной скорости реакции. Максимальная скорость реакции (*V*m) увеличивается в копролитах *A.caliginosa* и уменьшается в копролитах *L.rubellus* относительно контрольной почвы.
5. Впервые выделены характеристики, отличающие копролиты представителей двух разных экологических групп дождевых червей друг от друга и фоновой почвы:
   - Для копролитов *A.caliginosa* это: наличие в гранулометрическом составе ЭПЧ 250-500, 500-1000 мкм, не агрегированные частицы < 2 мкм в микроагрегатах, параметр для эстеразной активности – максимальная скорость реакции (*V*m), обилие ассоциаций микроорганизмов на субстрате с целлюлозой.
   - Для копролитов *L.rubellus* это*:* изменение в гранулометрическом составе соотношения ЭПЧ (до окисления органического вещества), снижение доли микроагрегатов размером 100-250 мкм, параметр для эстеразной активности – константа Михаэлиса (*K*m), увеличение содержания органического углерода, изотопов углерода, увеличение насыщенности органического вещества азотом.

Список литературы:

1. Абатуров Б. Д., Кулакова Н. Ю. Круговорот азота и зольных элементов в экосистемах степных пастбищ и гарей // География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов. – 2010. – С. 33-37.
2. Айдинян Р. Х. Зольный обмен между древесной растительностью и черноземными почвами Каменной степи // Почвоведение. – 1953. – №. 9. – С. 40-61.
3. Афанасьева Е. А. Черноземы средне-русской возвышенности. – 1966. – 227 с.
4. Белобров В. П., Юдин С. А., Айдиев А. Я., Ермолаев Н. Р., Лебедева М. П., Абросимов К. Н., Борисочкина Т. И., Воронин А.Я., Плотникова О.О. Чернозем типичный. Прямой посев, Курская область. Опыт, ротация 1.1. – 2021. – 128 с.
5. Бигон М., Харпер Д., Таунсенд К. Экология. Особи, популяции и сообщества: в 2 т // М: Мир. – 1989. – Т. 1. –667 с.
6. Битюцкий Н. П., Лапшина И. Н., Лукина Е. И., Соловьева, А. Н., Пацевич, В. Г., Выговская, А. А. Роль дождевых червей в минерализации органических соединений азота в почве // Почвоведение. – 2002. – №. 10. – С. 1242-1250.
7. Битюцкий Н. П., Соловьева А. Н., Лукина Е. И., Олейник А. С., Завгородняя Ю. А., Демин В. В., Бызов Б. А. Экскреты дождевых червей стимулятор минерализации соединений азота в почве // Почвоведение. – 2007. – №. 4. – С. 468-473.
8. Бобров А. А., Хилимонюк И. З., Чемеровская Е. К. Аккумуляция биогенного кремнезема в разновозрастных почвах южной тайги // Почвоведение. – 1991. – №. 8. – С. 137-141.
9. Боброва Е. К. Биогенный кремнезем почв сложного генезиса. Дисс. на соискание уч. степ, канд. биол. наук – 1995.

10. Богородская А. В., Баранчиков Ю. Н., Иванова Г. А. Состояние микробных комплексов почв лесных экосистем после пожаров и дефолиации древостоев непарным шелкопрядом // Почвоведение. – 2009. – №. 3. – С. 337-345.
11. Бызов Б. А. Зоомикробные взаимодействия в почве // М.: ГЕОС. – 2005. – 213 с.
12. Бызов Б. А. Зоомикробные взаимодействия в почве. Автореферат дисс. на соискание уч. степ, доктора биол. наук. М.: МАКС Пресс. – 2003. –52 с.
13. Бызов Б. А., Тихонов В. В., Нечитайло Т. Ю., Демин В. В., Звягинцев Д. Г. Таксономический состав и физиолого-биохимические свойства бактерий пищеварительного тракта дождевых червей // Почвоведение. – 2015. – №. 3. – С. 308-308.
14. Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова – 1984. – 205 с.
15. Воронков М. Г., Зелчан Г. И., Лукевиц Э. Я. Кремний и жизнь: Биохимия, токсикология и фармакология соединений кремния. – Знание – 1971. – 155 с.
16. Всеволодова-Перель Т. С. Дождевые черви: Кадастр и определитель // Т. С. Всеволодова-Перель.− М.: Наука. – 1997. – 102 с.
17. Гераськина А. П. Влияние дождевых червей разных морфо-экологических групп на аккумуляцию углерода в лесных почвах // Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3. – №. 2. – С. 1-20.
18. Гераськина А. П. Глава 3.1. Сукцессионная динамика комплекса дождевых червей в почвах хвойно-широколиственных лесов // Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. – 2018. – С. 86-98.

19. Гиляров М.С. Роль почвенных животных в формировании гумусового слоя почвы // Успехи современной биологии. – 1951. – Т. 31. – №. 2. – С. 161-169.
20. Гольева А. А. Фитолиты и их информационная роль в изучении природных и археологических объектов. – 2001. – 120 с.
21. Звягинцев Д. Г. (ред.). Методы почвенной микробиологии и биохимии. – Изд-во МГУ – 1991. – 310 с.
22. Звягинцев Д. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. Учебник. – 2005. – 445 с.
23. Зенкова И. В., Тиунов А. В., Розанова О. Л. Трофическая структура почвенной фауны в лесных экосистемах Кольской субарктики (по данным изотопного состава азота δ15N и углерода δ13C) // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. – 2019. – С. 28-30.
24. Карпачевский Л.О. Почвы как зеркало ландшафта. М.: Мыслью – 1983. – 154 с.
25. Клюева В. В. Реологические свойства почв и их связь с физическими и химическими свойствами на примере дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного: дис. – Московский государственный университет им. МВ Ломоносова – 2019.
26. Кожевников Н. В. Применение показателей ферментативной активности для диагностики сельскохозяйственного использования почв. // Почва–ресурс экологической и продовольственной безопасности. – 2016. – С. 225-230.
27. Колешко О.И. Экология микроорганизмов в почве / О.И. Колешко. – Минск: Высш. шк., 1981. – 345 с.
28. Константинов А.О., Смирнов П В., Гаврилов Д. А., Лойко С. В., Новоселов А. А.. Некоторые аспекты почвообразования на биогенных кремниевых породах Зауралья // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2019. – №. 96. – С. 64-85.

29. Кураков А. В., Харин С. А. Формирование водопрочных копролитных агрегатов в дерново-подзолистых почвах и участие в этом процессе грибов // Почвоведение. – 2012. – №. 4. – С. 484-484.

30. Кутовая О. В. Характеристика гумусовых веществ агродерново-подзолистой почвы и копролитов дождевых червей // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2012. – №. 69. – С. 46-59.

31. Кутовая О. В., Гребенников А. М., Тхакахова А. К., Исаев В. А., Гармашов В. М., Беспалов В. А., Чевердин Ю. И., Белобров В. П. Изменение почвенно-биологических процессов и структуры микробного сообщества агрочерноземов при разных способах обработки почвы // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2018. – №. 92. – С. 35-61.

32. Лукина Н. В., Гераськина А. П., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Куприн А. В., Чернов Т. И., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Кузнецова А.И., Тебенькова Д. Н., Горнова М. В.Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3. – №. 4. – С. 1-90.

33. Малви Т., Скотт В. Д., Рид С. Дж. Б., Кокс М. Дж. К., Лав Г. Количественный электронно-зондовый микроанализ. – 1986. – 352 с.

34. Манаенков И. В., Зубкова Т. А., Карпачевский Л. О. Механическая прочность почвенных агрегатов разной формы // Почвоведение. – 1997. – №. 12. – С. 1438-1444.

35. Марфенина О. Е. Влияние дождевых червей на микроскопические грибы как деструкторы органических веществ в почве. Деструкция органических веществ в почве. Вильнюс. – 1989. – С. 104-108

36. Марфенина О. Е., Ищенко И. А. Избирательность дождевых червей по отношению к почвенным микроскопическим грибам // Известия РАН. Сер. биологическая. – 1997. – № 4. – С. 504-506.

37. Матвеева Н. В., Милановский Е. Ю., Рогова О. Б. Способ подготовки образцов почв для определения контактного угла смачивания методом сидячей капли // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2019. – №. 97. – С. 91-112.

38. Мехтиев Г.Д. О. Дифференциация слоистых силикатов и кремнезема в светло-серо-коричневых (каштановых) почвах низменной части Нахчиванской АР // Проблемы современной науки и образования. – 2020. – №. 4-1 (149). – С. 27-34.

39. Мозолевская Е. Г., Уткина И. А. О роли хвое-и листогрызущих насекомых в лесных экосистемах // Энтомологические исследования в Сибири. – 2004. – №. 3. – С. 4-27.

40. Олейник А. С., Бызов Б. А. Реакция бактерий на воздействие поверхностных экскретов дождевых червей // Микробиология. – 2008. – Т. 77. – №. 6. – С. 854-862.

41. Осадчий Г. Б. Предотвращение снижения плодородия почвы за счет использования систем и установок энергетики возобновляемых источников энергии // Международная агроинженерия. – 2017. – С. 40-50.

42. Паников Н. С., Горбенко А. Ю., Звягинцев Д. Г. Количественная оценка влияния мезофауны на скорость разложения растительного опада // Вестн. Моск. ун-та. Сер. – 1985. – Т. 17. – С. 37-45.

43. Перель Т. С. Жизненные формы дождевых червей (Lumbricidae) //Журнал общей биологии. – 1975. – Т. 36. – №. 2. – С. 189-202.

44. Покаржевский А. Д., Сикора И., Гордиенко С. А. Ресурсы аминокислот в пище сапрофагов // Докл. АН СССР. – 1984. – Т. 227. – №. 1. – С. 253-256.

45. Практикум по физике твердой фазы почв: учебное пособие / Е. В. Шеин, Е. Ю. Милановский, Д. Д. Хайдапова и др. — М., Буки-Веди Москва, 2017. — 119 с

46. Прусак А. В., Смагин, А. В., Костина, Н. В., Умаров, М. М., Богданова, Т.В. Гидрофизические свойства и биологическая активность копролитов дождевых червей разных эколого-трофических групп // Фундаментальные исследования. – 2008. – №. 2. – С. 50-51.

47. Ремезов Н. П. Динамика взаимодействия широколиственного леса с почвой // Проблемы почвоведения. М. Изд-во АН СССР. – 1962. – С. 101-147.

48. Ремезов Н. П., Быкова Л. Н., Смирнова К. М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР // М.: Изд-во МГУ. – 1959. – 284 с.

49. Рид С.Д. Электронно-зондовый микроанализ. – Мир, 1979. – 240 с.

50. Розанов Б. Г. Морфология почв: Учебное пособие. – МГУ, 1983. – 320 с.

51. Русанов А.М., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Лазарев В.И., Тюгай З.Н., Фомин Д.С., Ильин Л.И., Зинченко С.И., Быкова Г.С., Укенов Б.С.. Особенности миграционных процессов в черноземах степных агроладшафтов под влиянием лесных массивов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – Т. 181 – № 6. – С. 128-131.

52. Симохина-Прусак А. В. Влияние копролитов червей на физические свойства и биологическую активность почв : дис. – Московский государственный университет им. МВ Ломоносова – 2009.

53. Столбовая Е. И., Старикова Н. А. Производственные испытания усовершенствованной установки для выращивания гидропонной зеленой кормовой массы // ВЕСТНИК ЧГАА. – 2014. – С. 70-75.

54. Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов. – 1980. – 242 с.

55. Тиунов А. В. Влияние нор дождевых червей *Lumbricus terrestris* на пространственное распределение и таксономическую структуру

почвенных сообществ // Зоологический журнал. – 2003. – Т. 82. – С. 269-274.

56. Тиунов А. В. Метабиоз в почвенной системе: влияние дождевых червей на структуру и функционирование почвенной биоты автореферат дис. – М.: Институт проблем экологии и эволюции РАН. – 2007.

57. Тиунов А. В., Кузнецова Н. А. Средообразующая деятельность норных дождевых червей (*Lumbricus terrestris* L.) и пространственная организация почвенной биоты // Известия РАН, Сер. биологическая. – 2000. – Т. 5. – С. 606-617.

58. Тихонов В. В., Бызов Б. А., Завгородняя Ю. А., Демин, В. В. Дождевые черви преобразователи структуры и биологической активности гуминовых кислот // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2011. – №. 1. – С. 24-32.

59. Тюгай З.Н., Дембовецкий А.В., Милановский Е.Ю. Вариабельность карбонатов в черноземе типичном мощном стрелецкой степи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета 2014. – № 5 (115) . – С. 62-66.

60. Филиппов М.Н. «Безэталонный» рентгеноспектральный анализ: реальность или миф? // Аналитика. – 2020. – Т. 10. – №. 2. – С. 124-131.

61. Филиппова О. И., Холодов В. А., Сафронова Н. А., Юдина А. В., Куликова Н. А. Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // Почвоведение. – 2019. – №. 3. – С. 335-347.

62. Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Голуб А.П., Юдина А.В. Оптимизация анализа агрегатного состава почв методом автоматического рассева // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2019. – №. 96. – С. 149-177.

63. Фролов О. А., Милановский Е. Ю. Размер и содержание органических частиц в копролитах *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2022. – №. 58. – С. 6-27.

64. Фролов О. А., Якушев А. В. Влияние на бактериальный гидролитический комплекс гумусо-аккумулятивного горизонта техноурбанозема пассажа через кишечник дождевого червя *Aporrectodea caliginosa* // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2018. – №. 94. – С. 57-73.

65. Фролов О. А., Якушев А. В., Милановский Е. Ю. Гетерогенность свойств копролитов дождевых червей Aporrectodea caliginosa и Lumbricus rubellus в модельном опыте на черноземе // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2019. – №. 99. – С. 92-116.

66. Хайдапова Д. Д., Честнова В. В., Шеин Е. В., Милановский Е. Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. – 2016. – №. 8. – С. 955-963.

67. Харин С. А., Кураков А. В. Трансформация соединений азота и динамика микробной биомассы в свежих копролитах *Aporrectodea caliginosa* // Почвоведение. – 2009. – №. 1. – С. 86-92.

68. Холодов В., Фарходов Ю., Ярославцева Н., Айдиев А., Лазарев В., Ильин Б., Иванов А., Куликова Н. Термолабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. – 2020. – №. 8. – С. 970-982.

69. Храмченкова О., Веремеев В., Бачура Ю. Водоросли почв и копролитов дождевых червей в луговых экосистемах // Наука и инновации. – 2012. – Т. 2. – №. 108. – С. 67-70.

70. Чернов Т. И., Холодов В. А., Когут Б. М., Иванов А. Л. Методология микробиологических исследований почвы в рамках проекта

“Микробиом России” // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2017. – №. 87. – С. 100-113.

71. Чижикова Н. П., Харитонова Г. В., Матюшкина Л. А., Коновалова Н. С., Стенина А.С. Дифференциация слоистых силикатов и биогенного кремнезема в луговых подбелах Среднеамурской низменности // Почвоведение. – 2013. – №. 8. – С. 980-980.

72. Шеин Е. В. Курс физики почв. // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет им. МВ Ломоносова" (Издательский Дом (Типография)). – 2005. – 432 с.

73. Шиленкова О. Л., Тиунов А. В. Освоение подвижного углерода почвы тропическими дождевыми червями *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta) // Зоологический журнал. – 2014. – Т. 93. – №. 12. – С. 1397-1397.

74. Юдина А. В. Лазерная дифрактометрия в почвоведении: методические аспекты и диагностическое значение. Дисс.. канд. биол. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та им. МВ Ломоносова, 2018 : дис. – 2018.

75. Юрков А. М., Чернов И. Ю., Тиунов А. В. Влияние дождевых червей Lumbricus terrestris на структуру дрожжевого сообщества лесной подстилки // Микробиология. – 2008. – Т. 77. – №. 1. – С. 121-125.

76. Юровская Е. М. Дегидрогеназная активность бактерий как тест для оценки токсичности химических веществ // Гигиена и санитария. – 1977. – №. 12. – С. 71-74.

77. Юшкова Е. И., Павловская Н. Е., Даниленко А. Н., Ботуз Н. И. Физико-химические свойства экстрактов из биогумуса разной степени зрелости // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2006. – Т. 6. – №. 1. – С. 70-79.

78. Якушев А. В, Матышак Г. В., Тархов М. О., Качалкин А. В., Сефилян А. Р., Петров Д. Г. Микробиологические особенности почв торфяных пятен бугристых торфяников севера Западной Сибири // Почвоведение. – 2019. – №. 9. – С. 1070-1080.

79. Якушев А. В. Комплексный структурно-функциональный метод характеристики микробных популяций // Почвоведение. – 2015. – №. 4. – С. 429-429.

80. Якушев А. В., Благодатский С. А., Бызов Б. А. Действие дождевых червей на физиологическое состояние микробного сообщества при вермикомпостировании // Микробиология. – 2009. – Т. 78. – №. 4. – С. 565-574.

81. Якушев А. В., Бызов Б. А. Гидролазная активность как показатель состояния микробного сообщества вермикомпоста // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2009. – №. 2. – С. 41-46.

82. Якушев А. В., Бызов Б. А. Микробиологическая характеристика вермикомпостирования методом мультисубстратного тестирования // Почвоведение. – 2008. – №. 11. – С. 1381-1387.

83. Adam G., Duncan H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils // Soil Biology and Biochemistry. – 2001. – Т. 33. – №. 7-8. – С. 943-951.

84. Adam G., Duncan H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils // Soil biology and biochemistry. – 2001. – Т. 33. – №. 7-8. – С. 943-951.

85. Aira M., Monroy F., Domínguez J., Mato S. How earthworm density affects microbial biomas and activity in pig manure // European Journal of Soil Biology. – 2002. – Т. 38. – №. 1. – С. 7-10.

86. Al-Maliki S., Scullion J. Interactions between earthworms and residues of differing quality affecting aggregate stability and microbial dynamics // Applied soil ecology. – 2013. – T. 64. – C. 56-62.

87. Amelung W., Zech W. Minimisation of organic matter disruption during particle-size fractionation of grassland epipedons // Geoderma. – 1999. – T. 92. – №. 1-2. – C. 73-85.

88. AMS precisION IRMS User Manual. Elementar (UK), 2017.

89. Andriuzzi W. S., Schmidt O., Brussaard, L., Faber J. H., Bolger T. Earthworm functional traits and interspecific interactions affect plant nitrogen acquisition and primary production // Applied Soil Ecology. – 2016. – T. 104. – C. 148-156.

90. Angst G., Mueller C. W., Prater I., Angst Š., Frouz J., Jílková V., Nierop K. G. Earthworms act as biochemical reactors to convert labile plant compounds into stabilized soil microbial necromass // Communications biology. – 2019. – T. 2. – №. 1. – C. 1-7.

91. Angst Š., Mueller C. W., Cajthaml T., Angst G., Lhotáková Z., Bartuška M., Frouz J. Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter // Geoderma. – 2017. – T. 289. – C. 29-35.

92. Arai M., Tayasu I., Komatsuzaki M., Uchida M., Shibata Y., Kaneko N. Changes in soil aggregate carbon dynamics under no-tillage with respect to earthworm biomass revealed by radiocarbon analysis // Soil and Tillage Research. – 2013. – T. 126. – C. 42-49.

93. Asawalam D. O., Johnson S. Physical and chemical characteristics of soils modified by earthworms and termites // Communications in soil science and plant analysis. – 2007. – T. 38. – №. 3-4. – C. 513-521.

94. Bal L. Morphological investigation in two moder-humus profiles and the role of the soil fauna in their genesis // Geoderma. – 1970. – T. 4. – №. 1. – C. 5-36.

95. Barley K. P. The abundance of earthworms in agricultural land and their possible significance in agriculture // Advances in Agronomy. – Academic Press, 1961. – T. 13. – C. 249-268.

96. Barley K. P., Jennings A. C. Earthworms and soil fertility. III. The influence of earthworms on the availability of nitrogen // Australian Journal of Agricultural Research. – 1959. – T. 10. – №. 3. – C. 364-370.

97. Barre P., McKenzie B. M., Hallett P. D. Earthworms bring compacted and loose soil to a similar mechanical state // Soil Biology and Biochemistry. – 2009. – T. 41. – №. 3. – C. 656-658.

98. Bartoli F., Poulenard A. J., Schouller B. E. Influence of allophane and organic matter contents on surface properties of Andosols // European Journal of Soil Science. – 2007. – T. 58. – №. 2. – C. 450-464.

99. Basker A., Kirkman J. H., Macgregor A. N. Changes in potassium availability and other soil properties due to soil ingestion by earthworms // Biology and Fertility of Soils. – 1994. – T. 17. – №. 2. – C. 154-158.

100. Bedano J. C., Vaquero F., Domínguez A., Rodríguez M. P., Wall L., Lavelle P. Earthworms contribute to ecosystem process in no-till systems with high crop rotation intensity in Argentina // Acta Oecologica. – 2019. – T. 98. – C. 14-24.

101. Beloqui A., Nechitaylo T. Y., López-Cortés N., Ghazi A., Guazzaroni M. E., Polaina J., Golyshin P. N. Diversity of glycosyl hydrolases from cellulose-depleting communities enriched from casts of two earthworm species // Applied and environmental microbiology. – 2010. – T. 76. – №. 17. – C. 5934-5946.

102. Bi Y. M., Tian G. L., Wang C., Zhang Y., Wang D. N., Zhang F. F., Sun Z. J. Differential effects of two earthworm species on Fusarium wilt of strawberry // Applied Soil Ecology. – 2018. – T. 126. – C. 174-181.

103. Bini D., Santos C.A., Carmo K. B., Kishino N., Andrade G., Zangaro W., Nogueira M.A. Effects of land use on soil organic carbon and microbial

processes associated with soil health in southern Brazil // European Journal of Soil Biology. – 2013. – T. 55. – C. 117-123.

104. Blanchart E., Lavelle P., Braudeau E., Le Bissonnais Y., Valentin C. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire // Soil Biology and Biochemistry. – 1997. – T. 29. – №. 3-4. – C. 431-439.
105. Blouin M., Hodson M. E., Delgado E. A., Baker G., Brussaard L., Butt K. R., Brun J. J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services // European Journal of Soil Science. – 2013. – T. 64. – №. 2. – C. 161-182.
106. Bornebusch C. H. Laboratory experiments on the biology of worms // Dansk. Skorforen. Tidssk. – 1953. – T. 38. – C. 557-559.
107. Boselli R., Fiorini A., Santelli S., Ardenti F., Capra F., Maris S. C., Tabaglio V. Cover crops during transition to no-till maintain yield and enhance soil fertility in intensive agro-ecosystems // Field Crops Research. – 2020. – T. 255. – C. 107871.
108. Bottinelli N., Hallaire V., Menasseri-Aubry S., Le Guillou C., Cluzeau D. Abundance and stability of belowground earthworm casts influenced by tillage intensity and depth // Soil and Tillage Research. – 2010. – T. 106. – №. 2. – C. 263-267.
109. Bottinelli N., Kaupenjohann M., Märten M., Jouquet P., Soucémarianadin L., Baudin F., Rumpel C. Age matters: Fate of soil organic matter during ageing of earthworm casts produced by the anecic earthworm Amynthas khami // Soil Biology and Biochemistry. – 2020. – T. 148. – C. 107906.
110. Bottinelli N., Maeght J. L., Le V. T., Boonchamni C., Doan T. T., Tran T. M., Jouquet P. To what extent do ageing and soil properties influence Amynthas khami cast properties? Evidence from a small watershed in northern Vietnam // Applied Soil Ecology. – 2021. – T. 158. – C. 103792.

111. Bouche M.B. Lombriciens de France. Ecologie et systématique. – INRA Editions, 1972. – T. 72. – №. HS. – C. 671 p.

112. Bouche M.B., Al-Addan F. Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments // Soil biology and biochemistry. – 1997. – T. 29. – №. 3-4. – C. 441-452.

113. Bouyoucos G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils 1 // Agronomy journal. – 1951. – T. 43. – №. 9. – C. 434-438.

114. Brown G. G., Barois I., Lavelle P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activityin the drilosphere and the role of interactionswith other edaphic functional domains // European Journal of Soil Biology. – 2000. – T. 36. – №. 3-4. – C. 177-198.

115. Brussaard L. Biodiversity and ecosystem functioning in soil // Ambio. – 1997. – C. 563-570.

116. Brussaard L. Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes // Applied soil ecology. – 1998. – T. 9. – №. 1-3. – C. 123-135.

117. Campbell J. R., Roach I. C. Limitations in the laser particle sizing of soils // Advances in Regolith. – 2003. – T. 1. – C. 38-42.

118. Capowiez Y., Sammartino S., Michel E. Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores // Geoderma. – 2011. – T. 162. – №. 1-2. – C. 124-131.

119. Castaing R. Application des sondes électroniques à une méthode d'analyse ponctuelle chimique et cristallographique // These Universite de Paris 1951. – 1952.

120. Chang C. H., Szlavecz K., Buyer J. S. Species-specific effects of earthworms on microbial communities and the fate of litter-derived carbon // Soil biology and biochemistry. – 2016. – T. 100. – C. 129-139.

121. Chen C., Whalen J. K., Guo X. Earthworms reduce soil nitrous oxide emissions during drying and rewetting cycles // Soil Biology and Biochemistry. – 2014. – T. 68. – C. 117-124.

122. Chrzanowski T. H., Crotty R. D., Hubbard J. G., Welch R. P. Applicability of the fluorescein diacetate method of detecting active bacteria in freshwater // Microbial ecology. – 1984. – Т. 10. – №. 2. – С. 179-185.

123. Cooke J. The effects of fungi on food selection by Lumbricus terrestris L // Earthworm ecology. – Springer, Dordrecht, 1983. – С. 365-373.

124. Daane L. L., Molina J. A., Berry E. C., Sadowsky M. J. Influence of earthworm activity on gene transfer from Pseudomonas fluorescens to indigenous soil bacteria // Applied and Environmental Microbiology. – 1996. – Т. 62. – №. 2. – С. 515-521.

125. Darwin C. The formation of vegetable mould, through the action of worms: with observations on their habits. – J. Murray, 1892. – 316 с.

126. Dawson R. C. Earthworm microbiology and the formation of water-stable soil aggregates // Soil Science Society of America Journal. – 1948. – Т. 12. – №. С. – С. 512-516.

127. Decaëns T. Degradation dynamics of surface earthworm casts in grasslands of the eastern plains of Colombia // Biology and Fertility of Soils. – 2000. – Т. 32. – №. 2. – С. 149-156.

128. Drake H. L., Horn M. A. As the worm turns: the earthworm gut as a transient habitat for soil microbial biomes // Annu. Rev. Microbiol. – 2007. – Т. 61. – С. 169-189.

129. Drut B., Fustec J., Oddos L., Cannavacciuolo M., Brauman A., Cassagne N. The combined effects of faba bean and endogeic earthworms on soil microbial activity in intercrops // European Journal of Soil Biology. – 2023. – Т. 117. – С. 103510.

130. Edeh I. G., Amanambu C. N., Ezeaku P. I. Rheological and physical properties of wormcast and termite mound soils in Nsukka subtropical area // African Journal of Agricultural Research. – 2015. – Т. 10. – №. 36. – С. 3590-3595.

131. Edwards C. A., Arancon N. Q. The use of earthworms in the breakdown of organic wastes to produce vermicomposts and animal feed protein // Earthworm ecology. – 2004. – T. 2. – C. 345-380.

132. El-Tarabily K. A. Total microbial activity and microbial composition of a mangrove sediment are reduced by oil pollution at a site in the Arabian Gulf // Canadian journal of microbiology. – 2002. – T. 48. – №. 2. – C. 176-182.

133. Enock J. Intrinsic biodegradation potential of crude oil in salt marshes. – Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2002.

134. Eusterhues K., Rumpel C., Kögel-Knabner I. Stabilization of soil organic matter isolated via oxidative degradation // Organic geochemistry. – 2005. – T. 36. – №. 11. – C. 1567-1575.

135. Fahey T. J., Yavitt J. B., Sherman R. E., Maerz J. C., Groffman P. M., Fisk M. C., Bohlen P. J. Earthworms, litter and soil carbon in a northern hardwood forest // Biogeochemistry. – 2013. – T. 114. – C.269-280.

136. Fahey T. J., Yavitt J. B., Sherman R. E., Maerz J. C., Groffman, P. M., Fisk M. C., Bohlen P. J. Earthworm effects on the incorporation of litter C and N into soil organic matter in a sugar maple forest // Ecological Applications. – 2013. – T. 23. – №. 5. – C. 1185-1201.

137. Feller C., Schouller E., Thomas F., Rouiller J., Herbillon A. J. N2-BET specific surface areas of some low activity clay soils and their relationships with secondary constituents and organic matter contents // Soil Science. – 1992. – T. 153. – №. 4. – C. 293-299.

138. Ferlian O. Cesarz S., Marhan S., Scheu S. Carbon food resources of earthworms of different ecological groups as indicated by 13C compound-specific stable isotope analysis // Soil Biology and Biochemistry. – 2014. – T. 77. – C. 22-30.

139. Filser J., Faber J. H., Tiunov A. V., Brussaard L., Frouz J., De Deyn, G., Jiménez, J. J. Soil fauna: key to new carbon models // Soil. – 2016. – T. 2. – №. 4. – C. 565-582.

140. Flegel M., Schrader S. Importance of food quality on selected enzyme activities in earthworm casts (Dendrobaena octaedra, Lumbricidae) // Soil Biology and Biochemistry. – 2000. – T. 32. – №.8-9. – C. 1191-1196.

141. Fonte S. J., Fonte S. J., Kong A. Y., van Kessel C., Hendrix P. F., Six J. Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management // Soil Biology and Biochemistry. – 2007. – T. 39. – №.5. – C. 1014-1022.

142. Frouz J., Livečková M., Albrechtová J., Chroňáková A., Cajthaml T., Pižl V., Cepáková Š. Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites // Forest Ecology and Management. – 2013. – T. 309. – C. 87-95.

143. Frouz J., Špaldoňová A., Fričová K., Bartuška M. The effect of earthworms (Lumbricus rubellus) and simulated tillage on soil organic carbon in a long-term microcosm experiment // Soil Biology and Biochemistry. – 2014. – T. 78. – C. 58-64.

144. Gao F., Baraka-Kamali E., Shirtcliffe N., Terrell-Nield C. A preliminary study of the surface properties of earthworms and their relations to non-stain behaviour // Journal of Bionic Engineering. – 2010. – T. 7. – №. 1. – C. 13-18.

145. García-Palacios P., Maestre F. T., Bradford M. A., Reynolds J. F. Earthworms modify plant biomass and nitrogen capture under conditions of soil nutrient heterogeneity and elevated atmospheric CO2 concentrations // Soil Biology and Biochemistry. – 2014. – T. 78. – C. 182-188.

146. Ge Y., Lu H., Wang C., Gao X. Phytoliths in selected broad-leaved trees in China // Scientific reports. – 2020. – T. 10. – №. 1. – C. 15577.

147. Georgiadis A., Marhan S., Lattacher A., Mäder, P., Rennert T. Do earthworms affect the fractionation of silicon in soil? // Pedobiologia. – 2019. – T. 75. – C. 1-7.

148. Groffman P. M., Fahey T. J., Fisk M. C., Yavitt J. B., Sherman R. E., Bohlen P. J., Maerz J. C. Earthworms increase soil microbial biomass carrying capacity and nitrogen retention in northern hardwood forests // Soil Biology and Biochemistry. – 2015. – T. 87. – C. 51-58.

149. Guggenberger G., Thomas R. J., Zech W. Soil organic matter within earthworm casts of an anecic-endogeic tropical pasture community, Colombia // Applied Soil Ecology. – 1996. – T. 3. – №. 3. – C. 263-274.

150. Guhra T., Stolze K., Totsche K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates // Soil Biology and Biochemistry. – 2021. – C. 108483.

151. Guo Y., Fan R., McLaughlin N., Zhang Y., Chen X., Wu D., Zhang X., Liang A. Impacts induced by the combination of earthworms, residue and tillage on soil organic carbon dynamics using 13C labelling technique and X-ray computed tomography // Soil and Tillage Research. – 2021. – T. 205. – C. 104737.

152. Hand P. Hayes W. A., Frankland J. C., Satchell J. E. Vermicomposting of cow slurry // Pedobiologia (Jena). – 1988. – T. 31.– C. 199-209.

153. Harris D., Horwáth W. R., Van Kessel C. Acid fumigation of soils to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis // Soil Science Society of America Journal. – 2001. – T. 65. – №. 6. – C. 1853-1856.

154. Hartenstein F. Hartenstein E; Hartenstein R. Gut load and transit time in the earthworm Eisenia foetida. // Pedobiologia– 1981. –T. 22 – № 1. – C. 5-20

155. Heděnec P., Cajthaml T., Pižl V., Márialigeti K., Tóth E., Borsodi A. K., Frouz J. Long-term effects of earthworms (Lumbricus rubellus Hoffmeister, 1843) on activity and composition of soil microbial community under laboratory conditions // Applied Soil Ecology. – 2020. – T. 150. – C. 103463.

156. Heijnen C. E., Marinissen J. C. Y. Survival of bacteria introduced into soil by means of transport by *Lumbricus rubellus* // Biology and Fertility of Soils. – 1995. – T. 20. – №. 1. – C. 63-69.

157. Hindell R. P., McKenzie B. M., Tisdall J. M. Influence of drying and ageing on the stabilization of earthworm (Lumbricidae) casts // Biology and fertility of soils. – 1997. – T. 25. – №. 1. – C. 27-35.

158. Hoffmeister W. Beitrag zur Kenntnis deutscher Landanneliden //Archiv für Naturgeschichte. – 1843. – T. 9. – №. 1. – C. 183-198.

159. Huang J., Zhang W., Liu M., Briones M. J., Eisenhauer N., Shao Y., Xia H. Different impacts of native and exotic earthworms on rhizodeposit carbon sequestration in a subtropical soil // Soil Biology and Biochemistry. – 2015. – T. 90. – C. 152-160.

160. Huang K., Xia H. Role of earthworms' mucus in vermicomposting system: Biodegradation tests based on humification and microbial activity // Science of the Total Environment. – 2018. – T. 610. – C. 703-708.

161. IUSS Working Group WRB. 2022 World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

162. ISO 11277:2009 Soil quality - Determination of particle size distribution in mineral soil material - Method by sieving and sedimentation. Geneva. International Organization for Standartization.

163. ISO 13320:2009 Particle size analysis — Laser diffraction methods. 2009.

164. ISO 23611-1:2018 Soil quality - Sampling of soil invertebrates - Part 1: Hand-sorting and extraction of earthworms

165. Jégou D., Capowiez Y., Cluzeau D. Interactions between earthworm species in artificial soil cores assessed through the 3D reconstruction of the burrow systems // Geoderma. – 2001. – T. 102. – №. 1-2. – C. 123-137.

166. Jouquet P., Bottinelli N., Podwojewski P., Hallaire V., Duc T. T. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam // Geoderma. – 2008. – T. 146. – №. 1-2. – C. 231-238.

167. Jouquet P., Dauber J., Lagerlöf J., Lavelle P., Lepage M. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops // Applied soil ecology. – 2006. – T. 32. – №. 2. – C. 153-164.

168. Jouquet P., Maron P. A., Nowak V., Duc T. T. Utilization of microbial abundance and diversity as indicators of the origin of soil aggregates produced by earthworms // Soil Biology and Biochemistry. – 2013. – T. 57. – C. 950-952.

169. Józefowska A., Woźnica K., Sokołowska J., Sochan A., Zaleski T., Ryżak M., Bieganowski A. Stability of Aggregates Made by Earthworms in Soils with Organic Additives // Agronomy. – 2021. – T. 11. – №. 3. – C. 421.

170. Kaiser K., Guggenberger G. Mineral surfaces and soil organic matter // European Journal of Soil Science. – 2003. – T. 54. – №. 2. – C. 219-236.

171. Karsten G. R., Drake H. L. Denitrifying bacteria in the earthworm gastrointestinal tract and in vivo emission of nitrous oxide (N (inf2) O) by earthworms // Applied and Environmental Microbiology. – 1997. – T. 63. – №. 5. – C. 1878-1882.

172. Karthikeyan M., Gajalakshmi S., Abbasi S. A. Ingestion of sand and soil by phytophagous earthworm Eudrilus eugeniae: a finding of relevance to earthworm ecology as well as vermitechnology // Archives of Agronomy and Soil Science. – 2014. – Т. 60. – №. 12. – С. 1795-1805.

173. Kholodov V. A., Yaroslavtseva N. V., Farkhodov Y. R., Belobrov V. P., Yudin S. A., Aydiev A. Y., Frid A. S. (Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems in response to the type of their use // Eurasian Soil Science. – 2019. – Т. 52. – №. 2. – С. 162-170.

174. Kızılkaya R. Dehydrogenase activity in Lumbricus terrestris casts and surrounding soil affected by addition of different organic wastes and Zn // Bioresource Technology. – 2008. – Т. 99. – №. 5. – С. 946-953.

175. Knowles M. E., Ross D. S., Görres J. H. Effect of the endogeic earthworm Aporrectodea tuberculata on aggregation and carbon redistribution in uninvaded forest soil columns // Soil Biology and Biochemistry. – 2016. – Т. 100. – С. 192-200.

176. Kolesnikova V. M., Salimgareeva O. A., Ladonin D. V., Vertyankina V. Y., Shelegina A. S. Morphological and Mineralogical Characteristics of Atmospheric Microparticles and Chemical Pollution of Street Dust in the Moscow Region // Atmosphere. – 2023. – Т. 14. – №. 2. – С. 403.

177. Korobushkin D. I., Zaitsev A.S., Degtyarev M. I., Danilova M. A., Filimonova Z. V., Guseva P. A., Pelgunova L.A., Pronina N.A., Tsurikov S.M., Vecherskii M.V., Volkova E.M., Zuev A.G., Saifutdinov R.A. Littoral enchytraeids and Eisenia fetida earthworms facilitate utilization of marine macroalgae as biofertilizers // Applied Soil Ecology. – 2023. – Т. 188. – С. 104882.

178. Krasnoshchekov Y. N., Vishnyakova Z. V., Perevoznikova V. D., Baranchikov Y. N. Ecological and biological features of soils in fir forests defoliated by the Siberian moth in the southern taiga subzone of middle Siberia // Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2003. – Т. 30. – №. 5. – С. 517-524.

179. Kumar S., Chaudhuri S., Maiti S.K. Soil dehydrogenase enzyme activity in natural and mine soil-a review // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – Т. 13. – №. 7. – С. 898-906.

180. Lavelle P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function // Advances in ecological research. – Academic Press, 1997. – Т. 27. – С. 93-132.

181. Lavelle P., Bignell D., Lepage M., Wolters V., Roger P., Ineson P. O. W. H., Dhillion S. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers // European Journal of soil biology. – 1997. – Т. 33. – №. 4. – С. 159-193.

182. Lavelle P., Spain A. V. Soil organisms // Soil Ecology. – 2001. – С. 201-356.

183. Laverack M.S. The Physiology of Earthworms. – 1963. – С. 206.

184. Le Mer G., Jouquet P., Capowiez Y., Maeght J., Tran T. M., Doan T. T., Bottinelli N. Age matters: Dynamics of earthworm casts and burrows produced by the anecic Amynthas khami and their effects on soil water infiltration // Geoderma. – 2021. – Т. 382. – С. 114709.

185. Lee K. E. Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use. – Academic Press Inc. – 1985. – 411 с.

186. Lee K. E., Pankhurst C. E. Soil organisms and sustainable productivity // Soil Research. – 1992. – Т. 30. – №. 6. – С. 855-892.

187. Liu G., Fu B. Agro-ecological engineering in China: A way towards sustainable agriculture // Journal of Environmental Sciences. – 2000. – Т. 12. – №. 4. – С. 422-429.

188. Liu Y., Liu H., Jie D., Gao G., Meng M., Zhang G. Phytolith morphotypes of woody plants and their preservation in soil in the warm temperate humid zones of China // Quaternary International. – 2021. – Т. 599. – С. 158-169.

189. Lyttle A., Yoo K., Hale C., Aufdenkampe A., Sebestyen S. D., Resner K., Blum A. Impact of exotic earthworms on organic carbon sorption on

mineral surfaces and soil carbon inventories in a northern hardwood forest // Ecosystems. – 2015. – Т. 18. – №. 1. – С. 16-29.

190. Ma Y., Filley T. R., Johnston C. T., Crow S. E., Szlavecz K., McCormick M. K. The combined controls of land use legacy and earthworm activity on soil organic matter chemistry and particle association during afforestation // Organic geochemistry. – 2013. – Т. 58. – С. 56-68.

191. Majeed M. Z., Miambi E., Barois I., Blanchart E., Brauman A. Emissions of nitrous oxide from casts of tropical earthworms belonging to different ecological categories // Pedobiologia. – 2013. – Т. 56. – №. 1. – С. 49-58.

192. Makeschin F. Earthworms (Lumbricidae: Oligochaeta): important promoters of soil development and soil fertility // Fauna in soil ecosystems. – CRC Press, 1997. – С. 187-238.

193. Marhan S., Langel R., Kandeler E., Scheu S. Use of stable isotopes (13C) for studying the mobilisation of old soil organic carbon by endogeic earthworms (Lumbricidae) // European Journal of Soil Biology. – 2007. – Т. 43. – С. S201-S208.

194. Marhan S., Scheu S. Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L // Geoderma. – 2005. – Т. 128. – №. 1-2. – С. 155-166.

195. Marinissen J. C. Y., Dexter A. R. Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts // Biology and Fertility of Soils. – 1990. – Т. 9. – №. 2. – С. 163-167.

196. Matthies C., Grießhammer A., Schmittroth M.,Drake H. L. Evidence for involvement of gut-associated denitrifying bacteria in emission of nitrous oxide (N2O) by earthworms obtained from garden and forest soils // Applied and Environmental Microbiology. – 1999. – Т. 65. – №. 8. – С. 3599-3604.

197. 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. – T. 71. – C. 1-6.

198. Medina-Sauza R. M., Álvarez-Jiménez M., Delhal A., Reverchon F., Blouin M., Guerrero-Analco J. A., Barois I. Earthworms building up soil microbiota, a review // Frontiers in Environmental Science. – 2019. – T. 7. – C. 81.
199. Mezger T. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. – European Coatings – 2020. – 529c.
200. Minderman G., Daniels L. Colonization of newly fallen leaves by microorganisms // Progress in soil biology. – 1967. – C. 3-9.
201. Moody S. A., Piearce T. G., Dighton J. Fate of some fungal spores associated with wheat straw decomposition on passage through the guts of Lumbricus terrestris and Aporrectodea longa // Soil Biology and Biochemistry. – 1996. – T. 28. – №. 4-5. – C. 533-537.
202. Nuutinen V., Butt K. R. Earthworm dispersal of plant litter across the surface of agricultural soils // Ecology. – 2019. – T. 100. – №. 7.
203. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. – Springer Science & Business Media – 2007. – 993 c.
204. Parle J. N. A microbiological study of earthworm casts // Microbiology. – 1963. – T. 31. – №. 1. – C. 13-22.
205. Paul B. K., Lubbers I. M., Van Groenigen J. W. Residue incorporation depth is a controlling factor of earthworm-induced nitrous oxide emissions // Global Change Biology. – 2012. – T. 18. – №. 3. – C. 1141-1151.
206. Piearce T.G. Gut contents of some Lumbricid earthworms // Pedobiologia. – 1978. – V. 18. – C. 153-157.

207. Piekarz J., Lipiec J. Selected physical properties and microbial activity of earthworm casts and non-ingested soil aggregates // International agrophysics. – 2001. – T. 15. – №. 3.

208. Pimentel D., Burgess M. Soil erosion threatens food production // Agriculture. – 2013. – T. 3. – №. 3. – C. 443-463.

209. Pulleman M. M., Six J., Van Breemen N., Jongmans A. G. Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity // European Journal of Soil Science. – 2005. – T. 56. – №. 4. – C. 453-467.

210. Römbke J., Jänsch S., Didden W. The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2005. – T. 62. – №. 2. – C. 249-265.

211. Ryley D. J., Khoshaim B. H. A new method of determining the contact angle made by a sessile drop upon a horizontal surface (sessile drop contact angle) // Journal of Colloid and Interface Science. – 1977. – T. 59. – №. 2. – C. 243-251.

212. Sanchez-Hernandez J. C. Biochar activation with exoenzymes induced by earthworms: A novel functional strategy for soil quality promotion // Journal of hazardous materials. – 2018. – T. 350. – C. 136-143.

213. Sanchez-Hernandez J. C., Del Pino J. N., Capowiez Y., Mazzia, C., Rault M. Soil enzyme dynamics in chlorpyrifos-treated soils under the influence of earthworms // Science of the Total Environment. – 2018. – T. 612. – C. 1407-1416.

214. Sanchez-Hernandez J. C., Morcillo S. M., del Pino J. N., Ruiz P. Earthworm activity increases pesticide-sensitive esterases in soil // Soil Biology and Biochemistry. – 2014. – T. 75. – C. 186-196.

215. Satchell J. E. Earthworm microbiology, Earworm ecology from Darwin to vermiculture – London, NY – 1983–496 C.

216. Satchell J. E. Lumbricidae // Soil biology. – 1967. – C.259–322

217. Satchell J. E., Lowe D.G. Selection of leaf litter by Lumbricus terrestris // Progress in soil biology. – 1967. – C.102-119.

218. Savigny J.C. La multiplicité des espèces de ver de terre //Mem. Acad. Sci. Inst. Fr.(Phys.). – 1826. – T. 5. – C. 176-184.

219. Schmidt M. W. I. Torn M. S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I. A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D. A. C., Nannipieri P., Rasse D. P., Weiner S., Trumbore S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // Nature. – 2011. – T. 478. – №. 7367. – C. 49-56.

220. Schmidt M. W. I., Rumpel C., Kögel-Knabner I. Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils // European Journal of Soil Science. – 1999. – T. 50. – №. 1. – C. 87-94.

221. Schmidt O., Doube B. M., Ryder M. H., Killham K. Population dynamics of Pseudomonas corrugata 2140R LUX8 in earthworm food and in earthworm casts // Soil Biology and Biochemistry. – 1997. – T. 29. – №. 3-4. – C. 523-528.

222. Schnürer J., Rosswall T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter // Applied and environmental microbiology. – 1982. – T. 43. – №. 6. – C. 1256-1261.

223. Schomburg A., Verrecchia E. P., Guenat C., Brunner P., Sebag D., Le Bayon, R. C. Rock-Eval pyrolysis discriminates soil macro-aggregates formed by plants and earthworms // Soil Biology and Biochemistry. – 2018. – T. 117. – C. 117-124.

224. Schon N. L., Mackay A. D., Gray R. A., Van Koten C., Dodd M. B. Influence of earthworm abundance and diversity on soil structure and the implications for soil services throughout the season // Pedobiologia. – 2017. – T. 62. – C. 41-47.

225. Schulmann O. P., Tiunov A. V. Leaf litter fragmentation by the earthworm Lumbricus terrestris L // Pedobiologia. – 1999. – Т. 43. – №. 5. – С. 453-458.

226. Scott V.D., Love G. Quantitative electron-probe microanalysis. – 1983. – 313 с.

227. Shang J., Flury M., Harsh J. B., Zollars R. L. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // Journal of colloid and interface science. – 2008. – Т. 328. – №. 2. – С. 299-307.

228. Shein E. V., Lazarev V. I., Aidiev A. Y., Sakunkonchak T., Kuznetsov M. Y., Milanovskii E. Y., Khaidapova D. D. Changes in the physical properties of typical chernozems of Kursk oblast under the conditions of a long-term stationary experiment // Eurasian Soil Science. – 2011. – Т. 44. – №. 10. – С. 1097-1103.

229. Shipitalo M. J., Protz R. Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts // Geoderma. – 1989. – Т. 45. – №. 3-4. – С. 357-374.

230. Sinha R. K., Bharambe G., Chaudhari U. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization // The environmentalist. – 2008. – Т. 28. – №. 4. – С. 409-420.

231. Suthar S. Microbial and decomposition efficiencies of monoculture and polyculture vermireactors, based on epigeic and anecic earthworms // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2008. – Т. 24. – №. 8. – С. 1471-1479.

232. Tanner C. C. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands // Water Science and Technology. – 2001. – Т. 44. – №. 11-12. – С. 9-17.

233. Tao J., Griffiths B., Zhang S., Chen X., Liu M., Hu F., Li H. Effects of earthworms on soil enzyme activity in an organic residue amended rice–

wheat rotation agro-ecosystem // Applied Soil Ecology. – 2009. – T. 42. – №. 3. – C. 221-226.

234. Taubner H., Roth B., Tippkötter R. Determination of soil texture: Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2009. – T. 172. – №. 2. – C. 161-171.

235. Tiwari S. C., Tiwari B. K., Mishra R. R. Microbial populations, enzyme activities and nitrogen-phosphorus-potassium enrichment in earthworm casts and in the surrounding soil of a pineapple plantation // Biology and Fertility of Soils. – 1989. – T. 8. – №. 2. – C. 178-182.

236. Van J. W. Van Groenigen K. J., Koopmans G. F., Stokkermans, L., Vos H. M., Lubbers I. M. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis // Geoderma. – 2019. – T. 338. – C. 525-535

237. Versteegh E. A. A., Black S., Hodson M. E. Carbon isotope fractionation between amorphous calcium carbonate and calcite in earthworm-produced calcium carbonate // Applied Geochemistry. – 2017. – T. 78. – C. 351-356.

238. Vidal A., Watteau F., Remusat L., Mueller C. W., Tu T. T. N., Buegger F., Quenea K. Earthworm cast formation and development: A shift from plant litter to mineral associated organic matter // Frontiers in Environmental Science. – 2019. – T. 7. – C. 55.

239. Wachendorf C., Potthoff M., Ludwig B., Joergensen R. G. Effects of addition of maize litter and earthworms on C mineralization and aggregate formation in single and mixed soils differing in soil organic carbon and clay content // Pedobiologia. – 2014. – T. 57. – №. 3. – C. 161-169.

240. Wang G., Jia Y., Li W. Effects of environmental and biotic factors on carbon isotopic fractionation during decomposition of soil organic matter // Scientific reports. – 2015. – T. 5. – №. 1. – C. 1-11.

241. Wolińska A., Stępniewska Z. Dehydrogenase activity in the soil environment // Dehydrogenases. – 2012. – T. 10. – C. 183-210.

242. Wu W. Baseline studies of the clay minerals society source clays: colloid and surface phenomena // Clays and Clay Minerals. – 2001. – T. 49. – №. 5. – C. 446-452.

243. Yang N., Schützenmeister K., Grubert D., Jungkunst H. F., Gansert D., Scheu S., Pena R. Impacts of earthworms on nitrogen acquisition from leaf litter by arbuscular mycorrhizal ash and ectomycorrhizal beech trees // Environmental and Experimental Botany. – 2015. – T. 120. – C. 1-7.

244. Yudina A. V., Fomin D. S., Kotelnikova A. D., Milanovskii E. Y. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review // Eurasian soil science. – 2018. – T. 51. – №. 11. – C. 1326-1347.

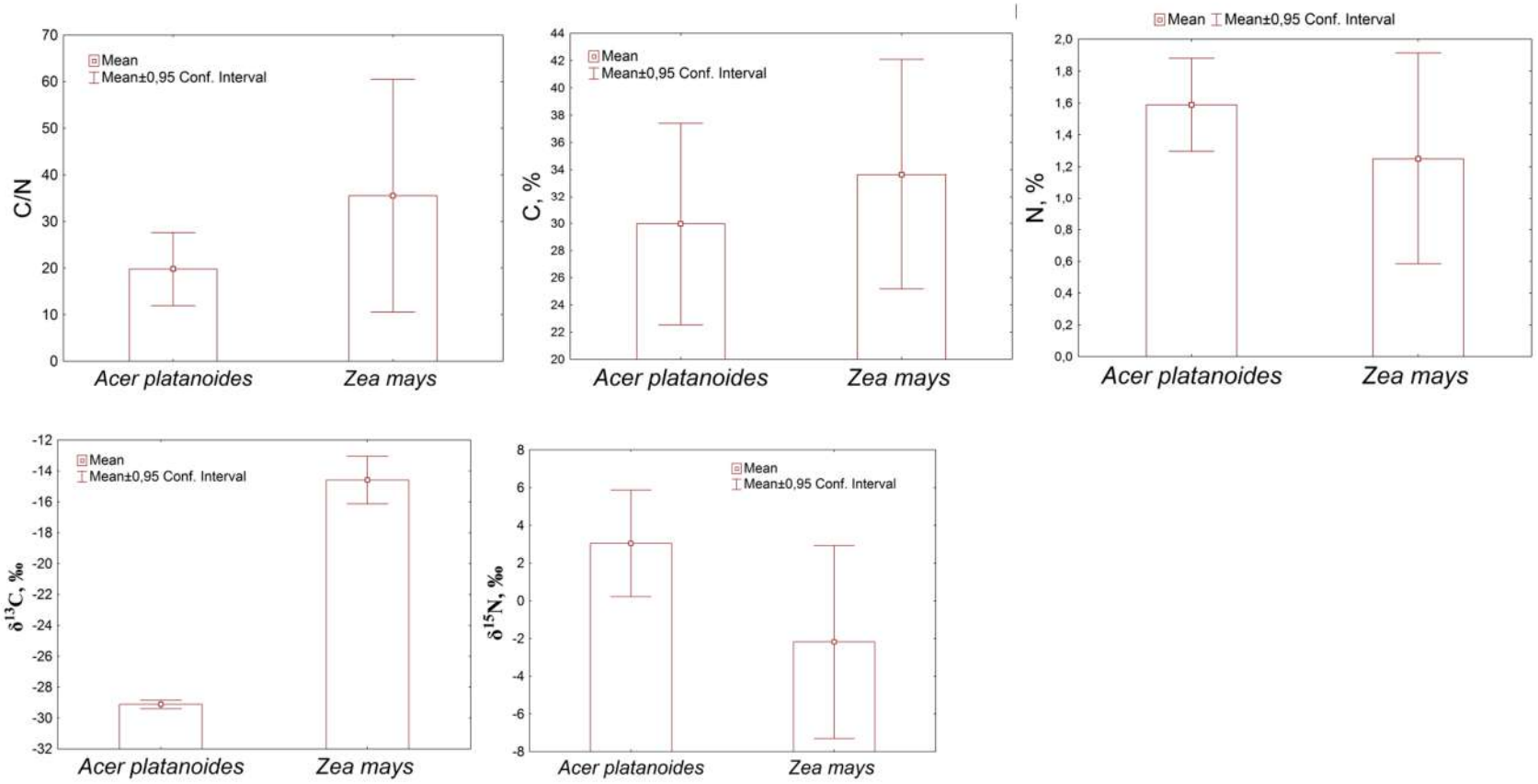
245. Yudina A. V., Milanovskiy E.Y. The microaggregate analysis of soils by the method of laser difraction: the specificities of sample preparation and result interpretation // Bulletin of VV Dokuchaev Soil Science Institute. – 2017. – №. 89. – C. 3-20.

246. Zhang D., Chen Y., Ma Y., Guo L., Sun J., Tong J. Earthworm epidermal mucus: Rheological behavior reveals drag-reducing characteristics in soil // Soil and Tillage Research. – 2016. – T. 158. – C. 57-66.

247. Zhu X. Cai J., Xu X., Xie Z. Discussion on the method for determining BET specific surface area in argillaceous source rocks // Marine and petroleum geology. – 2013. – T. 48. – C. 124-129.

Приложения

Приложение 1. Содержание углерода, азота, изотопов углерода и азота в опаде клена и кукурузы.



Приложение 2. Эксперимент 1 и 2. Результаты сравнения средних по t-критерию для содержание углерода (%)(C, %); содержание азота (%) (N, %); соотношения C/N; изотопная подпись углерода (C ‰), ; изотопная подспиь азота (N ‰). Mean - среднее значение выборки; t-value - значение рассчитанного *t*-критерия Стьюдента; p-level - вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; Std.Dev.1 - стандартное отклонение выборки №1; Std.Dev.2 - стандартное отклонение выборки №2; P, Variances - вероятность справедливости гипотезы о том, что дисперсии сравниваемых выборок не различаются.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	опад клен	**опад кукуруза**						
C, %	30	33,6	-0,839	0,421	7,074	8,057	1,297	0,782
N, %	1,6	1,2	1,203	0,257	0,278	0,633	5,186	0,095
C/N	19,8	35,5	-1,546	0,153	7,475	23,807	10,143	0,024
N ‰	*3,05*	*-2,2*	*2,298*	*0,044*	*2,693*	*4,876*	*3,278*	*0,218*
C ‰	*-29,1*	*-14,6*	*-23,974*	*0,000*	*0,258*	*1,461*	*32,026*	*0,002*
	опад клен	**копролиты А**						
C, %	30	*4,6*	*5,993*	*0,001*	*7,074*	*0,177*	*1595,521*	*0,001*
N, %	1,6	*0,4*	*6,925*	*0,000*	*0,278*	*0,022*	*159,265*	*0,013*
C/N	19,8	10,6	2,050	0,080	7,475	0,590	160,286	0,012
N ‰	*3,05*	5,6	-1,573	0,160	2,693	0,623	18,694	0,103
C ‰	*-29,1*	*-26,3*	*-15,600*	*0,000*	*0,258*	*0,237*	*1,191*	*1,000*

Продолжение приложения 2.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	опад клен	**почва А**						
C, %	30	*4,6*	*6,002*	*0,001*	*7,074*	*0,170*	*1725,295*	*0,001*
N, %	1,6	*0,4*	*7,140*	*0,000*	*0,278*	*0,023*	*152,479*	*0,013*
C/N	19,8	11,5	1,855	0,106	7,475	0,742	101,608	0,020
N ‰	*3,05*	5,6	-1,583	0,157	2,693	0,530	25,824	0,075
C ‰	*-29,1*	*-26,3*	*-17,658*	*0,000*	*0,258*	*0,107*	*5,833*	*0,306*
	опад клен	**копролиты L**						
C, %	30	*4,6*	*6,002*	*0,001*	*7,074*	*0,170*	*1725,295*	*0,001*
N, %	1,6	*0,4*	*7,140*	*0,000*	*0,278*	*0,023*	*152,479*	*0,013*
C/N	19,8	11,5	1,855	0,106	7,475	0,742	101,608	0,020
N ‰	*3,05*	5,6	-1,583	0,157	2,693	0,530	25,824	0,075
C ‰	*-29,1*	*-26,3*	*-17,658*	*0,000*	*0,258*	*0,107*	*5,833*	*0,306*
	опад клен	**почва L**						
C, %	30	*4,9*	*4,748*	*0,003*	*7,074*	*0,308*	*528,837*	*0,066*
N, %	1,6	*0,5*	*5,456*	*0,002*	0,278	0,023	151,458	0,123
C/N	19,8	10,8	1,617	0,157	7,475	0,140	2853,425	0,028
N ‰	*3,05*	5	-0,955	0,377	2,693	0,238	127,693	0,134
C ‰	*-29,1*	*-26,5*	*-10,854*	*0,000*	*0,258*	*0,426*	*2,726*	*0,319*
	опад клен	**почва**						
C, %	30	*4,2*	*6,100*	*0,000*	*7,074*	*0,039*	*32325,718*	*0,000*
N, %	1,6	*0,4*	*7,191*	*0,000*	*0,278*	*0,017*	*278,266*	*0,007*
C/N	19,8	10,6	2,046	0,080	7,475	0,362	426,540	0,005
N ‰	*3,05*	4,5	-0,921	0,388	2,693	0,224	144,863	0,014
C ‰	*-29,1*	*-25,7*	*-21,278*	*0,000*	0,258	0,112	5,339	0,330

Продолжение приложения 2.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	опад клен	**почва с опадом**						
C, %	30	*4,3*	*6,077*	*0,001*	*7,074*	*0,168*	*1776,884*	*0,001*
N, %	1,6	*0,4*	*6,882*	*0,000*	*0,278*	*0,014*	*376,382*	*0,005*
C/N	19,8	9,6	2,276	0,057	7,475	0,372	403,331	0,005
N ‰	*3,05*	4,4	-0,809	0,445	2,693	0,717	14,121	0,135
C ‰	*-29,1*	*-25,8*	*-20,968*	*0,000*	*0,258*	*0,084*	*9,393*	*0,198*
	почва с опадом	**почва**						
C, %	*4,3*	4,2	0,947	0,397	0,168	0,039	18,192	0,104
N, %	*0,4*	*0,4*	*4,068*	*0,015*	0,014	0,017	1,353	0,850
C/N	9,6	*10,6*	*-3,441*	*0,026*	0,372	0,362	1,058	0,972
N ‰	4,4	4,5	-0,378	0,725	0,717	0,224	10,259	0,178
C ‰	*-25,8*	-25,7	-1,244	0,281	0,084	0,112	1,759	0,725
	почва с опадом	**почва А**						
C, %	*4,3*	*4,6*	-2,314	0,082	0,168	0,170	1,030	0,985
N, %	*0,4*	*0,4*	*2,847*	*0,047*	0,014	0,023	2,468	0,577
C/N	9,6	11,5	*-3,904*	*0,017*	*0,372*	*0,742*	*3,969*	*0,402*
N ‰	4,4	5,6	-2,423	0,073	0,717	0,530	1,829	0,707
C ‰	*-25,8*	*-26,3*	*6,197*	*0,003*	*0,084*	*0,107*	*1,610*	*0,766*

Продолжение приложения 2.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	почва с опадом	**копролиты А**						
C, %	*4,3*	4,6	-2,527	0,065	0,168	0,177	1,114	0,946
N, %	*0,4*	0,4	0,530	0,624	0,014	0,022	2,363	0,595
C/N	9,6	10,6	-2,491	0,067	0,372	0,590	2,516	0,569
N ‰	4,4	5,6	-2,259	0,087	0,717	0,623	1,324	0,861
C ‰	*-25,8*	*-26,3*	*3,597*	*0,023*	*0,084*	*0,237*	*7,884*	*0,225*
	почва с опадом	**почва L**						
C, %	*4,3*	*4,9*	*-3,196*	*0,049*	*0,168*	*0,308*	*3,360*	*0,417*
N, %	*0,4*	0,5	-0,784	0,490	0,014	0,023	2,485	0,511
C/N	9,6	*10,8*	*-4,045*	*0,027*	0,372	0,140	7,075	0,514
N ‰	4,4	5	-1,090	0,355	0,717	0,238	9,043	0,458
C ‰	*-25,8*	-26,5	3,030	0,056	0,084	0,426	25,609	0,074
	почва с опадом	**копролиты L**						
C, %	*4,3*	*5,6*	*-6,282*	*0,008*	*0,168*	*0,327*	*3,800*	*0,381*
N, %	*0,4*	0,5	-0,882	0,443	0,014	0,039	7,306	0,228
C/N	9,6	*12,1*	*-7,703*	*0,005*	0,372	0,304	1,501	1,000
N ‰	4,4	4,8	-0,856	0,455	0,717	0,156	21,033	0,305
C ‰	*-25,8*	*-26,9*	*8,047*	*0,004*	*0,084*	*0,232*	*7,594*	*0,221*

Продолжение приложения 2.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	почва	**копролиты А**						
C, %	*4,179*	4,6	*-4,298*	*0,013*	*0,039*	*0,177*	*20,260*	*0,094*
N, %	0,393	0,4	-2,732	0,052	0,017	0,022	1,747	0,728
C/N	10,650	10,6	0,069	0,949	0,362	0,590	2,661	0,546
N ‰	*4,531*	5,6	*-2,813*	*0,048*	*0,224*	*0,623*	*7,749*	*0,229*
C ‰	*-25,708*	*-26,3*	*4,118*	*0,015*	*0,112*	*0,237*	*4,482*	*0,365*
	почва	**почва А**						
C, %	4,2	*4,6*	*-4,099*	*0,015*	0,039	0,170	18,736	0,101
N, %	*0,4*	*0,4*	-0,479	0,657	0,017	0,023	1,825	0,708
C/N	*10,6*	11,5	-1,761	0,153	0,362	0,742	4,198	0,385
N ‰	4,5	5,6	*-3,261*	*0,031*	*0,224*	*0,530*	*5,610*	*0,303*
C ‰	-25,7	*-26,3*	*6,580*	*0,003*	*0,112*	*0,107*	*1,092*	*0,956*
	почва	**копролиты L**						
C, %	4,2	*5,6*	*-8,189*	*0,004*	*0,039*	*0,327*	*69,138*	*0,028*
N, %	*0,4*	0,5	-3,011	0,057	0,017	0,039	5,402	0,291
C/N	*10,6*	*12,1*	*-4,578*	*0,020*	0,362	0,304	1,419	1,000
N ‰	4,5	4,8	-1,606	0,207	0,224	0,156	2,050	0,886
C ‰	-25,7	*-26,9*	*8,157*	*0,004*	*0,112*	*0,232*	*4,317*	*0,347*
	почва	**почва L**						
C, %	4,2	*4,9*	*-4,544*	*0,020*	*0,039*	*0,308*	*61,126*	*0,032*
N, %	*0,4*	*0,5*	*-3,729*	*0,034*	*0,017*	*0,023*	*1,837*	*0,616*
C/N	*10,6*	10,8	-0,465	0,674	0,362	0,140	6,690	0,527
N ‰	4,5	5	-2,080	0,129	0,224	0,238	1,134	0,797
C ‰	-25,7	*-26,5*	*3,369*	*0,043*	0,112	0,426	14,557	0,125

Продолжение приложения 2.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	копролиты A	**почва A**						
C, %	4,6	*4,6*	0,258	0,809	0,177	0,170	1,081	0,961
N, %	0,4	*0,4*	1,970	0,120	0,022	0,023	1,045	0,978
C/N	10,6	11,5	-1,583	0,189	0,590	0,742	1,577	0,776
N ‰	5,6	5,6	-0,018	0,987	0,623	0,530	1,381	0,840
C ‰	*-26,3*	*-26,3*	-0,230	0,829	0,237	0,107	4,896	0,339
	копролиты L	**почва L**						
C, %	5,6	4,9	2,153	0,164	0,327	0,308	1,131	0,961
N, %	0,5	0,5	0,246	0,829	0,039	0,023	2,940	0,672
C/N	*12,1*	*10,8*	*5,522*	*0,031*	0,304	0,140	4,715	0,550
N ‰	4,8	5	-0,673	0,570	0,156	0,238	2,326	0,739
C ‰	-26,9	-26,5	-1,165	0,364	0,232	0,426	3,372	0,635
	копролиты A	**копролиты L**						
C, %	*4,6*	*5,6*	*-4,523*	*0,020*	*0,177*	*0,327*	*3,412*	*0,412*
N, %	0,4	0,5	-1,083	0,358	0,022	0,039	3,092	0,442
C/N	10,6	12,1	-3,125	0,052	0,590	0,304	3,776	0,684
N ‰	5,6	4,8	1,646	0,198	0,623	0,156	15,888	0,349
C ‰	-26,3	-26,9	2,727	0,072	0,237	0,232	1,038	1,000
	почва A	**почва L**						
C, %	*4,6*	4,9	-1,627	0,202	0,170	0,308	3,262	0,425
N, %	*0,4*	0,5	-2,742	0,071	0,023	0,023	1,007	0,843
C/N	11,5	10,8	1,272	0,293	0,742	0,140	28,083	0,265
N ‰	5,6	5	1,565	0,216	0,530	0,238	4,945	0,606
C ‰	*-26,3*	-26,5	0,922	0,424	0,107	0,426	15,902	0,115

Приложение 3. Эксперимент 3. Результаты сравнения средних по t-критерию для содержание углерода (%)(C, %); содержание азота (%) (N, %); соотношения C/N; изотопная подпись углерода (C ‰), ; изотопная подспиь азота (N ‰).. Mean - среднее значение выборки; t-value - значение рассчитанного *t*-критерия Стьюдента; p-level - вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; Std.Dev.1 - стандартное отклонение выборки №1; Std.Dev.2 - стандартное отклонение выборки №2; P, Variances - вероятность справедливости гипотезы о том, что дисперсии сравниваемых выборок не различаются.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	опад	**почва**						
C, %	*33,6*	*3,2*	*5,075*	*0,002*	*8,057*	*0,120*	*4489,094*	*0,023*
N, %	1,3	0,3	1,984	0,095	0,633	0,013	2539,079	0,030
C/N	35,6	10,1	1,433	0,202	23,807	0,791	905,244	0,050
N ‰	-2,2	4,7	-1,891	0,108	4,876	0,143	1169,586	0,044
C ‰	*-14,6*	*-25,7*	*10,127*	*0,000*	*1,461*	*0,012*	*14755,130*	*0,013*
	опад	**почва с опадом**						
C, %	*33,6*	*3,2*	*5,065*	*0,002*	*8,057*	*0,080*	*10154,727*	*0,015*
N, %	1,3	0,3	1,938	0,101	0,633	0,048	175,948	0,114
C/N	35,5	9,7	1,455	0,196	23,807	1,151	427,941	0,073
N ‰	-2,2	3,3	-1,516	0,180	4,876	0,693	49,568	0,215
C ‰	*-14,6*	*-25,5*	*10,008*	*0,000*	*1,461*	*0,107*	*188,049*	*0,111*

Продолжение приложения 3.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	Опад	**почва А**						
C, %	*33,6*	*3,8*	*6,198*	*0,000*	*8,057*	*0,255*	*999,363*	*0,002*
N, %	*1,3*	*0,3*	*2,457*	*0,044*	*0,633*	*0,018*	*1202,048*	*0,002*
C/N	35,5	11,8	1,663	0,140	23,807	0,443	2892,653	0,001
N ‰	*-2,2*	*5,4*	*-2,584*	*0,036*	*4,876*	*0,868*	*31,562*	*0,062*
C ‰	*-14,6*	*-23,4*	*9,790*	*0,000*	*1,461*	*0,608*	*5,776*	*0,308*
	Опад	**копролиты А**						
C, %	*33,6*	*3,7*	*6,212*	*0,000*	*8,057*	*0,040*	*41016,318*	*0,000*
N, %	1,3	0,4	2,339	0,052	0,633	0,018	1246,378	0,002
C/N	35,5	10,3	1,777	0,119	23,807	0,412	3337,734	0,001
N ‰	*-2,2*	*4,8*	*-2,402*	*0,047*	*4,876*	*0,332*	*215,733*	*0,009*
C ‰	*-14,6*	*-24*	*10,667*	*0,000*	*1,461*	*0,249*	*34,490*	*0,057*
	почва с опадом	**почва**						
C, %	3,2	3,2	0,585	0,618	0,080	0,120	2,262	0,747
N, %	0,3	0,3	0,607	0,606	0,048	0,013	14,431	0,328
C/N	9,7	10,1	-0,401	0,727	1,151	0,791	2,115	0,767
N ‰	3,3	4,7	-2,705	0,114	0,693	0,143	23,596	0,259
C ‰	-25,5	-25,6	1,640	0,243	0,107	0,012	78,464	0,143

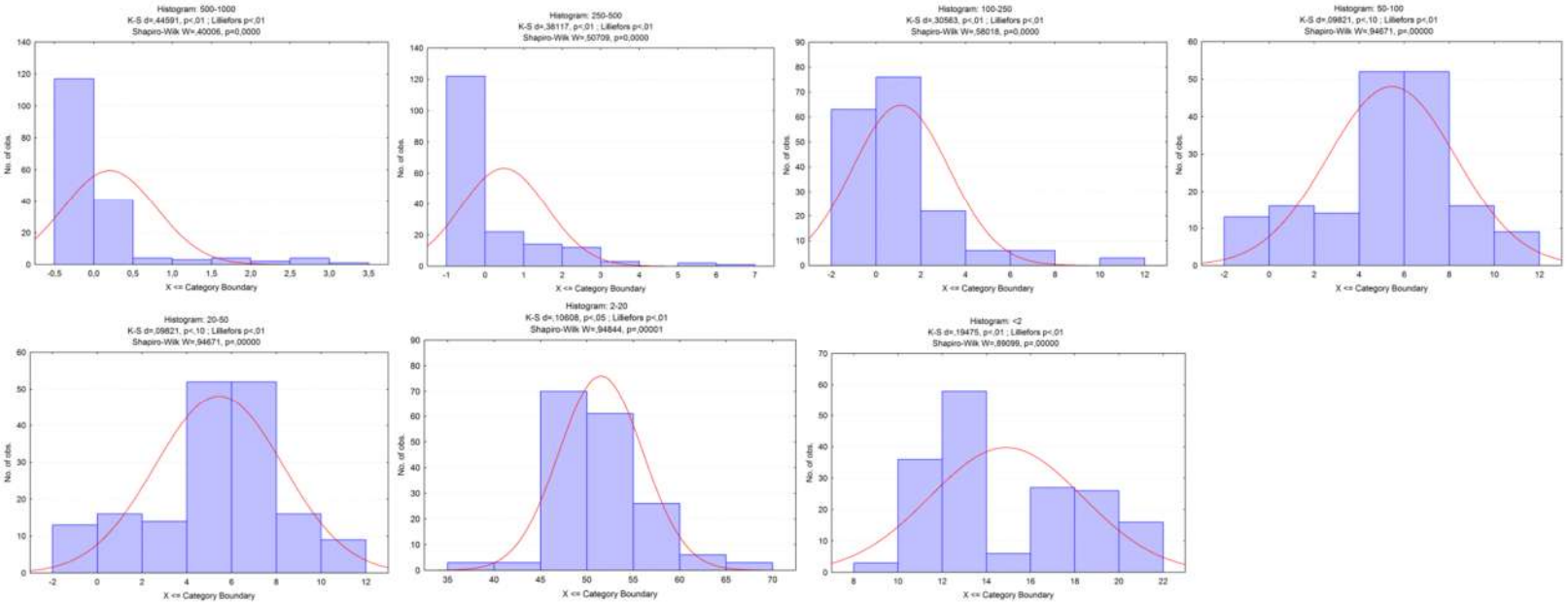
Продолжение приложения 3.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	почва с опадом	**почва А**						
C, %	3,2	3,8	-2,933	0,061	0,080	0,255	10,161	0,433
N, %	0,3	0,3	0,525	0,636	0,048	0,018	6,832	0,241
C/N	9,7	11,9	-3,133	0,052	1,151	0,443	6,759	0,243
N ‰	3,3	5,4	-2,768	0,070	0,693	0,868	1,570	0,983
C ‰	*-25,5*	*-23,4*	*-4,522*	*0,020*	*0,107*	*0,608*	*32,558*	*0,246*
	почва с опадом	**копролиты А**						
C, %	*3,2*	*3,7*	*-9,874*	*0,002*	*0,080*	*0,040*	*4,039*	*0,364*
N, %	0,3	0,4	-1,049	0,371	0,048	0,018	7,084	0,234
C/N	9,7	10,3	-0,791	0,487	1,151	0,412	7,800	0,216
N ‰	*3,3*	*4,8*	*-3,370*	*0,043*	*0,693*	*0,332*	*4,352*	*0,345*
C ‰	*-25,5*	*-24*	*-7,933*	*0,004*	*0,107*	*0,249*	*5,452*	*0,580*
	почва	**почва А**						
C, %	3,2	3,8	-3,148	0,051	0,120	0,255	4,492	0,633
N, %	0,3	0,3	-0,406	0,712	0,013	0,018	2,112	0,875
C/N	*10,1*	*11,9*	*-3,324*	*0,045*	*0,791*	*0,443*	*3,195*	*0,432*
N ‰	4,7	5,4	-1,081	0,359	0,143	0,868	37,056	0,231
C ‰	*-25,6*	*-23,4*	*-4,831*	*0,017*	*0,012*	*0,608*	*2554,647*	*0,028*

Продолжение приложения 3.

	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
	Почва	**копролиты А**						
C, %	*3,2*	*3,7*	*-8,125*	*0,004*	*0,120*	*0,040*	*9,137*	*0,188*
N, %	*0,3*	*0,4*	*-3,422*	*0,042*	*0,013*	*0,018*	*2,037*	*0,888*
C/N	10,1	10,3	-0,274	0,802	0,791	0,412	3,687	0,390
N ‰	4,7	4,8	-0,517	0,641	0,143	0,332	5,421	0,581
C ‰	*-25,6*	*-24*	*-8,954*	*0,003*	*0,012*	*0,249*	*427,807*	*0,068*
	почва А	**копролиты А**						
C, %	3,8	3,7	0,416	0,699	0,255	0,040	41,042	0,048
N, %	*0,3*	*0,4*	*-3,039*	*0,038*	*0,018*	*0,018*	*1,037*	*0,982*
C/N	*11,9*	*10,3*	*4,655*	*0,010*	*0,443*	*0,412*	*1,154*	*0,929*
N ‰	5,4	4,8	1,063	0,348	0,868	0,332	6,835	0,255
C ‰	-23,4	-24	1,392	0,236	0,608	0,249	5,971	0,287

Приложение 4. Гранулометрический состав. Проверка на нормальность



Приложение 5. Сравнение средних % содержания гранулометрических фракций по U-критериюМанна-Уитни. Z – значение переменной нормального распределения (нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни); U – рассчитанный критерий Манна-Уитни; Z adjusted – скорректированная нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни; p-level 1 – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; p-level 2 – аппроксимацию стандартным нормальным распределением для двусторонней вероятности.

с органическим веществом

копролиты A & копролиты L

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	*67*	*5,508*	*0,000*	*5,508*	*0,000*	*0,000*
2-20	*206*	*3,410*	*0,001*	*3,410*	*0,001*	*0,000*
20-50	*250*	*-2,746*	*0,006*	*-2,746*	*0,006*	*0,006*
50-100	*250*	*-2,746*	*0,006*	*-2,746*	*0,006*	*0,006*
100-250	*173*	*-3,908*	*0,000*	*-3,928*	*0,000*	*0,000*
250-500	*145*	*-4,331*	*0,000*	*-4,569*	*0,000*	*0,000*
500-1000	*184*	*-3,742*	*0,000*	*-3,826*	*0,000*	*0,000*

копролиты A & почва с опадом

<2	155	1,452	0,146	1,452	0,146	0,152
2-20	195	-0,500	0,617	-0,500	0,617	0,630
20-50	208	-0,190	0,849	-0,190	0,849	0,860
50-100	208	-0,190	0,849	-0,190	0,849	0,860
100-250	181	-0,833	0,405	-0,837	0,403	0,416
250-500	200	-0,381	0,703	-0,438	0,661	0,716
500-1000	191	0,595	0,552	0,637	0,524	0,564

Продолжение приложения 5.

копролиты A & почва

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	*79*	*-3,262*	*0,001*	*-3,262*	*0,001*	*0,001*
2-20	*97*	*-2,833*	*0,005*	*-2,833*	*0,005*	*0,004*
20-50	*131*	*2,024*	*0,043*	*2,024*	*0,043*	*0,043*
50-100	*131*	*2,024*	*0,043*	*2,024*	*0,043*	*0,043*
100-250	*127*	*2,119*	*0,034*	*2,152*	*0,031*	*0,034*
250-500	*144*	*1,714*	*0,086*	*2,254*	*0,024*	*0,089*
500-1000	181	0,833	0,405	0,885	0,376	0,416

копролиты L & почва с опадом

<2	*36*	*-3,624*	*0,000*	*-3,624*	*0,000*	*0,000*
2-20	*63*	*-2,718*	*0,007*	*-2,718*	*0,007*	*0,006*
20-50	90	1,812	0,070	1,812	0,070	0,072
50-100	90	1,812	0,070	1,812	0,070	0,072
100-250	*46*	*3,289*	*0,001*	*3,290*	*0,001*	*0,001*
250-500	*48*	*3,222*	*0,001*	*3,256*	*0,001*	*0,001*
500-1000	*47*	*3,255*	*0,001*	*3,302*	*0,001*	*0,001*

копролиты L & почва

<2	*0*	*-4,832*	*0,000*	*-4,832*	*0,000*	*0,000*
2-20	*45*	*-3,322*	*0,001*	*-3,322*	*0,001*	*0,001*
20-50	*27*	*3,926*	*0,000*	*3,926*	*0,000*	*0,000*
50-100	*27*	*3,926*	*0,000*	*3,926*	*0,000*	*0,000*
100-250	*29*	*3,876*	*0,000*	*3,897*	*0,000*	*0,000*
250-500	*24*	*4,027*	*0,000*	*4,216*	*0,000*	*0,000*
500-1000	*36*	*3,624*	*0,000*	*3,664*	*0,000*	*0,000*

Продолжение приложения 5.

почва с опадом & почва

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	*11*	*-3,522*	*0,000*	*-3,522*	*0,000*	*0,000*
2-20	*38*	*-1,963*	*0,050*	*-1,963*	*0,050*	*0,052*
20-50	*23*	*2,829*	*0,005*	*2,829*	*0,005*	*0,004*
50-100	*23*	*2,829*	*0,005*	*2,829*	*0,005*	*0,004*
100-250	*9*	*3,637*	*0,000*	*3,653*	*0,000*	*0,000*
250-500	*36*	*2,078*	*0,038*	*2,732*	*0,006*	*0,039*
500-1000	68	0,231	0,817	0,252	0,801	0,843

без органического вещества

копролиты A & копролиты L

<2	326	1,879	0,060	1,879	0,060	0,061
2-20	*287*	*-2,442*	*0,015*	*-2,442*	*0,015*	*0,014*
20-50	383	1,055	0,291	1,060	0,289	0,297
50-100	383	1,055	0,291	1,060	0,289	0,297
100-250	411	0,658	0,511	0,698	0,485	0,514
250-500	367	1,293	0,196	1,767	0,077	0,197
500-1000	*348*	*1,561*	*0,119*	*2,547*	*0,011*	*0,121*

Продолжение приложения 5.

копролиты A & почва с опадом

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	162	-1,499	0,134	-1,499	0,134	0,138
2-20	*169*	*-1,340*	*0,180*	*-1,340*	*0,180*	*0,186*
20-50	204	-0,545	0,586	-0,545	0,586	0,598
50-100	204	-0,545	0,586	-0,545	0,586	0,598
100-250	266	0,010	0,992	0,011	0,991	0,992
250-500	219	0,970	0,332	1,275	0,202	0,341
500-1000	*203*	*1,300*	*0,194*	*1,971*	*0,049*	*0,200*

копролиты A & почва

<2	211	-1,135	0,257	-1,135	0,257	0,264
2-20	*147*	*-2,455*	*0,014*	*-2,455*	*0,014*	*0,013*
20-50	224	0,866	0,386	0,867	0,386	0,396
50-100	224	0,866	0,386	0,867	0,386	0,396
100-250	211	1,762	0,078	1,883	0,060	0,080
250-500	*216*	*1,667*	*0,096*	*2,369*	*0,018*	*0,098*
500-1000	*232*	*1,364*	*0,173*	*2,101*	*0,036*	*0,177*

копролиты L & почва с опадом

<2	104	-1,342	0,179	-1,342	0,179	0,188
2-20	90	1,812	0,070	1,812	0,070	0,072
20-50	127	-0,570	0,568	-0,575	0,565	0,585
50-100	127	-0,570	0,568	-0,575	0,565	0,585
100-250	142	-0,802	0,423	-0,848	0,396	0,427
250-500	163	-0,151	0,880	-0,258	0,797	0,893
500-1000	168	0,000	1,000			

Продолжение приложения 5.

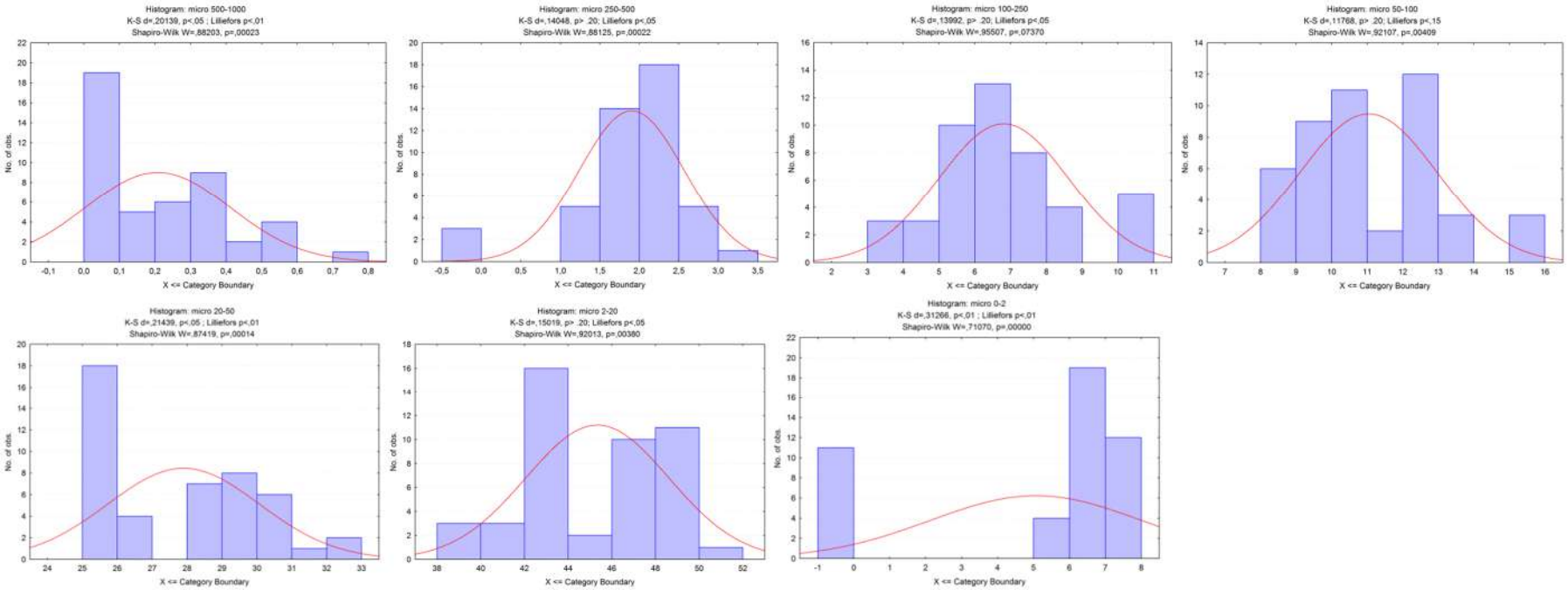
копролиты L & почва

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	*94*	*-2,239*	*0,025*	*-2,239*	*0,025*	*0,025*
2-20	121	1,422	0,155	1,422	0,155	0,161
20-50	157	-0,333	0,739	-0,335	0,738	0,754
50-100	157	-0,333	0,739	-0,335	0,738	0,754
100-250	160	0,883	0,377	0,982	0,326	0,389
250-500	168	0,663	0,508	1,451	0,147	0,521
500-1000	192	0,000	1,000			

почва с опадом & почва

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	83	-0,051	0,959	-0,051	0,959	0,980
2-20	57	-1,389	0,165	-1,389	0,165	0,176
20-50	59	1,286	0,198	1,286	0,198	0,212
50-100	59	1,286	0,198	1,286	0,198	0,212
100-250	*64*	*1,995*	*0,046*	*2,133*	*0,033*	*0,047*
250-500	96	0,665	0,506	1,538	0,124	0,525
500-1000	112	0,000	1,000			

Приложение 6. Микроагрегатный анализ. Проверка на нормальность



Приложение 7. Сравнение средних % содержания микроагрегатов по U-критерию Манна-Уитни. Z – значение переменной нормального распределения (нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни); U – рассчитанный критерий Манна-Уитни; Z adjusted – скорректированная нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни; p-level 1 – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; p-level 2 – аппроксимацию стандартным нормальным распределением для двусторонней вероятности; 2*1 sided exact p - вероятность p равна 1 минус кумулятивная односторонняя вероятность статистики Манна – Уитни.

копролиты A & копролиты L

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	0	-3,838	*0,0001*	-3,843	0,0001	0,000
2-20	0	-3,838	*0,0001*	-3,838	0,0001	0,000
20-50	0	3,838	*0,0001*	3,838	0,0001	0,000
50-100	0	3,838	*0,0001*	3,838	0,0001	0,000
100-250	27	1,919	0,0550	1,919	0,0550	0,058
250-500	48	-0,426	0,6698	-0,427	0,6694	0,702
500-1000	45	-0,640	0,5224	-0,640	0,5224	0,554

копролиты A & почва с опадом

<2	0	-3,162	*0,0016*	-3,170	0,0015	0,000
2-20	15	1,581	0,1138	1,581	0,1138	0,130
20-50	0	3,162	*0,0016*	3,162	0,0016	0,000
50-100	18	1,265	0,2059	1,265	0,2059	0,234
100-250	0	-3,162	*0,0016*	-3,162	0,0016	0,000
250-500	15	-1,581	0,1138	-1,585	0,1130	0,130
500-1000	18	1,265	0,2059	1,265	0,2059	0,234

Продолжение приложения 7.

копролиты А & почва

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	12	0,866	0,3865	0,869	0,3848	0,448
2-20	11	1,010	0,3123	1,010	0,3123	0,365
20-50	2	2,309	*0,0209*	2,309	0,0209	0,018
50-100	0	2,598	*0,0094*	2,598	0,0094	0,004
100-250	3	-2,165	*0,0304*	-2,165	0,0304	0,031
250-500	4	-2,021	*0,0433*	-2,028	0,0426	0,048
500-1000	14	0,577	0,5637	0,577	0,5637	0,633

копролиты А & почва А

<2	57	1,389	0,1649	1,444	0,1487	0,176
2-20	27	-2,932	*0,0034*	-2,932	0,0034	0,003
20-50	36	2,469	*0,0136*	2,469	0,0136	0,013
50-100	18	3,395	*0,0007*	3,395	0,0007	0,000
100-250	83	-0,051	0,9590	-0,051	0,9590	0,980
250-500	50	-1,749	0,0803	-1,750	0,0801	0,085
500-1000	58	-1,337	0,1811	-1,337	0,1811	0,193

копролиты А & почва L

<2	0	-2,598	*0,0094*	-2,607	0,0091	0,004
2-20	0	-2,598	*0,0094*	-2,598	0,0094	0,004
20-50	0	2,598	*0,0094*	2,598	0,0094	0,004
50-100	0	2,598	*0,0094*	2,598	0,0094	0,004
100-250	9	1,299	0,1939	1,299	0,1939	0,233
250-500	9	1,299	0,1939	1,304	0,1923	0,233
500-1000	15	-0,433	0,6650	-0,433	0,6650	0,734

Продолжение приложения 7.

копролиты L & почва с опадом

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	0	3,000	*0,0027*	3,000	0,0027	0,001
2-20	0	3,000	*0,0027*	3,000	0,0027	0,001
20-50	15	-1,000	0,3173	-1,000	0,3173	0,364
50-100	0	-3,000	*0,0027*	-3,000	0,0027	0,001
100-250	0	-3,000	*0,0027*	-3,000	0,0027	0,001
250-500	0	-3,000	*0,0027*	-3,000	0,0027	0,001
500-1000	4	2,467	*0,0136*	2,467	0,0136	0,012

копролиты L & почва

<2	0	2,496	*0,0126*	2,496	0,0126	0,009
2-20	0	2,496	*0,0126*	2,496	0,0126	0,009
20-50	0	-2,496	*0,0126*	-2,496	0,0126	0,009
50-100	0	-2,496	*0,0126*	-2,496	0,0126	0,009
100-250	0	-2,496	*0,0126*	-2,496	0,0126	0,009
250-500	0	-2,496	*0,0126*	-2,496	0,0126	0,009
500-1000	6	1,387	0,1655	1,387	0,1655	0,209

копролиты L & почва L

<2	9	0,832	0,4054	0,832	0,4054	0,482
2-20	10	-0,647	0,5175	-0,647	0,5175	0,600
20-50	0	-2,496	*0,0126*	-2,496	0,0126	0,009
50-100	1	2,311	*0,0208*	2,311	0,0208	0,018
100-250	0	2,496	*0,0126*	2,496	0,0126	0,009
250-500	0	2,496	*0,0126*	2,496	0,0126	0,009
500-1000	13	0,092	0,9263	0,092	0,9263	1,000

Продолжение приложения 7.

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
			копролиты L & почва A			
<2	0	3,969	*0,0001*	4,054	0,0001	0,000
2-20	0	3,969	*0,0001*	3,969	0,0001	0,000
20-50	35	-1,764	0,0778	-1,764	0,0778	0,083
50-100	0	-3,969	*0,0001*	-3,969	0,0001	0,000
100-250	1	-3,906	*0,0001*	-3,906	0,0001	0,000
250-500	14	-3,087	*0,0020*	-3,087	0,0020	0,001
500-1000	40	-1,449	0,1474	-1,449	0,1474	0,159
			Почва & почва с опадом			
<2	0	-2,236	*0,0253*	-2,236	0,0253	0,036
2-20	6	0,447	0,6547	0,447	0,6547	0,786
20-50	0	2,236	*0,0253*	2,236	0,0253	0,036
50-100	0	-2,236	*0,0253*	-2,236	0,0253	0,036
100-250	0	-2,236	*0,0253*	-2,236	0,0253	0,036
250-500	3	1,342	0,1797	1,342	0,1797	0,250
500-1000	4	1,043	0,2967	1,043	0,2967	0,393
			почва A & почва L			
<2	0	-2,646	*0,0082*	-2,793	0,0052	0,003
2-20	0	-2,646	*0,0082*	-2,646	0,0082	0,003
20-50	10	-1,386	0,1658	-1,386	0,1658	0,197
50-100	0	2,646	*0,0082*	2,646	0,0082	0,003
100-250	0	2,646	*0,0082*	2,646	0,0082	0,003
250-500	0	2,646	*0,0082*	2,646	0,0082	0,003
500-1000	14	0,882	0,3778	0,882	0,3778	0,432

Продолжение приложения 7.

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
			почва А & почва			
<2	9	-1,512	0,1306	-1,596	0,1104	0,156
2-20	9	1,512	0,1306	1,512	0,1306	0,156
20-50	9	-1,512	0,1306	-1,512	0,1306	0,156
50-100	9	-1,512	0,1306	-1,512	0,1306	0,156
100-250	0	-2,646	*0,0082*	-2,646	0,0082	0,003
250-500	3	-2,268	*0,0233*	-2,268	0,0233	0,021
500-1000	3	2,268	*0,0233*	2,268	0,0233	0,021
			почва А & почва с опадом			
<2	15	-1,852	0,0641	-1,924	0,0544	0,070
2-20	15	1,852	0,0641	1,852	0,0641	0,070
20-50	30	-0,463	0,6434	-0,463	0,6434	0,687
50-100	15	-1,852	0,0641	-1,852	0,0641	0,070
100-250	0	-3,240	*0,0012*	-3,240	0,0012	0,000
250-500	11	-2,222	*0,0263*	-2,222	0,0263	0,026
500-1000	0	3,240	*0,0012*	3,240	0,0012	0,000
			почва L & почва			
<2	0	1,964	*0,0495*	1,964	0,0495	0,100
2-20	0	1,964	*0,0495*	1,964	0,0495	0,100
20-50	2	-1,091	0,2752	-1,091	0,2752	0,400
50-100	0	-1,964	*0,0495*	-1,964	0,0495	0,100
100-250	0	-1,964	*0,0495*	-1,964	0,0495	0,100
250-500	0	-1,964	*0,0495*	-1,964	0,0495	0,100
500-1000	1	1,528	0,1266	1,528	0,1266	0,200

Продолжение приложения 7.

почва L & почва с опадом

мкм	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
<2	0	2,236	*0,0253*	2,236	0,0253	0,036
2-20	0	2,236	*0,0253*	2,236	0,0253	0,036
20-50	0	2,236	*0,0253*	2,236	0,0253	0,036
50-100	0	-2,236	*0,0253*	-2,236	0,0253	0,036
100-250	0	-2,236	*0,0253*	-2,236	0,0253	0,036
250-500	0	-2,236	*0,0253*	-2,236	0,0253	0,036
500-1000	0	2,236	*0,0253*	2,236	0,0253	0,036

Приложение 8. Реология. Результаты сравнения средних по t-критерию для реологических параметров: процент деформации, G′ – модуль упругости,) G″ – модуль вязкости, LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости,) G′=G″ – точка разрушения структуры. Mean - среднее значение выборки; t-value - значение рассчитанного t-критерия Стьюдента; p-level - вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; Std.Dev.1 - стандартное отклонение выборки №1; Std.Dev.2 - стандартное отклонение выборки №2; P, Variances - вероятность справедливости гипотезы о том, что дисперсии сравниваемых выборок не различаются.

	Почва с опадом	**Почва**						
	Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
Деформация [%]	0,008440	0,006467	1,388	0,237	0,002	0,001	2,212	0,623
LVE-range [Pa]	17,9	16,7	0,560	0,605	2,252	2,951	1,718	0,736
G' [Pa]	221666,7	258666,7	-0,851	0,443	69859,383	28183,920	6,144	0,280
G" [Pa]	26266,7	32933,3	-1,140	0,318	9757,220	2715,388	12,912	0,144
Crossover G'=G"[Pa]	11390,3	10753,7	0,159	0,881	5819,113	3758,906	2,397	0,589
Crossover Gamma[%]	1,5	1,5	-0,075	0,944	0,60	0,33	3,406	0,454
	Почва с опадом	**Копролиты А**						
Деформация [%]	0,008440	0,005673	1,946	0,124	0,002	0,001	2,212	0,623
LVE-range [Pa]	*17,9*	*12,4*	*3,511*	*0,025*	*2,252*	*1,513*	*2,214*	*0,622*
G' [Pa]	221666,7	220666,7	0,023	0,982	69859,383	24826,062	7,918	0,224
G" [Pa]	26266,7	30666,7	-0,716	0,514	9757,220	4271,222	5,219	0,322
Crossover G'=G"[Pa]	11390,3	5473,3	1,633	0,178	5819,113	2348,876	6,138	0,280
Crossover Gamma[%]	1,5	2,1	-1,243	0,282	0,60	0,68	1,260	0,885

Продолжение приложения 8.

мкм	Rank Sum 1	Rank Sum 2	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
	Почва с опадом	**Копролиты L**						
Деформация [%]	0,008440	0,007260	0,775	0,495	0,002	0,000	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	17,9	13,5	2,599	0,080	2,252	0,424	28,167	0,264
G' [Pa]	221666,7	184000,0	0,722	0,522	69859,383	5656,854	152,510	0,114
G" [Pa]	26266,7	27100,0	-0,112	0,918	9757,220	2969,848	10,794	0,421
Crossover G'=G"[Pa]	11390,3	6102,5	1,200	0,316	5819,113	1478,560	15,489	0,354
Crossover Gamma[%]	1,5	2,2	-1,665	0,194	0,60	0,120	25,441	0,278
	Почва	**Копролиты A**						
Деформация [%]	0,006467	0,005673	0,707	0,519	0,001	0,001	1,000	1,000
LVE-range [Pa]	16,7	12,4	2,246	0,088	2,951	1,513	3,803	0,416
G' [Pa]	258666,7	220666,7	1,752	0,155	28183,920	24826,062	1,289	0,874
G" [Pa]	32933,3	30666,7	0,776	0,481	2715,388	4271,222	2,474	0,576
Crossover G'=G"[Pa]	10753,7	5473,3	2,063	0,108	3758,906	2348,876	2,561	0,562
Crossover Gamma[%]	1,5	2,1	-1,430	0,226	0,33	0,68	4,290	0,378
	Почва	**Копролиты L**						
Деформация [%]	0,006467	0,007260	-0,775	0,495	0,001	0,000	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	16,7	13,5	1,447	0,244	2,951	0,424	48,389	0,202
G' [Pa]	*258666,7*	*184000,0*	*3,519*	*0,039*	*28183,920*	*5656,854*	*24,823*	*0,281*
G" [Pa]	32933,3	27100,0	2,280	0,107	2715,388	2969,848	1,196	0,776
Crossover G'=G"[Pa]	10753,7	6102,5	1,599	0,208	3758,906	1478,560	6,463	0,536
Crossover Gamma[%]	1,5	2,2	-2,887	0,063	0,33	0,120	7,469	0,501

Продолжение приложения 8.

мкм	Rank Sum 1	Rank Sum 2	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
	Копролиты A	**Копролиты L**						
Деформация [%]	0,005673	0,007260	-1,549	0,219	0,001	0,000	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	12,4	13,5	-0,957	0,409	1,513	0,424	12,722	0,389
G' [Pa]	220666,7	184000,0	1,956	0,145	24826,062	5656,854	19,260	0,318
G" [Pa]	30666,7	27100,0	1,005	0,389	4271,222	2969,848	2,068	0,882
Crossover G'=G"[Pa]	5473,3	6102,5	-0,328	0,764	2348,876	1478,560	2,524	0,813
Crossover Gamma[%]	2,1	2,2	-0,208	0,849	0,68	0,120	32,046	0,248
	Копролиты L	**Почва L**						
Деформация [%]	0,007260	0,007260			0,000	0,000		
LVE-range [Pa]	*13,5*	*17,6*	*-8,200*	*0,015*	*0,424*	*0,566*	*1,778*	*0,819*
G' [Pa]	*184000,0*	*240500,0*	*-8,308*	*0,014*	*5656,854*	*7778,175*	*1,891*	*0,801*
G" [Pa]	27100,0	31650,0	-2,096	0,171	2969,848	777,817	14,579	0,326
Crossover G'=G"[Pa]	*6102,5*	*11515,0*	*-4,957*	*0,038*	*1478,560*	*445,477*	*11,016*	*0,373*
Crossover Gamma[%]	*2,2*	*1,6*	*7,847*	*0,016*	*0,120*	*0,035*	*11,424*	*0,366*
	Копролиты A	**Почва A**						
Деформация [%]	0,005673	0,006467	-0,707	0,519	0,001	0,001	1,000	1,000
LVE-range [Pa]	12,4	15,0	-1,432	0,225	1,513	2,802	3,429	0,452
G' [Pa]	220666,7	231333,3	-0,663	0,544	24826,062	12662,280	3,844	0,413
G" [Pa]	30666,7	29500,0	0,432	0,688	4271,222	1900,000	5,054	0,330
Crossover G'=G"[Pa]	5473,3	9447,3	-2,616	0,059	2348,876	1185,972	3,923	0,406
Crossover Gamma[%]	2,1	1,5	1,442	0,223	0,68	0,26	6,831	0,255

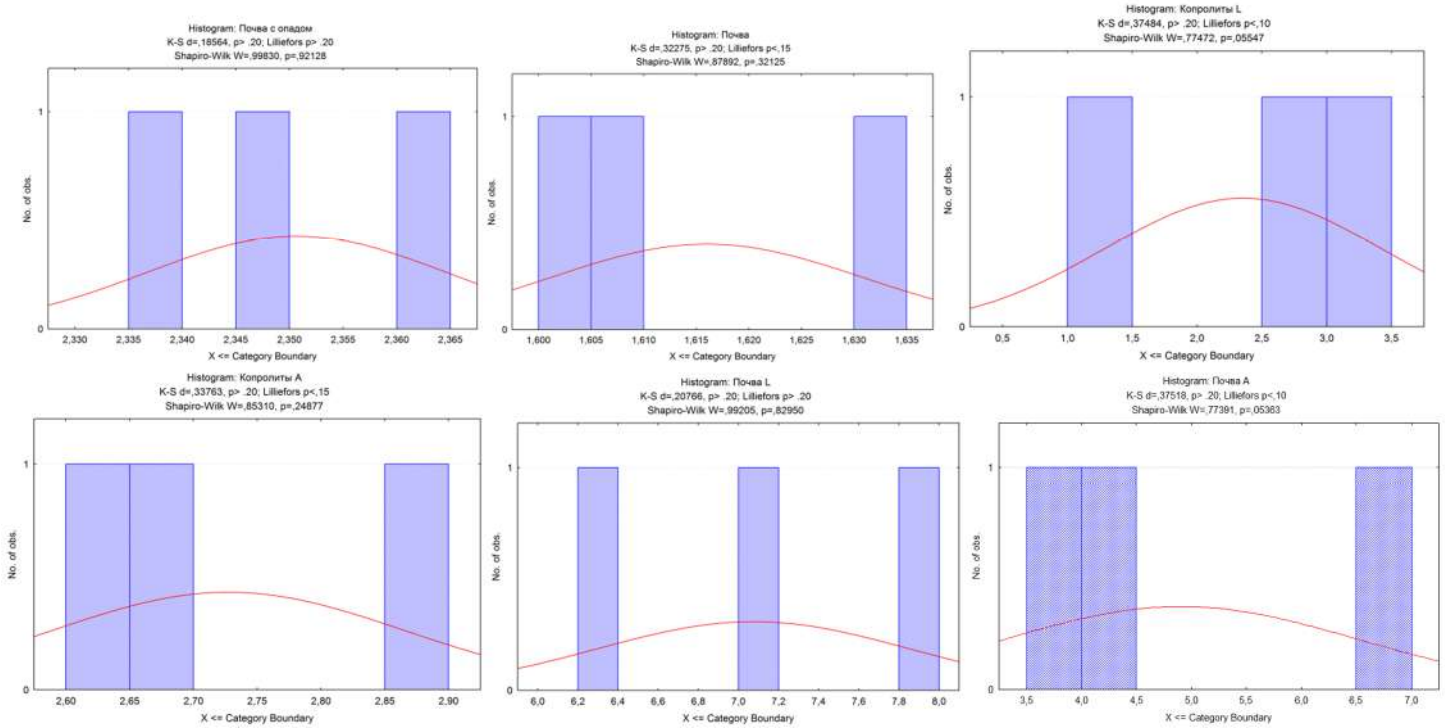
Продолжение приложения 8.

мкм	Rank Sum 1	Rank Sum 2	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
	Копролиты A	**Почва L**						
Деформация [%]	0,005673	0,007260	-1,549	0,219	0,001	0,000	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	*12,4*	*17,6*	*-4,457*	*0,021*	*1,513*	*0,566*	*7,156*	*0,511*
G' [Pa]	220666,7	240500,0	-1,046	0,372	24826,062	7778,175	10,187	0,433
G" [Pa]	30666,7	31650,0	-0,306	0,779	4271,222	777,817	30,154	0,255
Crossover G'=G"[Pa]	*5473,3*	*11515,0*	*-3,420*	*0,042*	*2348,876*	*445,477*	*27,802*	*0,266*
Crossover Gamma[%]	2,1	1,6	1,161	0,329	0,68	0,035	366,102	0,074
	Копролиты L	**Почва A**						
Деформация [%]	0,007260	0,006467	0,775	0,495	0,000	0,001	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	13,5	15,0	-0,730	0,518	0,424	2,802	43,630	0,213
G' [Pa]	*184000,0*	*231333,3*	*-4,782*	*0,017*	*5656,854*	*12662,280*	*5,010*	*0,602*
G" [Pa]	27100,0	29500,0	-1,137	0,338	2969,848	1900,000	2,443	0,517
Crossover G'=G"[Pa]	6102,5	9447,3	-2,838	0,066	1478,560	1185,972	1,554	0,677
Crossover Gamma[%]	*2,2*	*1,5*	*3,491*	*0,040*	*0,120*	*0,26*	*4,691*	*0,621*
	Почва	**Почва A**						
Деформация [%]	0,006467	0,006467	0,000	1,000	0,001374	0,001374	1,000	1,000
LVE-range [Pa]	16,7	15,0	0,709	0,517	2,95	2,80	1,109	0,948
G' [Pa]	258666,7	231333,3	1,532	0,200	28183,92	12662,28	4,954	0,336
G" [Pa]	32933,3	29500,0	1,794	0,147	2715,39	1900,00	2,042	0,657
Crossover G'=G"[Pa]	10753,7	9447,3	0,574	0,597	3758,91	1185,97	10,046	0,181
Crossover Gamma[%]	1,5	1,5	-0,072	0,946	0,33	0,26	1,592	0,772

Продолжение приложения 8.

мкм	Rank Sum 1	Rank Sum 2	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
	Почва	**Почва L**						
Деформация [%]	0,006467	0,007260	-0,775	0,495	0,001374	0,00	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	16,7	15,0	0,709	0,517	2,95	2,80	1,109	0,948
G' [Pa]	258666,7	231333,3	1,532	0,200	28183,92	12662,28	4,954	0,336
G" [Pa]	32933,3	29500,0	1,794	0,147	2715,39	1900,00	2,042	0,657
Crossover G'=G"[Pa]	10753,7	11515,0	-0,271	0,804	3758,91	445,477	71,199	0,167
Crossover Gamma[%]	1,5	1,6	-0,141	0,897	0,33	0,035	85,331	0,153
	Почва с опадом	**Почва A**						
Деформация [%]	0,008440	0,006467	1,388	0,237	0,002044	0,001374	2,212	0,623
LVE-range [Pa]	17,9	15,0	1,381	0,239	2,25	2,80	1,549	0,785
G' [Pa]	221666,7	231333,3	-0,236	0,825	69859,38	12662,28	30,439	0,064
G" [Pa]	26266,7	29500,0	-0,563	0,603	9757,22	1900,00	26,372	0,073
Crossover G'=G"[Pa]	11390,3	9447,3	0,567	0,601	5819,11	1185,97	24,075	0,080
Crossover Gamma[%]	1,5	1,5	-0,124	0,907	0,60	0,26	5,423	0,311
	Почва с опадом	**Почва L**						
Деформация [%]	0,008440	0,007260	0,775	0,495	0,002044	0,00	0,000	1,000
LVE-range [Pa]	17,9	17,6	0,176	0,872	2,25	0,566	15,844	0,350
G' [Pa]	221666,7	240500,0	-0,361	0,742	69859,38	7778,175	80,667	0,157
G" [Pa]	26266,7	31650,0	-0,739	0,513	9757,22	777,817	157,361	0,113
Crossover G'=G"[Pa]	11390,3	11515,0	-0,029	0,979	5819,11	445,477	170,633	0,108
Crossover Gamma[%]	1,5	1,6	-0,142	0,896	0,60	0,035	290,650	0,083

Приложение 9. Удельная поверхность. Проверка на нормальность



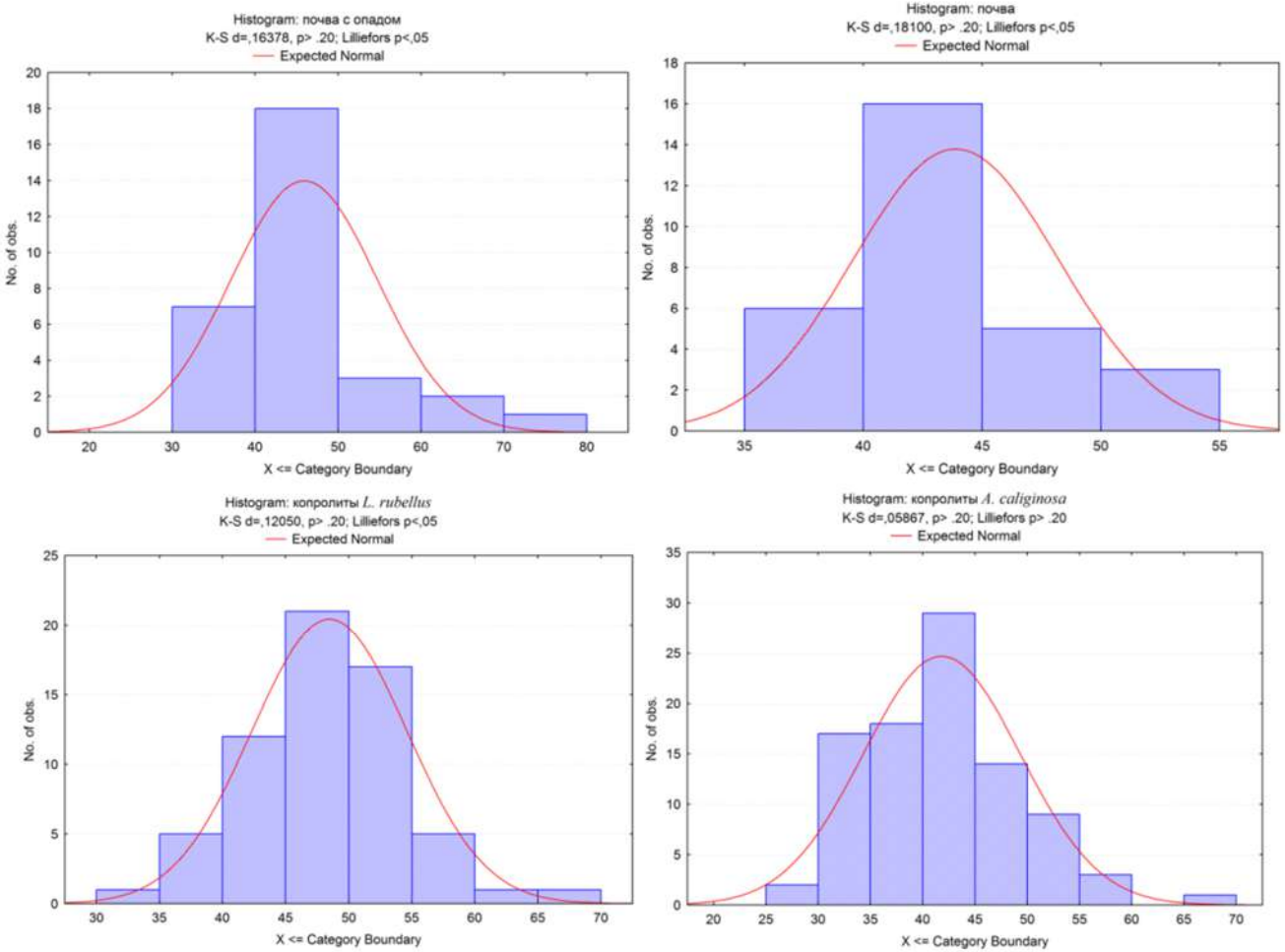
Приложение 10. Результаты сравнения средних по t-критерию для удельной поверхности. Mean - среднее значение выборки; t-value - значение рассчитанного *t*-критерия Стьюдента; p-level - вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; Std.Dev.1 - стандартное отклонение выборки №1; Std.Dev.2 - стандартное отклонение выборки №2; P, Variances - вероятность справедливости гипотезы о том, что дисперсии сравниваемых выборок не различаются.

Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
копролиты A	**копролиты L**						
2,727	2,354	0,601	0,580	0,139	1,067	59,324	*0,033*
копролиты A	**почва**						
2,727	1,616	*13,810*	*0,0002*	*0,139*	*0,015*	*86,123*	*0,023*
копролиты A	**почва с опадом**						
2,727	2,351	*4,684*	*0,009*	*0,139*	*0,014*	*97,820*	*0,020*
копролиты L	**почва с опадом**						
2,354	2,351	*0,005*	0,996	1,067	*0,014*	5803,034	*0,000*
копролиты L	**почва**						
2,354	1,616	1,197	0,297	1,067	*0,015*	5109,099	*0,000*
почва	**почва с опадом**						
1,616	2,351	*-62,140*	*0,0000*	*0,015*	*0,014*	*1,136*	*0,936*
копролиты A	**почва A**						
2,727	4,906	-2,538	*0,039*	0,139	1,434	107,008	*0,019*
копролиты A	**почва L**						
2,727	7,074	*-10,382*	*0,00001*	*0,138*	*0,695*	*25,154*	*0,077*

Продолжение приложения 10.

Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
копролиты L	**почва A**						
2,354	4,906	-3,629	*0,005*	0,955	1,434	2,255	0,393
копролиты L	**почва L**						
2,354	7,074	-9,790	*0,000*	0,955	0,695	1,887	0,503
почва A	**почва L**						
4,906	7,074	-3,333	*0,008*	1,434	0,695	4,254	0,138
почва A	**почва**						
4,906	1,616	3,840	*0,006*	1,434	*0,015*	9215,785	*0,000*
почва A	**почва c**						
4,906	2,351	2,983	*0,020*	1,434	*0,014*	10467,500	*0,000*
почва L	**почва**						
7,074	1,616	13,139	*0,000*	0,695	*0,015*	2166,371	*0,001*
почва L	**почва c**						
7,074	2,351	11,370	*0,000*	0,695	*0,014*	2460,615	*0,001*

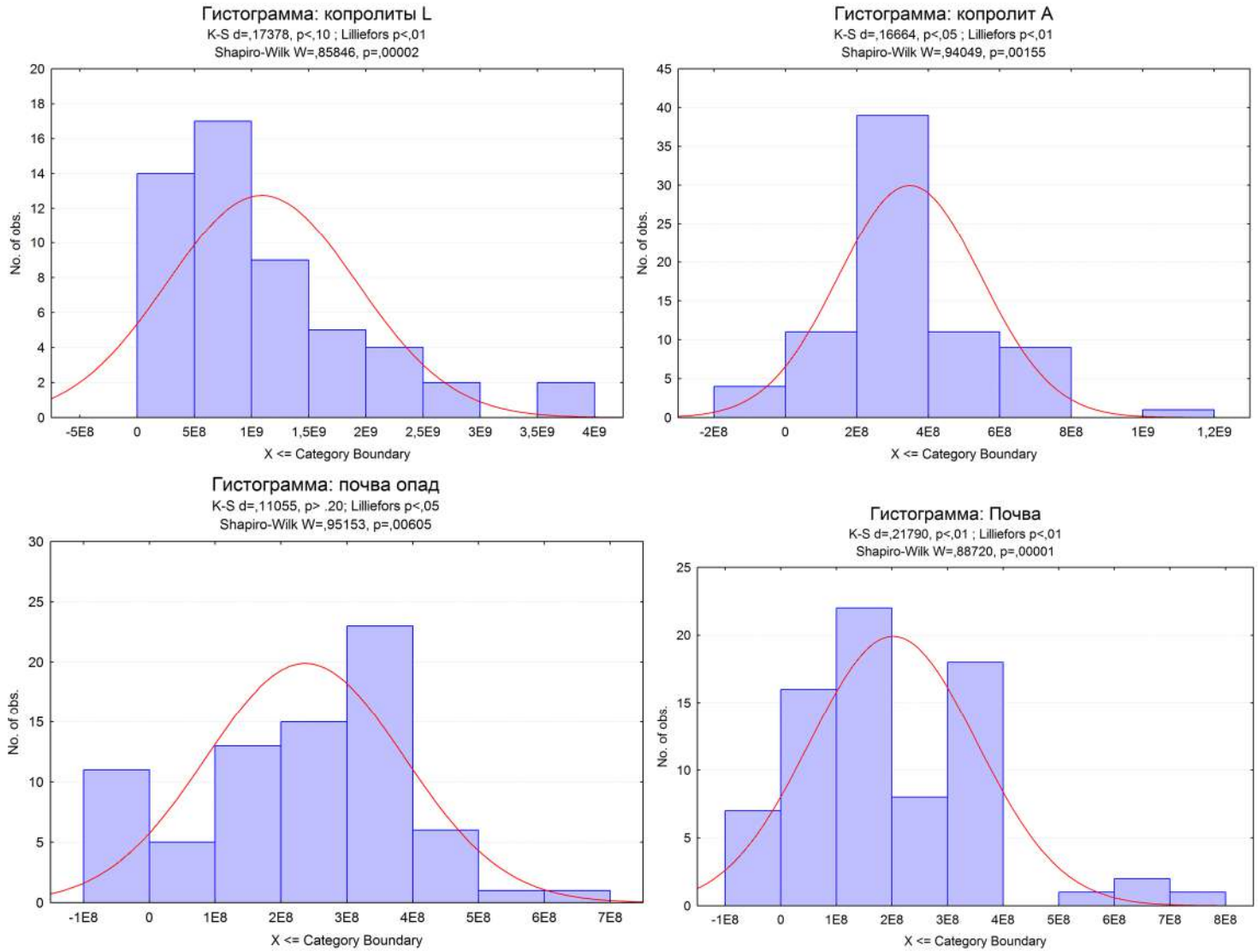
Приложение 11. Угол смачиваемости. Проверка данных на нормальность



Приложение 12. Результаты сравнения средних по t-критерию для краевого угла смачиваемости (в градусах). Mean - среднее значение выборки; t-value - значение рассчитанного *t*-критерия Стьюдента; p-level - вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; Std.Dev.1 - стандартное отклонение выборки №1; Std.Dev.2 - стандартное отклонение выборки №2; P, Variances - вероятность справедливости гипотезы о том, что дисперсии сравниваемых выборок не различаются.

Mean 1	Mean 2	t-value	p - level	Std.Dev.1	Std.Dev.2	F-критерий Фишера	P, Variances
Почва	**Почва с опадом**						
44,303	*45,913*	*-0,889*	*0,377*	*4,838*	*8,844*	*3,342*	*0,001*
Копролиты	**Почва**						
41,816	*44,303*	*-1,725*	0,087	*7,515*	*4,838*	*2,413*	*0,008*
Копролиты	**Почва с**						
41,816	45,913	-2,512	*0,013*	7,515	8,844	1,385	0,242
Копролиты	**Почва**						
48,467	44,303	3,297	*0,001*	6,152	4,838	1,617	0,151
Копролиты	**Почва с**						
48,467	*45,913*	*1,630*	*0,106*	*6,152*	*8,844*	*2,067*	*0,016*
Копролиты	**Копролиты**						
48,467	*41,816*	*5,824*	*0,000*	*6,152*	*7,515*	*1,492*	0,094

Приложение 13. Люминесцентная микроскопия. Проверка на нормальность.



Приложение 14. Сравнение средних численности микроорганизмов по результатам прямой люминесцентной микроскопии по U-критерию Манна-Уитни. Z – значение переменной нормального распределения (нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни); U – рассчитанный критерий Манна-Уитни; Z adjusted – скорректированная нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни; p-level 1 – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; p-level 2 – аппроксимацию стандартным нормальным распределением для двусторонней вероятности.

		U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2
почва	**почва с опадом**	2391,0	-1,949	0,051	-1,977	0,048
почва	**копролиты A**	*1688,0*	*-5,209*	*0,000*	*-5,267*	*0,000*
почва	**копролиты L**	*253,5*	*-8,388*	*0,000*	*-8,433*	*0,000*
почва с опадом	**копролиты A**	*2306,0*	*-3,451*	*0,001*	*-3,492*	*0,000*
почва с опадом	**копролиты L**	*357,5*	*-8,017*	*0,000*	*-8,056*	*0,000*
копролиты A	**копролиты L**	*677,0*	*-6,947*	*0,000*	*-6,979*	*0,000*

Приложение 15. Обилие ассоциаций микроорганизмов. Сравнение средних обилия ассоциаций микроорганизмов по U-критерию Манна-Уитни. Z – значение переменной нормального распределения (нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни); U – рассчитанный критерий Манна-Уитни; Z adjusted – скорректированная нормальная аппроксимация статистики Манна - Уитни; p-level 1 – вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; p-level 2 – аппроксимацию стандартным нормальным распределением для двусторонней вероятности; 2*1 sided exact p – удвоенная точная односторонняя вероятность (где p равно минус 1 кумулятивная (односторонняя) вероятность соответствующей U-статистики).

копролиты A & почва

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	2	1,414	0,157	1,414	0,157	0,229
инулин	3	-0,655	0,513	-0,655	0,513	0,700
казеин	3	1,061	0,289	1,061	0,289	0,400
кератин	*0*	*2,121*	*0,034*	*2,121*	*0,034*	*0,057*
крахмал	4	-0,707	0,480	-0,707	0,480	0,629
ксилан	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
НК	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629
пектин	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
твин 20	1	1,768	0,077	1,768	0,077	0,114
целлюлоза	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857

Продолжение приложения 15.

почва с опадом & почва

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
инулин	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
казеин	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
кератин	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
крахмал	2	-1,091	0,275	-1,091	0,275	0,400
ксилан	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
НК	3	-0,655	0,513	-0,655	0,513	0,700
пектин	*0*	*-1,964*	*0,050*	*-1,964*	*0,050*	*0,100*
твин 20	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
целлюлоза	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700

копролиты L & почва с опадом

декстран 500	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
инулин	2	-1,091	0,275	-1,091	0,275	0,400
казеин	1	1,528	0,127	1,528	0,127	0,200
кератин	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
крахмал	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000
ксилан	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
НК	*0*	*1,964*	*0,050*	*1,964*	*0,050*	*0,100*
пектин	*0*	*1,964*	*0,050*	*1,964*	*0,050*	*0,100*
твин 20	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
целлюлоза	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000

Продолжение приложения 15.

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
почва L & почва с опадом						
декстран 500	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
Инулин	3	-0,655	0,513	-0,655	0,513	0,700
Казеин	1	1,528	0,127	1,528	0,127	0,200
Кератин	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
Крахмал	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000
Ксилан	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
НК	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
Пектин	*0*	*1,964*	*0,050*	*1,964*	*0,050*	*0,100*
твин 20	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
Целлюлоза	3	-0,655	0,513	-0,655	0,513	0,700
копролиты A & копролиты L						
декстран 500	6	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Инулин	3	-0,655	0,513	-0,655	0,513	0,700
Казеин	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
Кератин	4	-0,707	0,480	-0,707	0,480	0,629
Крахмал	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
Ксилан	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
НК	2	-1,414	0,157	-1,414	0,157	0,229
Пектин	2	-1,414	0,157	-1,414	0,157	0,229
твин 20	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629
Целлюлоза	3	-1,061	0,289	-1,061	0,289	0,400

Продолжение приложения 15.

копролиты А & почва А

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	4	-1,155	0,248	-1,155	0,248	0,343
Инулин	3	-1,061	0,289	-1,061	0,289	0,400
Казеин	8	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Кератин	4	1,155	0,248	1,155	0,248	0,343
Крахмал	7	0,289	0,773	0,289	0,773	0,886
Ксилан	7	-0,289	0,773	-0,289	0,773	0,886
НК	8	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Пектин	5	0,866	0,386	0,866	0,386	0,486
твин 20	7	-0,289	0,773	-0,289	0,773	0,886
Целлюлоза	3	-1,443	0,149	-1,443	0,149	0,200

копролиты А & почва с опадом

декстран 500	4	0,884	0,377	0,892	0,372	0,400
Инулин	3	-0,873	0,383	-0,886	0,376	0,400
Казеин	2	1,591	0,112	1,605	0,108	0,114
Кератин	4	0,884	0,377	0,892	0,372	0,400
Крахмал	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
Ксилан	5	0,530	0,596	0,535	0,593	0,629
НК	4	0,884	0,377	0,892	0,372	0,400
Пектин	2	1,591	0,112	1,605	0,108	0,114
твин 20	4	0,884	0,377	0,892	0,372	0,400
Целлюлоза	5	-0,530	0,596	-0,535	0,593	0,629

Продолжение приложения 15.

копролиты A & почва L

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	4	0,707	0,480	0,720	0,471	0,629
Инулин	5	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Казеин	6	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Кератин	5	0,354	0,724	0,360	0,719	0,857
Крахмал	5	0,354	0,724	0,360	0,719	0,857
Ксилан	5	0,354	0,724	0,360	0,719	0,857
НК	6	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Пектин	6	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
твин 20	4	0,707	0,480	0,720	0,471	0,629
Целлюлоза	5	0,354	0,724	0,360	0,719	0,857

копролиты L & почва A

декстран 500	3	-1,061	0,289	-1,061	0,289	0,400
Инулин	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629
Казеин	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
Кератин	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
Крахмал	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
Ксилан	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
НК	3	1,061	0,289	1,061	0,289	0,400
Пектин	3	1,061	0,289	1,061	0,289	0,400
твин 20	6	-0,177	0,860	-0,178	0,858	0,857
Целлюлоза	3	-1,061	0,289	-1,061	0,289	0,400

Продолжение приложения 15.

копролиты L & почва L

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
Инулин	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000
Казеин	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
Кератин	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
Крахмал	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000
Ксилан	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
НК	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
Пектин	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
твин 20	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
Целлюлоза	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400

копролиты L & почва

декстран 500	3	0,873	0,383	0,886	0,376	0,400
Инулин	5	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Казеин	1	1,528	0,127	1,528	0,127	0,200
Кератин	2	1,309	0,190	1,328	0,184	0,200
Крахмал	3	-0,873	0,383	-0,886	0,376	0,400
Ксилан	4	0,436	0,663	0,443	0,658	0,700
НК	1	1,746	0,081	1,771	0,077	0,100
Пектин	1	1,746	0,081	1,771	0,077	0,100
твин 20	2	1,309	0,190	1,328	0,184	0,200
Целлюлоза	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700

Продолжение приложения 15.

почва А & почва

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	1	1,768	0,077	1,768	0,077	0,114
Инулин	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
Казеин	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629
Кератин	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
Крахмал	3	-1,061	0,289	-1,061	0,289	0,400
Ксилан	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629
НК	2	1,414	0,157	1,414	0,157	0,229
Пектин	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
твин 20	3	1,061	0,289	1,061	0,289	0,400
Целлюлоза	2	1,414	0,157	1,414	0,157	0,229

почва А & почва с опадом

декстран 500	1	1,768	0,077	1,768	0,077	0,114
Инулин	3	-1,061	0,289	-1,061	0,289	0,400
Казеин	2	1,414	0,157	1,414	0,157	0,229
Кератин	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
Крахмал	5	-0,354	0,724	-0,354	0,724	0,857
Ксилан	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629
НК	2	1,414	0,157	1,414	0,157	0,229
Пектин	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
твин 20	5	0,354	0,724	0,354	0,724	0,857
Целлюлоза	4	0,707	0,480	0,707	0,480	0,629

Продолжение приложения 15.

почва L & почва

	U	Z	p-level 1	Z adjusted	p-level 2	2*1 sided exact p
декстран 500	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
Инулин	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000
Казеин	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
Кератин	3	0,655	0,513	0,655	0,513	0,700
крахмал	3	-0,655	0,513	-0,655	0,513	0,700
ксилан	4	0,218	0,827	0,218	0,827	1,000
НК	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
пектин	2	1,091	0,275	1,091	0,275	0,400
твин 20	1	1,528	0,127	1,528	0,127	0,200
целлюлоза	4	-0,218	0,827	-0,218	0,827	1,000

Приложение 16. Дисперсионный анализ. Тест значимости. Сигма–ограниченная параметризация. Разложение эффективных гипотез. SS – суммы квадратов; SM – средний квадрат; F – *F*–критерий; p – уровень значимости. G′ – модуль упругости; G″ – модуль вязкости; N удельная – удельная поверхность, измеренная по сорбции азота; LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости; G′=G″ – точка разрушения структуры; Числ.люм. – число клеток рассчитанное с помощью прямой люминесцентной микроскопии; Посев числен. – число колониеобразующих бактерий (КОЕ) на г почвы; ГС ОВ – % содержания фракций с органическим веществом по результатам гранулометрического анализа; ГС – % содержания фракций без органического вещества по результатам гранулометрического анализа; micro – % содержания фракций по результатам микроагрегатного анализа; Vm (Эст) – максимальная скорость реакции (эстеразная активность); Km – константа Михаэлиса (эстеразная активность); декстран 500, инулин, казеин, кератин, крахмал, ксилан, нуклеиновые кислоты, пектин, твин 20, целлюлоза – оценка обилия микроорганизмов на субстратах определенная по кривым роста; мг тфф/10г в стуки – потребление ТФФ (дегидрогеназная активность); Угол смачиваемости – значение угла смачиваемости; C, % – % содержания углерода; N, % – % содержания азота; C/N– соотношение углерода к азоту; $\delta^{15}N$ – промилле изотопа азота; $\delta^{13}C$ – промилле изотопа углерода.

		G'=G"	G'=G"	G'=G"	G'=G"	G"	G"	G"	G"	N удельная	N удельная	N удельная	N удельная	LVE-range	LVE-range	LVE-range	LVE-range
	Степени свободы	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	8E+07	8E+07	7,587	0,0203	2E+06	2E+06	0,0458	0,8348	0,9319	0,9319	2,7929	0,1256	58,08	58,08	16,115	0,0025
Error	10	1E+08	1E+07			3E+08	3E+07			3,3366	0,3337			36,04	3,604		
Total	11	2E+08				3E+08				4,2684				94,12			
наличие опада	1	4E+07	4E+07	2,2031	0,1686	4E+07	4E+07	1,1709	0,3046	1,6693	1,6693	6,4223	0,0297	31,36	31,36	4,9968	0,0494
Error	10	2E+08	2E+07			3E+08	3E+07			2,5992	0,2599			62,76	6,276		
Total	11	2E+08				3E+08				4,2684				94,12			

Продолжение приложения 16.

		G'=G"	G'=G"	G'=G"	G'=G"	G"	G"	G"	G"	N удельн.	N удельн.	N удельн.	N удельн.	LVE-range	LVE-range	LVE-range	LVE-range
	Степени свободы	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
вид червей	2	8E+07	4E+07	3,4569	0,0769	2E+07	1E+07	0,2926	0,7531	1,1409	0,5705	1,6416	0,2467	59,58	29,79	7,7623	0,011
Error	9	1E+08	1E+07			3E+08	4E+07			3,1275	0,3475			34,54	3,8378		
Total	11	2E+08				3E+08				4,2684				94,12			
объекты	3	8E+07	3E+07	2,0748	0,182	9E+07	3E+07	0,9294	0,4698	1,9505	0,6502	2,244	0,1605	61,74	20,58	5,0846	0,0293
Error	8	1E+08	1E+07			3E+08	3E+07			2,3179	0,2897			32,38	4,0475		
Total	11	2E+08				3E+08				4,2684				94,12			
		G'				мг ттф/10г в стуки				Числ.люм.				Посев числен.			
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	4E+09	4E+09	2,5737	0,1397	0,3333	0,3333	16,393	0,0023	7E+17	7E+17	8,6941	0,0146	1E+17	1E+17	5,4788	0,0413
Error	10	2E+10	2E+09			0,2033	0,0203			8E+17	8E+16			2E+17	2E+16		
Total	11	2E+10				0,5367				1E+18				3E+17			
наличие опада	1	694444	694444	0,0003	0,9858	0,09	0,09	2,0149	0,1862	3E+17	3E+17	2,1852	0,1701	4E+16	4E+16	1,3109	0,2789
Error	10	2E+10	2E+09			0,4467	0,0447			1E+18	1E+17			3E+17	3E+16		
Total	11	2E+10				0,5367				1E+18				3E+17			
вид червей	2	6E+09	3E+09	1,9361	0,1998	0,335	0,1675	7,4752	0,0122	1E+18	7E+17	117,37	4E-07	3E+17	1E+17	70,186	3E-06
Error	9	1E+10	2E+09			0,2017	0,0224			5E+16	6E+15			2E+16	2E+15		
Total	11	2E+10				0,5367				1E+18				3E+17			
объекты	3	8E+09	3E+09	1,7682	0,2308	0,3367	0,1122	4,4889	0,0397	1E+18	5E+17	72,244	4E-06	3E+17	1E+17	41,602	3E-05
Error	8	1E+10	2E+09			0,2	0,025			5E+16	6E+15			2E+16	2E+15		
Total	11	2E+10				0,5367				1E+18				3E+17			

Продолжение приложения 16.

		ГС ОМ 0-2	ГС ОМ 0-2	ГС ОМ 0-2	ГС ОМ 0-2	ГС ОМ 2-20	ГС ОМ 2-20	ГС ОМ 2-20	ГС ОМ 2-20	ГС ОМ 20-50	ГС ОМ 20-50	ГС ОМ 20-50	ГС ОМ 20-50	ГС ОМ 50-100	ГС ОМ 50-100	ГС ОМ 50-100	ГС ОМ 50-100
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	21,285	21,285	3,8141	0,0794	36,519	36,519	5,0149	0,0491	0,0929	0,0929	0,2628	0,6193	5,4886	5,4886	1,8744	0,2009
Error	10	55,806	5,5806			72,821	7,2821			3,5337	0,3534			29,282	2,9282		
Total	11	77,091				109,34				3,6266				34,771			
наличие опада	1	24,245	24,245	4,5877	0,0578	20,312	20,312	2,2815	0,1619	0,3664	0,3664	1,1237	0,3141	9,4777	9,4777	3,7471	0,0817
Error	10	52,847	5,2847			89,028	8,9028			3,2602	0,326			25,293	2,5293		
Total	11	77,091				109,34				3,6266				34,771			
вид червей	2	54,41	27,205	10,795	0,0041	71,844	35,922	8,622	0,0081	0,3416	0,1708	0,468	0,6407	17,437	8,7184	4,5267	0,0436
Error	9	22,681	2,5201			37,497	4,1663			3,2849	0,365			17,334	1,926		
Total	11	77,091				109,34				3,6266				34,771			
объекты	3	62,073	20,691	11,022	0,0033	73,398	24,466	5,4456	0,0247	0,6181	0,206	0,5479	0,6634	21,905	7,3018	4,5404	0,0387
Error	8	15,018	1,8773			35,942	4,4928			3,0084	0,3761			12,865	1,6082		
Total	11	77,091				109,34				3,6266				34,771			

Продолжение приложения 16.

		ГС ОМ 100-250	ГС ОМ 100-250	ГС ОМ 100-250	ГС ОМ 100-250	ГС ОМ 250-500	ГС ОМ 250-500	ГС ОМ 250-500	ГС ОМ 250-500	ГС ОМ 500-1000	ГС ОМ 500-1000	ГС ОМ 500-1000	ГС ОМ 500-1000	ГС 0-2	ГС 0-2	ГС 0-2	ГС 0-2
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	20,169	20,169	4,4864	0,0602	5,5971	5,5971	4,3604	0,0633	1,3168	1,3168	4,6009	0,0576	0,2756	0,2756	1,0163	0,3372
Error	10	44,956	4,4956			12,836	1,2836			2,8621	0,2862			2,7116	0,2712		
Total	11	65,124				18,433				4,1789				2,9871			
наличие опада	1	12,511	12,511	2,3779	0,1541	2,2619	2,2619	1,3987	0,2643	0,4943	0,4943	1,3416	0,2737	0,2668	0,2668	0,9809	0,3453
Error	10	52,613	5,2613			16,172	1,6172			3,6846	0,3685			2,7203	0,272		
Total	11	65,124				18,433				4,1789				2,9871			
вид червей	2	45,443	22,721	10,39	0,0046	12,213	6,1066	8,8354	0,0075	2,6096	1,3048	7,4834	0,0122	0,64	0,32	1,2271	0,3379
Error	9	19,682	2,1868			6,2203	0,6911			1,5693	0,1744			2,3471	0,2608		
Total	11	65,124				18,433				4,1789				2,9871			
объекты	3	46,78	15,593	6,8003	0,0136	12,242	4,0806	5,2723	0,0268	2,6121	0,8707	4,4458	0,0407	0,7084	0,2361	0,829	0,5142
Error	8	18,344	2,293			6,1917	0,774			1,5668	0,1958			2,2787	0,2848		
Total	11	65,124				18,433				4,1789				2,9871			

Продолжение приложения 16.

		ГС 2-20	ГС 2-20	ГС 2-20	ГС 2-20	ГС 20-50	ГС 20-50	ГС 20-50	ГС 20-50	ГС 50-100	ГС 50-100	ГС 50-100	ГС 50-100	ГС 100-250	ГС 100-250	ГС 100-250	ГС 100-250
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	18,539	18,539	2,1937	0,1694	2,6308	2,6308	1,2956	0,2816	7,0214	7,0214	1,4119	0,2622	0,0938	0,0938	1,5063	0,2478
Error	10	84,507	8,4507			20,306	2,0306			49,731	4,9731			0,6226	0,0623		
Total	11	103,05				22,936				56,752				0,7164			
наличие опада	1	4,2488	4,2488	0,4301	0,5268	1,5969	1,5969	0,7483	0,4073	0,5957	0,5957	0,1061	0,7514	0,1151	0,1151	1,9143	0,1966
Error	10	98,797	9,8797			21,339	2,1339			56,156	5,6156			0,6013	0,0601		
Total	11	103,05				22,936				56,752				0,7164			
вид червей	2	40,255	20,128	2,885	0,1076	5,0447	2,5224	1,2688	0,327	12,671	6,3354	1,2935	0,3208	0,1174	0,0587	0,8819	0,4469
Error	9	62,791	6,9767			17,892	1,988			44,081	4,8979			0,599	0,0666		
Total	11	103,05				22,936				56,752				0,7164			
объекты	3	40,526	13,509	1,7285	0,2382	5,2054	1,7351	0,7829	0,5361	13,533	4,5109	0,835	0,5114	0,157	0,0523	0,7483	0,5532
Error	8	62,52	7,815			17,731	2,2164			43,219	5,4024			0,5594	0,0699		
Total	11	103,05				22,936				56,752				0,7164			

Продолжение приложения 16.

		ГС 250-500	ГС 250-500	ГС 250-500	ГС 250-500	ГС 500-1000	ГС 500-1000	ГС 500-1000	ГС 500-1000	micro 0-2	micro 0-2	micro 0-2	micro 0-2	micro 2-20	micro 2-20	micro 2-20	micro 2-20
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	0,0237	0,0237	1,3422	0,2736	0,0025	0,0025	2,4586	0,148	17,772	17,772	2,1266	0,1754	947,97	947,97	2,563	0,1405
Error	10	0,1769	0,0177			0,0101	0,001			83,566	8,3566			3698,7	369,87		
Total	11	0,2007				0,0126				101,34				4646,7			
наличие опада	1	0,0251	0,0251	1,4291	0,2595	0,0008	0,0008	0,7041	0,421	3,5957	3,5957	0,3679	0,5577	320,56	320,56	0,741	0,4095
Error	10	0,1756	0,0176			0,0118	0,0012			97,742	9,7742			4326,1	432,61		
Total	11	0,2007				0,0126				101,34				4646,7			
вид червей	2	0,0741	0,037	2,6346	0,1257	0,0075	0,0037	6,5299	0,0177	100,65	50,325	658,12	2E-10	4645,8	2322,9	23130	0
Error	9	0,1266	0,0141			0,0051	0,0006			0,6882	0,0765			0,9039	0,1004		
Total	11	0,2007				0,0126				101,34				4646,7			
объекты	3	0,0813	0,0271	1,8174	0,222	0,0075	0,0025	3,8696	0,0559	101,08	33,694	1058,9	1E-10	4645,8	1548,6	14090	3E-15
Error	8	0,1193	0,0149			0,0051	0,0006			0,2546	0,0318			0,8792	0,1099		
Total	11	0,2007				0,0126				101,34				4646,7			

Продолжение приложения 16.

		micro 20-50	micro 20-50	micro 20-50	micro 20-50	micro 50-100	micro 50-100	micro 50-100	micro 50-100	micro 100-250	micro 100-250	micro 100-250	micro 100-250	micro 250-500	micro 250-500	micro 250-500	micro 250-500
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	209,66	209,66	7,0904	0,0238	943,94	943,94	3,842	0,0784	241,24	241,24	2,4661	0,1474	9,6132	9,6132	2,4069	0,1519
Error	10	295,7	29,57			2456,9	245,69			978,21	97,821			39,941	3,9941		
Total	11	505,36				3400,9				1219,5				49,554			
наличие опада	1	134,88	134,88	3,6407	0,0855	362,51	362,51	1,1931	0,3003	120,96	120,96	1,1011	0,3187	1,8123	1,8123	0,3796	0,5516
Error	10	370,47	37,047			3038,4	303,84			1098,5	109,85			47,742	4,7742		
Total	11	505,36				3400,9				1219,5				49,554			
вид червей	2	488	244	126,55	3E-07	3397,4	1698,7	4401	3E-14	1212,6	606,31	798,29	7E-11	47,564	23,782	107,54	5E-07
Error	9	17,352	1,9281			3,4738	0,386			6,8355	0,7595			1,9903	0,2211		
Total	11	505,36				3400,9				1219,5				49,554			
объекты	3	503,89	167,96	914,25	2E-10	3399,9	1133,3	9716,5	1E-14	1218,8	406,27	4997,6	2E-13	47,859	15,953	75,306	3E-06
Error	8	1,4697	0,1837			0,9331	0,1166			0,6503	0,0813			1,6948	0,2118		
Total	11	505,36				3400,9				1219,5				49,554			

Продолжение приложения 16.

		micro 500-1000	micro 500-1000	micro 500-1000	micro 500-1000	Vm (Эст)	Vm (Эст)	Vm (Эст)	Vm (Эст)	Km (Эст)	Km (Эст)	Km (Эст)	Km (Эст)	декстран 500	декстран 500	декстран 500	декстран 500
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	0,0599	0,0599	6,6138	0,0278	1E-06	1E-06	0,7406	0,4096	24235	24235	39,085	9E-05	9E+15	9E+15	0,061	0,8099
Error	10	0,0906	0,0091			2E-05	2E-06			6200,5	620,05			1E+18	1E+17		
Total	11	0,1506				2E-05				30435				1E+18			
наличие опада	1	0,0095	0,0095	0,6743	0,4307	3E-07	3E-07	0,1574	0,6999	7575	7575	3,3136	0,0987	5E+17	5E+17	5,1025	0,0475
Error	10	0,1411	0,0141			2E-05	2E-06			22860	2286			1E+18	1E+17		
Total	11	0,1506				2E-05				30435				1E+18			
вид червей	2	0,0695	0,0348	3,8608	0,0616	2E-05	1E-05	124,55	3E-07	29124	14562	99,916	7E-07	1E+16	7E+15	0,0434	0,9577
Error	9	0,081	0,009			7E-07	8E-08			1311,7	145,74			1E+18	2E+17		
Total	11	0,1506				2E-05				30435				1E+18			
объекты	3	0,0724	0,0241	2,4705	0,1363	2E-05	7E-06	76,308	3E-06	29136	9712	59,787	8E-06	7E+17	2E+17	2,1035	0,1781
Error	8	0,0782	0,0098			7E-07	9E-08			1299,5	162,44			8E+17	1E+17		
Total	11	0,1506				2E-05				30435				1E+18			

Продолжение приложения 16.

		инулин	инулин	инулин	инулин	казеин	казеин	казеин	казеин	кератин	кератин	кератин	кератин	крахмал	крахмал	крахмал	крахмал
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	2E+17	2E+17	4,0018	0,0733	1E+17	1E+17	1,0257	0,335	8E+15	8E+15	2,596	0,1382	2E+15	2E+15	0,2177	0,6508
Error	10	5E+17	5E+16			1E+18	1E+17			3E+16	3E+15			8E+16	8E+15		
Total	11	7E+17				1E+18				4E+16				8E+16			
наличие опада	1	3E+17	3E+17	8,7573	0,0143	2E+17	2E+17	2,1676	0,1717	2E+16	2E+16	6,7852	0,0263	9E+14	9E+14	0,1094	0,7477
Error	10	4E+17	4E+16			9E+17	9E+16			2E+16	2E+15			8E+16	8E+15		
Total	11	7E+17				1E+18				4E+16				8E+16			
вид червей	2	2E+17	1E+17	1,8097	0,2185	3E+17	1E+17	1,4489	0,2848	9E+15	4E+15	1,4217	0,2907	2E+16	1E+16	1,9584	0,1967
Error	9	5E+17	6E+16			9E+17	1E+17			3E+16	3E+15			6E+16	6E+15		
Total	11	7E+17				1E+18				4E+16				8E+16			
объекты	3	4E+17	1E+17	2,6383	0,1212	9E+17	3E+17	9,4691	0,0052	2E+16	6E+15	2,1778	0,1685	3E+16	1E+16	1,4768	0,2925
Error	8	4E+17	5E+16			3E+17	3E+16			2E+16	3E+15			5E+16	7E+15		
Total	11	7E+17				1E+18				4E+16				8E+16			

Продолжение приложения 16.

		ксилан	ксилан	ксилан	ксилан	НК	НК	НК	НК	пектин	пектин	пектин	пектин	твин 20	твин 20	твин 20	твин 20
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	4E+16	4E+16	4,6808	0,0558	7E+16	7E+16	6,8992	0,0253	2E+17	2E+17	1,5756	0,2379	6E+13	6E+13	0,0012	0,9727
Error	10	9E+16	9E+15			1E+17	1E+16			1E+18	1E+17			5E+17	5E+16		
Total	11	1E+17				2E+17				1E+18				5E+17			
наличие опада	1	2E+14	2E+14	0,0195	0,8916	6E+15	6E+15	0,3587	0,5625	2E+17	2E+17	1,648	0,2282	2E+17	2E+17	8,4826	0,0155
Error	10	1E+17	1E+16			2E+17	2E+16			1E+18	1E+17			2E+17	2E+16		
Total	11	1E+17				2E+17				1E+18				5E+17			
вид червей	2	4E+16	2E+16	2,4802	0,1387	7E+16	4E+16	3,4827	0,0758	3E+17	1E+17	1,5088	0,2722	4E+15	2E+15	0,0387	0,9622
Error	9	8E+16	9E+15			9E+16	1E+16			9E+17	1E+17			5E+17	5E+16		
Total	11	1E+17				2E+17				1E+18				5E+17			
объекты	3	6E+16	2E+16	2,4077	0,1425	8E+16	3E+16	2,5255	0,1311	9E+17	3E+17	9,0161	0,006	3E+17	1E+17	5,7724	0,0212
Error	8	7E+16	8E+15			8E+16	1E+16			3E+17	3E+16			1E+17	2E+16		
Total	11	1E+17				2E+17				1E+18				5E+17			

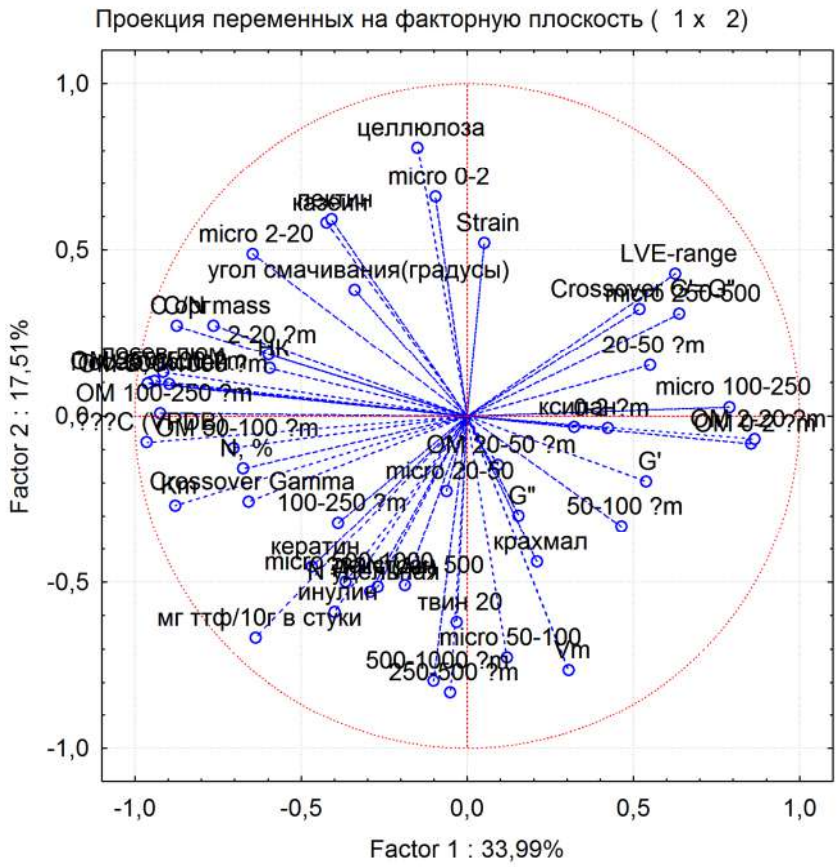
Продолжение приложения 16.

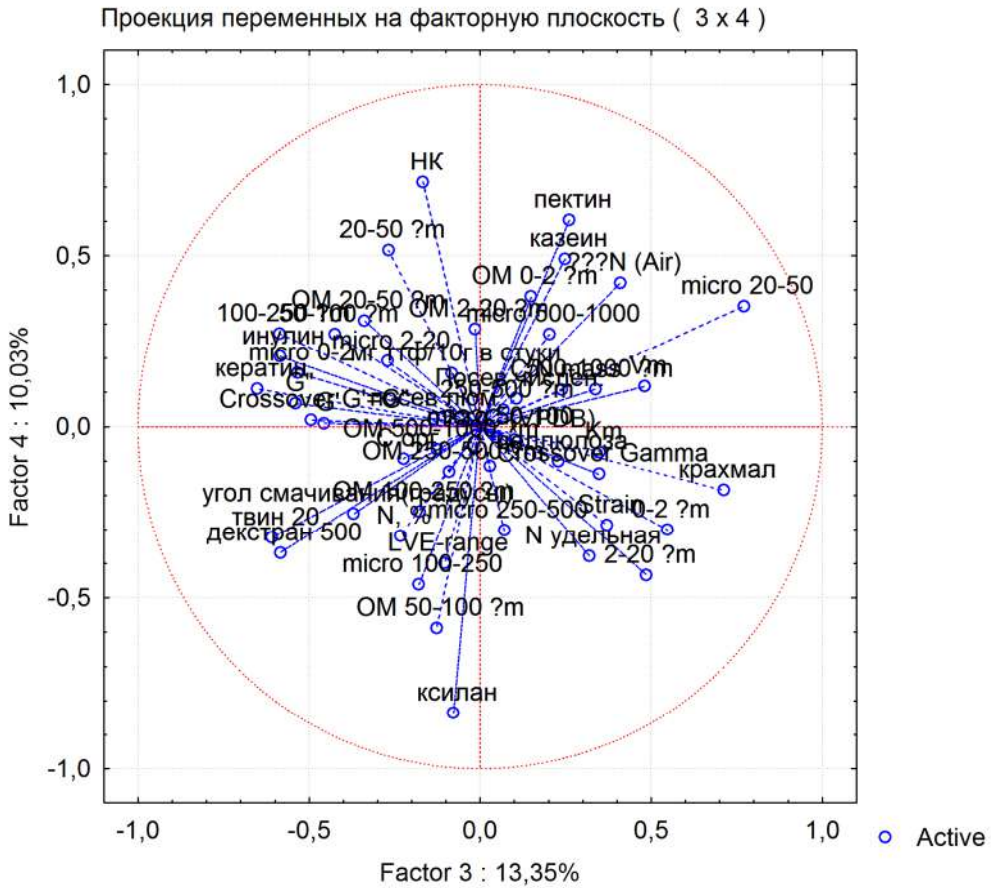
		целлюлоза	целлюлоза	целлюлоза	целлюлоза	Угол смачиваемости	Угол смачиваемости	Угол смачиваемости	Угол смачиваемости	C, %	C, %	C, %	C, %	N, %	N, %	N, %	N, %
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	1E+14	1E+14	0,1589	0,6986	0,5629	0,5629	0,0653	0,8035	2,5994	2,5994	13,353	0,0044	0,0022	0,0022	2,5367	0,1423
Error	10	9E+15	9E+14			86,219	8,6219			1,9467	0,1947			0,0086	0,0009		
Total	11	9E+15				86,782				4,5461				0,0107			
наличие опада	1	3E+15	3E+15	4,2612	0,0659	4,7221	4,7221	0,5754	0,4656	1,0508	1,0508	3,0064	0,1136	0,0062	0,0062	13,532	0,0043
Error	10	7E+15	7E+14			82,06	8,206			3,4953	0,3495			0,0046	0,0005		
Total	11	9E+15				86,782				4,5461				0,0107			
вид червей	2	5E+15	2E+15	4,7977	0,0382	58,907	29,453	9,5095	0,006	4,2712	2,1356	69,905	3E-06	0,0027	0,0013	1,4911	0,2759
Error	9	5E+15	5E+14			27,875	3,0973			0,2749	0,0305			0,0081	0,0009		
Total	11	9E+15				86,782				4,5461				0,0107			
объекты	3	8E+15	3E+15	15,552	0,0011	63,447	21,149	7,2507	0,0114	4,2845	1,4282	43,671	3E-05	0,0067	0,0022	4,3843	0,042
Error	8	1E+15	2E+14			23,335	2,9168			0,2616	0,0327			0,0041	0,0005		
Total	11	9E+15				86,782				4,5461				0,0107			

Продолжение приложения 16.

		C/N	C/N	C/N	C/N	N,‰	N,‰	N,‰	N,‰	C,‰	C,‰	C,‰	C,‰
		SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
присутствие червей	1	6,2512	6,2512	6,513	0,0288	1,6493	1,6493	5,4608	0,0416	2,6086	2,6086	23,464	0,0007
Error	10	9,598	0,9598			3,0202	0,302			1,1117	0,1112		
Total	11	15,849				4,6695				3,7203			
наличие опада	1	0,17	0,17	0,1084	0,7488	0,3337	0,3337	0,7696	0,4009	1,0671	1,0671	4,0222	0,0727
Error	10	15,679	1,5679			4,3358	0,4336			2,6531	0,2653		
Total	11	15,849				4,6695				3,7203			
вид червей	2	11,727	5,8633	12,8	0,0023	2,6836	1,3418	6,0811	0,0213	3,3891	1,6945	46,046	2E-05
Error	9	4,1226	0,4581			1,9859	0,2207			0,3312	0,0368		
Total	11	15,849				4,6695				3,7203			
объекты	3	13,322	4,4406	14,056	0,0015	2,7239	0,908	3,7333	0,0605	3,4042	1,1347	28,724	0,0001
Error	8	2,5274	0,3159			1,9456	0,2432			0,316	0,0395		
Total	11	15,849				4,6695				3,7203			

Приложение 17. Метод главных компонент (МГК). Проекция переменных на факторыне плоскости.





Приложение 18. Факторные координаты переменных, основанные на корреляциях для МГК. Курсивом выделены параметры (значения больше 0,7 и – 0,7) дающий наибольший вклад в фактор (компоненту МГК). Подчеркиванием выделены параметры (значения в диапазоне 0,2 и – 0,2), вклад которых в фактор минимален. G′ – модуль упругости; G″ – модуль вязкости; N удельная – удельная поверхность, измеренная по сорбции азота; LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости; G′=G″ – точка разрушения структуры; Числ.люм. – число клеток рассчитанное с помощью прямой люминесцентной микроскопии; Посев числен. – число колониеобразующих бактерий (КОЕ) на г почвы; ГС ОВ – % содержания фракций с органическим веществом по результатам гранулометрического анализа; ГС – % содержания фракций без органического вещества по результатам гранулометрического анализа; micro – % содержания фракций по результатам микроагрегатного анализа; Vm – максимальная скорость реакции (эстеразная активность); Km – константа Михаэлиса (эстеразная активность); декстран 500, инулин, казеин, кератин, крахмал, ксилан, нуклеиновые кислоты, пектин, твин 20, целлюлоза – оценка обилия микроорганизмов на субстратах определенная по кривым роста; мг тфф/10г в стуки – потребление ТФФ (дегидрогеназная активность); Угол смачиваемости – значение угла смачиваемости; C, % – % содержания углерода; N, % – % содержания азота; C/N– соотношение углерода к азоту; $\delta^{15}N$ – промилле изотопа азота; $\delta^{13}C$ – промилле изотопа углерода.

	Фактор 1	**Фактор 2**	**Фактор 3**	**Фактор 4**	**Фактор 5**	**Фактор 6**	**Фактор 7**	**Фактор 8**	**Фактор 9**	**Фактор 10**	**Фактор 11**
Crossover G'=G"	0,518052	0,321842	-0,495108	0,019509	0,395050	0,238009	-0,089855	-0,366450	0,143023	-0,000956	-0,083662
G"	0,154979	-0,299022	-0,539066	0,067884	0,468616	-0,253228	-0,330409	-0,411711	-0,166139	-0,035484	0,010209
N удельная	-0,292427	-0,529602	0,319748	-0,377985	0,533576	-0,249807	0,102590	0,106907	-0,018183	-0,123267	0,065654
LVE-range	0,626699	0,428229	-0,103796	-0,399751	-0,173100	0,091707	-0,206434	-0,205120	-0,359325	0,019428	-0,027155
G'	0,538082	-0,195875	-0,456072	0,009888	0,508434	-0,100394	-0,180223	-0,391308	-0,091190	-0,018917	0,033785

Продолжение приложения 18.

	Фактор 1	**Фактор 2**	**Фактор 3**	**Фактор 4**	**Фактор 5**	**Фактор 6**	**Фактор 7**	**Фактор 8**	**Фактор 9**	**Фактор 10**	**Фактор 11**
Деформация, %	0,051137	0,520281	0,370269	-0,286774	-0,596109	0,217637	0,040441	0,285153	-0,140663	0,041203	-0,014492
Посев люм.	**-0,914537**	0,131261	-0,136657	0,023594	-0,043518	-0,263962	-0,143251	-0,176572	0,011635	0,044609	0,042044
Посев числен.	**-0,955395**	0,100092	0,106025	0,081754	-0,104876	-0,113094	-0,150604	-0,092754	0,059701	0,008428	0,023809
С орг	**-0,873927**	0,271764	-0,224251	-0,092818	-0,150795	-0,129405	0,098259	-0,178281	0,133628	-0,011125	-0,067739
ГС ОВ 0-2 мкм	**0,854685**	-0,083300	0,148519	0,381002	-0,148692	-0,125904	0,195526	-0,073982	0,053583	0,005570	0,103863
ГС ОВ 2-20 мкм	**0,864503**	-0,068626	-0,014294	0,286504	-0,229557	-0,252688	0,187151	-0,072482	0,059739	0,039155	0,060886
ГС ОВ 20-50 мкм	0,091723	-0,146244	-0,338275	0,310557	-0,189696	-0,633934	0,172413	-0,052651	-0,510859	-0,081871	-0,145907
ГС ОВ 50-100 мкм	**-0,702915**	-0,096063	-0,127524	-0,588377	0,013087	0,069353	0,025687	0,108792	0,042321	0,279170	-0,192430
ГС ОВ 100-250 мкм	**-0,924031**	0,008105	-0,176577	-0,247888	0,163023	-0,021103	-0,034112	0,061392	-0,145312	-0,018792	-0,007076
ГС ОВ 250-500 мкм	**-0,940691**	0,104843	-0,089894	-0,131776	0,162409	0,210381	-0,070957	-0,028116	-0,029481	-0,027228	-0,024272
ГС ОВ 500-1000 мкм	**-0,897005**	0,095070	-0,125094	-0,066299	0,176206	0,358034	-0,044352	-0,032579	-0,038406	-0,006784	-0,050128

Продолжение приложения 18.

	Фактор 1	**Фактор 2**	**Фактор 3**	**Фактор 4**	**Фактор 5**	**Фактор 6**	**Фактор 7**	**Фактор 8**	**Фактор 9**	**Фактор 10**	**Фактор 11**
ГС 0-2 мкм	0,423619	-0,036227	0,547802	-0,301169	0,493221	-0,134689	-0,142934	0,011978	-0,107248	0,366493	0,025380
ГС 2-20 мкм	-0,597239	0,185098	0,485759	-0,433572	0,302085	-0,218457	-0,177028	-0,038551	0,077867	-0,071517	-0,046004
ГС 20-50 мкм	0,551178	0,153535	-0,268009	0,515254	-0,194227	-0,323267	0,391413	0,024889	-0,102551	0,109019	-0,129857
ГС 50-100 мкм	0,463825	-0,331147	-0,424834	0,270849	-0,263950	0,531043	-0,181091	0,158013	-0,091389	-0,024747	0,054423
ГС 100-250 мкм	-0,388963	-0,320514	-0,586672	0,272524	-0,294597	0,294790	0,042334	-0,206341	0,318961	0,053239	0,069987
ГС 250-500 мкм	-0,050970	**-0,830606**	0,067950	0,048822	-0,297336	0,116569	0,149996	-0,328887	0,250328	0,034077	0,063293
ГС 500-1000 мкм	-0,101265	**-0,795539**	0,338016	0,109564	-0,188268	0,156117	0,262918	-0,270405	-0,147033	0,046092	-0,069276
Микроагрегатный состав 0-2 мкм	-0,095784	0,659564	-0,533606	0,156910	0,375831	0,037048	0,225867	0,202074	0,090793	0,022328	-0,056845
Микроагрегатный состав 2-20 мкм	-0,645549	0,487808	-0,271117	0,192107	-0,138807	-0,309206	0,306140	-0,121194	0,099931	0,018816	0,035699
Микроагрегатный состав 20-50 мкм	-0,062438	-0,224565	**0,770877**	0,352592	0,193839	0,375508	-0,132911	0,018529	-0,168284	-0,035882	0,030052
Микроагрегатный состав 50-100 мкм	0,119576	**-0,725397**	0,048048	-0,030872	0,377836	0,474636	-0,065215	0,236215	-0,135141	-0,034726	-0,093171

Продолжение приложения 18.

	Фактор 1	**Фактор 2**	**Фактор 3**	**Фактор 4**	**Фактор 5**	**Фактор 6**	**Фактор 7**	**Фактор 8**	**Фактор 9**	**Фактор 10**	**Фактор 11**
Микроагрегатный состав 100-250 мкм	**0,789715**	0,026846	-0,179085	-0,461169	-0,144490	-0,151717	-0,261781	0,083534	0,080318	-0,047562	0,052576
Микроагрегатный состав 250-500 мкм	0,638703	0,308528	0,070888	-0,302694	-0,339368	-0,323421	-0,398928	-0,112768	0,057648	0,070935	0,015270
Микроагрегатный состав 500-1000 мкм	-0,365609	-0,498782	0,202286	0,270094	-0,383054	-0,124206	-0,483495	-0,197642	-0,099142	0,241072	0,027264
Эстеразная активность (Vm)	0,305162	**-0,763577**	0,481251	0,118348	0,103073	0,147273	-0,008647	-0,189085	0,090198	0,043468	0,007159
Эстеразная активность (Km)	**-0,878948**	-0,268281	0,350197	-0,073135	0,020773	0,028754	0,034836	-0,072607	-0,013848	-0,131649	0,047144
декстран 500	-0,187073	-0,509693	-0,583543	-0,368720	-0,307362	0,285152	0,142972	-0,096185	0,004192	0,026680	-0,150116
инулин	-0,399696	-0,589148	-0,585065	0,205117	-0,020541	-0,001170	-0,216103	0,236076	-0,070493	0,022934	0,020579
казеин	-0,422946	0,580362	0,248275	0,489866	0,066612	0,347307	0,106813	-0,178356	-0,014568	0,073821	-0,093524
кератин	-0,467942	-0,454074	-0,650841	0,109737	-0,187069	0,054607	-0,268364	0,165431	-0,032608	0,027954	-0,001382
крахмал	0,209911	-0,439043	**0,711967**	-0,184289	-0,122302	0,095775	0,275180	-0,337195	-0,082084	-0,010088	-0,043872
ксилан	0,321831	-0,033049	-0,077980	**-0,836338**	-0,339364	0,084456	0,086975	-0,195546	0,110481	-0,057325	-0,078708

Продолжение приложения 18.

	Фактор 1	**Фактор 2**	**Фактор 3**	**Фактор 4**	**Фактор 5**	**Фактор 6**	**Фактор 7**	**Фактор 8**	**Фактор 9**	**Фактор 10**	**Фактор 11**
НК	-0,593847	0,143440	-0,166993	**0,713893**	0,064477	0,071254	-0,234545	0,123281	-0,062415	0,070009	0,031619
пектин	-0,408862	0,591557	0,261055	0,603893	0,115177	0,150888	-0,091719	-0,046508	-0,018217	0,055823	0,000642
твин 20	-0,032263	-0,619319	-0,608753	-0,323454	-0,254311	-0,124577	-0,191455	0,149230	0,005886	-0,021349	0,024320
целлюлоза	-0,149063	**0,807691**	0,228778	-0,100776	-0,262081	-0,022415	-0,405225	-0,094274	0,125426	-0,030624	0,062992
Дегидрогеназая активность (мг ттф/10г в стуки)	-0,636614	-0,666416	-0,083316	0,155643	0,117731	-0,301159	0,062360	0,040457	-0,071919	-0,011807	0,063654
C, %	**-0,962015**	0,097813	0,029285	-0,114485	-0,033799	-0,132184	0,064231	-0,156263	-0,053317	0,019294	0,024929
N, %	-0,673522	-0,157467	-0,233171	-0,318672	0,334887	-0,221748	0,382859	0,069925	0,072048	0,166188	0,141600
C/N	**-0,762874**	0,272419	0,239601	0,107368	-0,320737	0,005271	-0,225777	-0,283584	-0,138446	-0,122066	-0,080699
$\delta^{15}N$	-0,269846	-0,514554	0,410120	0,421293	-0,180160	-0,272523	-0,252454	0,137881	0,303574	-0,067264	-0,174867
^{13}C	**-0,964480**	-0,078592	0,101633	-0,038050	-0,078561	-0,117384	0,120657	-0,121963	-0,025764	-0,036994	0,020198
Угол смачивания	-0,338483	0,379681	-0,370060	-0,253863	-0,204425	0,486300	0,255754	-0,214809	-0,320380	0,020723	0,216743

Приложение 19. Корреляционный анализ.Таблица корреляционной матрицы. G′ – модуль упругости; G″ – модуль вязкости; N удельная - удельная поверхность, измеренная по сорбции азота; LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости; G′=G″ – точка разрушения структуры; Числ.люм. – число клеток рассчитанное с помощью прямой люминесцентной микроскопии; Посев числен. – число колониеобразующих бактерий (КОЕ) на г почвы; ГС ОВ - % содержания фракций с органическим веществом по результатам гранулометрического анализа; ГС - % содержания фракций без органического вещества по результатам гранулометрического анализа; micro - % содержания фракций по результатам микроагрегатного анализа; Vm (Эст) – максимальная скорость реакции (эстеразная активность); Km – константа Михаэлиса (эстеразная активность); декстран 500, инулин, казеин, кератин, крахмал, ксилан, нуклеиновые кислоты, пектин, твин 20, целлюлоза – оценка обилия микроорганизмов на субстратах определенная по кривым роста; мг тфф/10г в стуки – потребление ТФФ (дегидрогеназная активность); Угол смачиваемости – значение угла смачиваемости; С, % - % содержания углерода; N, % - % содержания азота; C/N– соотношение углерода к азоту; $\delta^{15}N$ – промилле изотопа азота; $\delta^{13}C$ – промилле изотопа углерода.

	Crossover G'=G"	**G"**	**N удельная**	**LVE-range**	**G'**	**Деформация, %**	**посев люм.**	**Посев числен.**	**С орг**	**ГС ОВ 0-2 мкм**	**ГС ОВ 2-20 мкм**	**ГС ОВ 20-50 мкм**	**ГС ОВ 50-100 мкм**	**ГС ОВ 100-250 мкм**	**ГС ОВ 250-500 мкм**	**ГС ОВ 500-1000 мкм**
Crossover G'=G"	***1,00***	0,53	-0,39	0,50	**0,76**	-0,31	-0,37	-0,53	-0,27	0,27	0,30	-0,11	-0,34	-0,37	-0,28	-0,20
G"	0,53	***1,00***	0,16	0,10	**0,89**	**-0,81**	0,06	-0,17	-0,12	0,02	0,10	0,38	-0,14	0,03	-0,07	-0,08
N удельная	-0,39	0,16	***1,00***	-0,45	0,04	-0,40	0,15	0,18	0,01	-0,33	-0,38	-0,10	0,39	0,40	0,27	0,19
LVE-range	0,50	0,10	-0,45	***1,00***	0,35	0,44	-0,47	-0,56	-0,39	0,30	0,37	0,04	-0,26	-0,44	-0,46	-0,45
G'	**0,76**	**0,89**	0,04	0,35	***1,00***	-0,68	-0,36	-0,56	-0,45	0,34	0,39	0,24	-0,37	-0,34	-0,40	-0,37
Деформация, %	-0,31	**-0,81**	-0,40	0,44	-0,68	***1,00***	-0,12	0,02	0,04	-0,01	-0,02	-0,25	0,08	-0,10	-0,05	-0,06

Продолжение приложения 19.

	Crossover G'=G''	G''	N удельная	LVE-range	G'	Деформ., %	посев люм.	Посев числен.	С орг	ГС ОВ 0-2 мкм	ГС ОВ 2-20 мкм	ГС ОВ 20-50 мкм	ГС ОВ 50-100 мкм	ГС ОВ 100-250 мкм	ГС ОВ 250-500 мкм	ГС ОВ 500-1000 мкм
посев люм.	-0,37	0,06	0,15	-0,47	-0,36	-0,12	***1,00***	**0,95**	**0,92**	-0,77	-0,72	0,09	0,60	**0,85**	**0,83**	**0,76**
Посев числен.	-0,53	-0,17	0,18	-0,56	-0,56	0,02	**0,95**	***1,00***	**0,87**	-0,77	-0,77	-0,08	0,58	**0,82**	**0,86**	**0,80**
С орг	-0,27	-0,12	0,01	-0,39	-0,45	0,04	**0,92**	**0,87**	***1,00***	-0,77	-0,70	0,01	0,66	**0,82**	**0,83**	**0,77**
ГС ОВ 0-2 мкм	0,27	0,02	-0,33	0,30	0,34	-0,01	-0,77	-0,77	-0,77	***1,00***	**0,97**	0,26	-0,87	-0,95	-0,94	-0,90
ГС ОВ 2-20 мкм	0,30	0,10	-0,38	0,37	0,39	-0,02	-0,72	-0,77	-0,70	**0,97**	***1,00***	0,38	-0,79	-0,92	-0,96	-0,94
ГС ОВ 20-50 мкм	-0,11	0,38	-0,10	0,04	0,24	-0,25	0,09	-0,08	0,01	0,26	0,38	***1,00***	-0,25	-0,05	-0,27	-0,31
ГС ОВ 50-100 мкм	-0,34	-0,14	0,39	-0,26	-0,37	0,08	0,60	0,58	0,66	-0,87	-0,79	-0,25	***1,00***	**0,81**	**0,75**	**0,70**
ГС ОВ 100-250 мкм	-0,37	0,03	0,40	-0,44	-0,34	-0,10	**0,85**	**0,82**	**0,82**	-0,95	-0,92	-0,05	**0,81**	***1,00***	**0,95**	**0,89**
ГС ОВ 250-500 мкм	-0,28	-0,07	0,27	-0,46	-0,40	-0,05	**0,83**	**0,86**	**0,83**	-0,94	-0,96	-0,27	**0,75**	**0,95**	***1,00***	**0,98**
ГС ОВ 500-1000 мкм	-0,20	-0,08	0,19	-0,45	-0,37	-0,06	**0,76**	**0,80**	**0,77**	-0,90	-0,94	-0,31	**0,70**	**0,89**	**0,98**	***1,00***
ГС 0-2 мкм	0,08	0,07	0,43	0,29	0,27	0,00	-0,43	-0,39	-0,57	0,25	0,18	-0,25	-0,10	-0,32	-0,36	-0,39
ГС 2-20 мкм	-0,39	-0,18	0,59	-0,23	-0,37	0,11	0,57	0,63	0,49	-0,67	-0,71	-0,36	0,57	0,62	0,61	0,51
ГС 20-50 мкм	0,28	0,08	-0,52	0,19	0,25	-0,05	-0,40	-0,51	-0,33	**0,74**	**0,81**	0,65	-0,63	-0,61	-0,67	-0,64
ГС 50-100 мкм	0,31	0,17	-0,47	0,21	0,30	-0,06	-0,53	-0,52	-0,52	0,39	0,39	0,03	-0,37	-0,45	-0,39	-0,26
ГС 100-250 мкм	0,06	0,17	-0,26	-0,43	-0,01	-0,34	0,37	0,33	0,44	-0,23	-0,19	0,00	0,23	0,28	0,35	0,42

Продолжение приложения 19.

	Crossover G'=G''	G''	N удельная	LVE-range	G'	Деформ., %	посев люм.	Посев числен.	С орг	ГС ОВ 0-2 мкм	ГС ОВ 2-20 мкм	ГС ОВ 20-50 мкм	ГС ОВ 50-100 мкм	ГС ОВ 100-250 мкм	ГС ОВ 250-500 мкм	ГС ОВ 500-1000 мкм
ГС 250-500 мкм	-0,28	0,08	0,25	-0,41	0,02	-0,34	-0,04	0,02	-0,07	0,16	0,14	-0,01	0,06	-0,10	-0,09	-0,06
ГС 500-1000 мкм	-0,45	-0,03	0,37	-0,38	-0,09	-0,22	-0,08	0,04	-0,15	0,14	0,05	0,10	0,05	-0,04	-0,04	-0,01
Микроагрегатный состав 0-2 мкм	0,51	0,08	-0,32	0,03	0,12	-0,06	0,16	0,02	0,31	-0,19	-0,14	0,02	0,04	0,20	0,23	0,27
Микроагрегатный состав 2-20 мкм	-0,14	-0,14	-0,21	-0,32	-0,37	0,04	**0,76**	0,67	**0,86**	-0,42	-0,35	0,24	0,30	0,55	0,55	0,50
Микроагрегатный состав 20-50 мкм	-0,33	-0,27	0,26	-0,27	-0,24	0,05	-0,16	0,09	-0,33	0,10	-0,12	-0,34	-0,24	-0,11	0,04	0,09
Микроагрегатный состав 50-100 мкм	-0,03	0,21	0,48	-0,23	0,26	-0,38	-0,39	-0,30	-0,49	-0,01	-0,11	-0,22	0,06	-0,03	-0,02	0,06
Микроагрегатный состав 100-250 мкм	0,40	0,19	-0,18	**0,73**	0,45	0,17	-0,63	-0,74	-0,59	0,46	0,57	0,02	-0,29	-0,60	-0,70	-0,73
Микроагрегатный состав 250-500 мкм	0,26	0,04	-0,38	**0,76**	0,22	0,38	-0,38	-0,45	-0,38	0,44	0,54	0,06	-0,34	-0,58	-0,63	-0,69
Микроагрегатный состав 500-1000 мкм	-0,53	0,10	0,06	-0,34	-0,20	-0,13	0,41	0,49	0,16	-0,15	-0,16	0,16	0,13	0,19	0,19	0,15
Эстеразная активность (Vm)	-0,17	0,10	0,41	-0,23	0,20	-0,33	-0,45	-0,31	-0,58	0,43	0,30	-0,14	-0,27	-0,41	-0,38	-0,34
Эстеразная активность (Km)	-0,68	-0,22	0,56	-0,66	-0,55	-0,06	**0,71**	**0,84**	0,63	-0,70	-0,77	-0,18	0,59	**0,77**	**0,79**	**0,74**
декстран 500	0,00	0,19	0,03	-0,05	0,08	-0,16	0,10	0,02	0,24	-0,31	-0,20	0,07	0,52	0,30	0,23	0,27
Инулин	-0,19	0,42	0,16	-0,50	0,11	-0,52	0,36	0,29	0,23	-0,36	-0,29	0,30	0,31	0,45	0,35	0,36
Казеин	0,02	-0,36	-0,36	-0,19	-0,40	0,23	0,36	0,48	0,42	-0,22	-0,34	-0,25	-0,03	0,22	0,45	0,51
Кератин	-0,17	0,35	0,00	-0,39	0,02	-0,37	0,46	0,38	0,38	-0,46	-0,37	0,24	0,41	0,51	0,43	0,44

Продолжение приложения 19.

	Crossover G'=G''	G''	N удельная	LVE-range	G'	Деформация, %	посев люм.	Посев числен.	С орг	ГС ОВ 0-2 мкм	ГС ОВ 2-20 мкм	ГС ОВ 20-50 мкм	ГС ОВ 50-100 мкм	ГС ОВ 100-250 мкм	ГС ОВ 250-500 мкм	ГС ОВ 500-1000 мкм
крахмал	-0,32	-0,25	0,37	0,02	-0,11	0,12	-0,35	-0,20	-0,36	0,33	0,22	-0,14	-0,11	-0,32	-0,29	-0,29
ксилан	0,15	-0,10	0,00	0,58	0,08	0,36	-0,30	-0,35	-0,09	0,02	0,13	-0,20	0,27	-0,16	-0,23	-0,25
НК	-0,16	0,05	-0,23	-0,54	-0,24	-0,21	0,60	0,63	0,45	-0,35	-0,40	0,12	0,03	0,43	0,53	0,56
пектин	-0,03	-0,27	-0,34	-0,24	-0,37	0,16	0,41	0,52	0,36	-0,18	-0,30	-0,15	-0,14	0,20	0,40	0,43
твин 20	-0,09	0,40	0,16	-0,05	0,24	-0,30	0,07	-0,07	0,03	-0,18	-0,03	0,27	0,34	0,19	0,00	-0,02
целлюлоза	0,04	-0,36	-0,45	0,37	-0,37	0,61	0,30	0,35	0,34	-0,22	-0,21	-0,31	0,02	0,08	0,20	0,15
Дегидрогеназая активность (мг ттф/10г в стуки)	-0,56	0,26	0,61	-0,78	-0,10	-0,57	0,57	0,55	0,39	-0,41	-0,40	0,32	0,40	0,60	0,47	0,42
С, %	-0,49	-0,13	0,29	-0,49	-0,50	0,00	**0,94**	**0,94**	**0,92**	-0,82	-0,81	-0,02	**0,70**	**0,91**	**0,89**	**0,83**
N, %	-0,27	0,09	0,59	-0,54	-0,14	-0,33	0,61	0,51	0,63	-0,65	-0,59	0,01	**0,73**	**0,78**	0,65	0,59
C/N	-0,44	-0,26	-0,10	-0,22	-0,57	0,28	**0,79**	**0,87**	**0,74**	-0,59	-0,62	-0,03	0,35	0,60	0,69	0,65
δ15N	-0,61	-0,12	0,28	-0,68	-0,33	-0,22	0,22	0,37	0,03	0,03	-0,03	0,07	-0,05	0,02	0,03	-0,01
^{13}C	-0,61	-0,17	0,36	-0,62	-0,55	-0,05	**0,89**	**0,93**	**0,86**	-0,76	-0,76	0,01	0,66	**0,86**	**0,85**	**0,79**
угол смачивания	0,15	-0,14	-0,33	0,27	-0,17	0,34	0,29	0,24	0,48	-0,43	-0,40	-0,12	0,36	0,42	0,49	0,54

Продолжение приложения 19.

	ГС 0-2 мкм	ГС 2-20 мкм	ГС 20-50 мкм	ГС 50-100 мкм	ГС 100-250 мкм	ГС 250-500 мкм	ГС 500-1000 мкм	Микроагрег 0-2 мкм	Микроагрег 2-20 мкм	Микроагрег. 20-50 мкм	Микроагрег 50-100 мкм	Микроагрег 100-250 мкм	Микроагрег 250-500 мкм	Микроагрег 500-1000 мкм	Эстеразная активность (Vm)	Эстеразная активность (Km)
Crossover G'=G"	0,08	-0,39	0,28	0,31	0,06	-0,28	-0,45	0,51	-0,14	-0,33	-0,03	0,40	0,26	-0,53	-0,17	-0,68
G"	0,07	-0,18	0,08	0,17	0,17	0,08	-0,03	0,08	-0,14	-0,27	0,21	0,19	0,04	0,10	0,10	-0,22
N удельная	0,43	0,59	-0,52	-0,47	-0,26	0,25	0,37	-0,32	-0,21	0,26	0,48	-0,18	-0,38	0,06	0,41	0,56
LVE-range	0,29	-0,23	0,19	0,21	-0,43	-0,41	-0,38	0,03	-0,32	-0,27	-0,23	**0,73**	**0,76**	-0,34	-0,23	-0,66
G'	0,27	-0,37	0,25	0,30	-0,01	0,02	-0,09	0,12	-0,37	-0,24	0,26	0,45	0,22	-0,20	0,20	-0,55
Деформация, %	0,00	0,11	-0,05	-0,06	-0,34	-0,34	-0,22	-0,06	0,04	0,05	-0,38	0,17	0,38	-0,13	-0,33	-0,06
посев люм.	-0,43	0,57	-0,40	-0,53	0,37	-0,04	-0,08	0,16	**0,76**	-0,16	-0,39	-0,63	-0,38	0,41	-0,45	**0,71**
Посев числен.	-0,39	0,63	-0,51	-0,52	0,33	0,02	0,04	0,02	0,67	0,09	-0,30	-0,74	-0,45	0,49	-0,31	**0,84**
С орг	-0,57	0,49	-0,33	-0,52	0,44	-0,07	-0,15	0,31	**0,86**	-0,33	-0,49	-0,59	-0,38	0,16	-0,58	0,63
ГС ОВ 0-2 мкм	0,25	-0,67	**0,74**	0,39	-0,23	0,16	0,14	-0,19	-0,42	0,10	-0,01	0,46	0,44	-0,15	0,43	-0,70
ГС ОВ 2-20 мкм	0,18	-0,71	**0,81**	0,39	-0,19	0,14	0,05	-0,14	-0,35	-0,12	-0,11	0,57	0,54	-0,16	0,30	-0,77
ГС ОВ 20-50 мкм	-0,25	-0,36	0,65	0,03	0,00	-0,01	0,10	0,02	0,24	-0,34	-0,22	0,02	0,06	0,16	-0,14	-0,18
ГС ОВ 50-100 мкм	-0,10	0,57	-0,63	-0,37	0,23	0,06	0,05	0,04	0,30	-0,24	0,06	-0,29	-0,34	0,13	-0,27	0,59
ГС ОВ 100-250 мкм	-0,32	0,62	-0,61	-0,45	0,28	-0,10	-0,04	0,20	0,55	-0,11	-0,03	-0,60	-0,58	0,19	-0,41	**0,77**
ГС ОВ 250-500 мкм	-0,36	0,61	-0,67	-0,39	0,35	-0,09	-0,04	0,23	0,55	0,04	-0,02	-0,70	-0,63	0,19	-0,38	**0,79**
ГС ОВ 500-1000 мкм	-0,39	0,51	-0,64	-0,26	0,42	-0,06	-0,01	0,27	0,50	0,09	0,06	-0,73	-0,69	0,15	-0,34	**0,74**
ГС 0-2 мкм	***1,00***	0,30	-0,13	-0,28	-0,76	-0,17	0,01	-0,26	-0,57	0,37	0,25	0,34	0,34	-0,11	0,42	-0,19
ГС 2-20 мкм	0,30	***1,00***	-0,72	-0,84	-0,37	-0,23	-0,11	-0,08	0,24	0,20	-0,16	-0,31	-0,12	0,09	-0,13	0,68

Продолжение приложения 19.

	ГС 0-2 мкм	ГС 2-20 мкм	ГС 20-50 мкм	ГС 50-100 мкм	ГС 100-250 мкм	ГС 250-500 мкм	ГС 500-1000 мкм	Микроагрег 0-2 мкм	Микроагрег 2-20 мкм	Микроагрег 20-50 мкм	Микроагрег 50-100 мкм	Микроагрег 100-250 мкм	Микроагрег 250-500 мкм	Микроагрег 500-1000 мкм	Эстеразная активность (Vm)	Эстеразная активность (Km)
ГС 20-50 мкм	-0,13	-0,72	***1,00***	0,27	-0,03	-0,11	-0,10	0,28	0,12	-0,29	-0,30	0,21	0,24	-0,24	-0,10	-0,68
ГС 50-100 мкм	-0,28	-0,84	0,27	***1,00***	0,42	0,28	0,15	-0,09	-0,50	0,01	0,48	0,32	0,05	0,08	0,24	-0,49
ГС 100-250 мкм	-0,76	-0,37	-0,03	0,42	***1,00***	0,54	0,25	0,08	0,33	-0,27	0,08	-0,34	-0,44	0,34	-0,04	0,21
ГС 250-500 мкм	-0,17	-0,23	-0,11	0,28	0,54	***1,00***	**0,86**	-0,69	-0,26	0,18	0,41	-0,12	-0,24	0,54	**0,73**	0,31
ГС 500-1000 мкм	0,01	-0,11	-0,10	0,15	0,25	**0,86**	***1,00***	-0,75	-0,32	0,49	0,52	-0,32	-0,39	0,53	**0,79**	0,43
Микроагрегатный состав 0-2 мкм	-0,26	-0,08	0,28	-0,09	0,08	-0,69	-0,75	***1,00***	0,55	-0,46	-0,34	-0,13	-0,19	-0,66	-0,76	-0,30
Микроагрегатный состав 2-20 мкм	-0,57	0,24	0,12	-0,50	0,33	-0,26	-0,32	0,55	***1,00***	-0,41	-0,72	-0,55	-0,29	-0,05	-0,71	0,33
Микроагрегатный состав 20-50 мкм	0,37	0,20	-0,29	0,01	-0,27	0,18	0,49	-0,46	-0,41	***1,00***	0,47	-0,41	-0,31	0,33	0,62	0,38
Микроагрегатный состав 50-100 мкм	0,25	-0,16	-0,30	0,48	0,08	0,41	0,52	-0,34	-0,72	0,47	***1,00***	-0,02	-0,43	0,10	0,66	0,11
Микроагрегатный состав 100-250 мкм	0,34	-0,31	0,21	0,32	-0,34	-0,12	-0,32	-0,13	-0,55	-0,41	-0,02	***1,00***	**0,83**	-0,30	0,03	-0,75
Микроагрегатный состав 250-500 мкм	0,34	-0,12	0,24	0,05	-0,44	-0,24	-0,39	-0,19	-0,29	-0,31	-0,43	**0,83**	***1,00***	-0,06	-0,09	-0,63
Микроагрегатный состав 500-1000 мкм	-0,11	0,09	-0,24	0,08	0,34	0,54	0,53	-0,66	-0,05	0,33	0,10	-0,30	-0,06	***1,00***	0,38	0,46
Эстеразная активность (Vm)	0,42	-0,13	-0,10	0,24	-0,04	**0,73**	**0,79**	-0,76	-0,71	0,62	0,66	0,03	-0,09	0,38	***1,00***	0,11
Эстеразная активность (Km)	-0,19	0,68	-0,68	-0,49	0,21	0,31	0,43	-0,30	0,33	0,38	0,11	-0,75	-0,63	0,46	0,11	***1,00***
декстран 500	-0,48	-0,28	-0,17	0,41	0,67	0,55	0,36	-0,15	-0,04	-0,43	0,33	0,06	-0,24	0,14	0,04	0,13
инулин	-0,49	-0,23	-0,12	0,40	0,67	0,36	0,23	-0,02	0,07	-0,18	0,41	-0,25	-0,48	0,46	0,02	0,26
казеин	-0,22	0,20	-0,02	-0,25	0,08	-0,33	-0,15	0,40	0,52	0,38	-0,33	-0,70	-0,38	-0,02	-0,30	0,28
кератин	-0,62	-0,20	-0,17	0,39	**0,76**	0,32	0,14	0,01	0,18	-0,30	0,25	-0,22	-0,38	0,47	-0,14	0,27
крахмал	0,44	0,12	-0,13	-0,12	-0,29	0,57	**0,76**	-0,77	-0,48	0,55	0,30	0,01	0,04	0,21	**0,77**	0,23
ксилан	0,12	0,01	-0,18	0,04	-0,10	0,17	0,02	-0,27	-0,28	-0,44	-0,06	0,66	0,52	-0,25	0,01	-0,23
НК	-0,47	0,02	-0,01	0,03	0,43	-0,16	-0,12	0,35	0,51	0,21	-0,10	-0,72	-0,53	0,38	-0,29	0,35

Продолжение приложения 19.

	ГС 0-2 мкм	ГС 2-20 мкм	ГС 20-50 мкм	ГС 50-100 мкм	ГС 100-250 мкм	ГС 250-500 мкм	ГС 500-1000 мкм	Микроагрегатный состав 0-2 мкм	Микроагрегатный состав 2-20 мкм	Микроагрегатный состав 20-50 мкм	Микроагрегатный состав 50-100 мкм	Микроагрегатный состав 100-250 мкм	Микроагрегатный состав 250-500 мкм	Микроагрегатный состав 500-1000 мкм	Эстеразная активность (Vm)	Эстеразная активность (Km)
пектин	-0,16	0,23	0,01	-0,27	-0,01	-0,44	-0,28	0,40	0,51	0,40	-0,37	-0,66	-0,29	0,08	-0,33	0,25
твин 20	-0,31	-0,27	-0,10	0,42	0,48	0,44	0,19	-0,25	-0,18	-0,51	0,32	0,34	0,03	0,28	0,06	-0,02
целлюлоза	-0,03	0,40	-0,20	-0,35	-0,25	-0,57	-0,62	0,21	0,35	-0,06	-0,72	0,06	0,48	-0,03	-0,56	-0,01
Дегидрогеназая активность (мг ттф/10г в стуки)	-0,24	0,23	-0,25	-0,18	0,40	0,50	0,53	-0,26	0,22	0,10	0,31	-0,56	-0,64	0,55	0,25	0,70
C, %	-0,36	0,66	-0,51	-0,61	0,29	0,01	0,07	0,08	**0,72**	-0,04	-0,29	-0,72	-0,50	0,32	-0,37	**0,85**
N, %	-0,11	0,46	-0,35	-0,51	0,24	0,08	0,05	0,26	0,51	-0,30	0,02	-0,45	-0,58	-0,07	-0,24	0,57
C/N	-0,40	0,53	-0,41	-0,42	0,19	-0,05	0,05	-0,10	0,57	0,20	-0,42	-0,62	-0,21	0,49	-0,31	0,69
$\delta^{15}N$	-0,07	0,16	-0,11	-0,08	0,16	0,49	0,47	-0,54	-0,07	0,44	0,18	-0,33	-0,19	0,70	0,50	0,45
^{13}C	-0,39	0,61	-0,50	-0,55	0,34	0,18	0,25	-0,06	0,65	0,07	-0,17	-0,78	-0,60	0,41	-0,20	**0,92**
угол смачивания	-0,44	-0,04	-0,18	0,08	0,33	-0,17	-0,15	0,36	0,41	-0,27	-0,22	-0,22	-0,23	-0,23	-0,54	0,13

Продолжение приложения 19.

	декстран 500	инулин	Казеин	кератин	крахмал	ксилан	НК	пектин	твин 20	целлюлоза	Дегидроге н. акт. (мг ттф/10г в стуки)	C, %	N, %	C/N	$\delta^{15}N$	^{13}C	угол смачивания
Crossover G'=G"	0,00	-0,19	0,02	-0,17	-0,32	0,15	-0,16	-0,03	-0,09	0,04	-0,56	-0,49	-0,27	-0,44	-0,61	-0,61	0,15
G"	0,19	0,42	-0,36	0,35	-0,25	-0,10	0,05	-0,27	0,40	-0,36	0,26	-0,13	0,09	-0,26	-0,12	-0,17	-0,14
N удельная	0,03	0,16	-0,36	0,00	0,37	0,00	-0,23	-0,34	0,16	-0,45	0,61	0,29	0,59	-0,10	0,28	0,36	-0,33
LVE-range	-0,05	-0,50	-0,19	-0,39	0,02	0,58	-0,54	-0,24	-0,05	0,37	-0,78	-0,49	-0,54	-0,22	-0,68	-0,62	0,27
G'	0,08	0,11	-0,40	0,02	-0,11	0,08	-0,24	-0,37	0,24	-0,37	-0,10	-0,50	-0,14	-0,57	-0,33	-0,55	-0,17
Деформация, %	-0,16	-0,52	0,23	-0,37	0,12	0,36	-0,21	0,16	-0,30	0,61	-0,57	0,00	-0,33	0,28	-0,22	-0,05	0,34
посев люм.	0,10	0,36	0,36	0,46	-0,35	-0,30	0,60	0,41	0,07	0,30	0,57	**0,94**	0,61	**0,79**	0,22	**0,89**	0,29
Посев числен.	0,02	0,29	0,48	0,38	-0,20	-0,35	0,63	0,52	-0,07	0,35	0,55	**0,94**	0,51	**0,87**	0,37	**0,93**	0,24
С орг	0,24	0,23	0,42	0,38	-0,36	-0,09	0,45	0,36	0,03	0,34	0,39	**0,92**	0,63	**0,74**	0,03	**0,86**	0,48
ГС ОВ 0-2 мкм	-0,31	-0,36	-0,22	-0,46	0,33	0,02	-0,35	-0,18	-0,18	-0,22	-0,41	-0,82	-0,65	-0,59	0,03	-0,76	-0,43
ГС ОВ 2-20 мкм	-0,20	-0,29	-0,34	-0,37	0,22	0,13	-0,40	-0,30	-0,03	-0,21	-0,40	-0,81	-0,59	-0,62	-0,03	-0,76	-0,40
ГС ОВ 20-50 мкм	0,07	0,30	-0,25	0,24	-0,14	-0,20	0,12	-0,15	0,27	-0,31	0,32	-0,02	0,01	-0,03	0,07	0,01	-0,12
ГС ОВ 50-100 мкм	0,52	0,31	-0,03	0,41	-0,11	0,27	0,03	-0,14	0,34	0,02	0,40	**0,70**	**0,73**	0,35	-0,05	0,66	0,36
ГС ОВ 100-250 мкм	0,30	0,45	0,22	0,51	-0,32	-0,16	0,43	0,20	0,19	0,08	0,60	**0,91**	**0,78**	0,60	0,02	**0,86**	0,42
ГС ОВ 250-500 мкм	0,23	0,35	0,45	0,43	-0,29	-0,23	0,53	0,40	0,00	0,20	0,47	**0,89**	0,65	0,69	0,03	**0,85**	0,49
ГС ОВ 500-1000 мкм	0,27	0,36	0,51	0,44	-0,29	-0,25	0,56	0,43	-0,02	0,15	0,42	**0,83**	0,59	0,65	-0,01	**0,79**	0,54
ГС 0-2 мкм	-0,48	-0,49	-0,22	-0,62	0,44	0,12	-0,47	-0,16	-0,31	-0,03	-0,24	-0,36	-0,11	-0,40	-0,07	-0,39	-0,44
ГС 2-20 мкм	-0,28	-0,23	0,20	-0,20	0,12	0,01	0,02	0,23	-0,27	0,40	0,23	0,66	0,46	0,53	0,16	0,61	-0,04
ГС 20-50 мкм	-0,17	-0,12	-0,02	-0,17	-0,13	-0,18	-0,01	0,01	-0,10	-0,20	-0,25	-0,51	-0,35	-0,41	-0,11	-0,50	-0,18
ГС 50-100 мкм	0,41	0,40	-0,25	0,39	-0,12	0,04	0,03	-0,27	0,42	-0,35	-0,18	-0,61	-0,51	-0,42	-0,08	-0,55	0,08
ГС 100-250 мкм	0,67	0,67	0,08	**0,76**	-0,29	-0,10	0,43	-0,01	0,48	-0,25	0,40	0,29	0,24	0,19	0,16	0,34	0,33

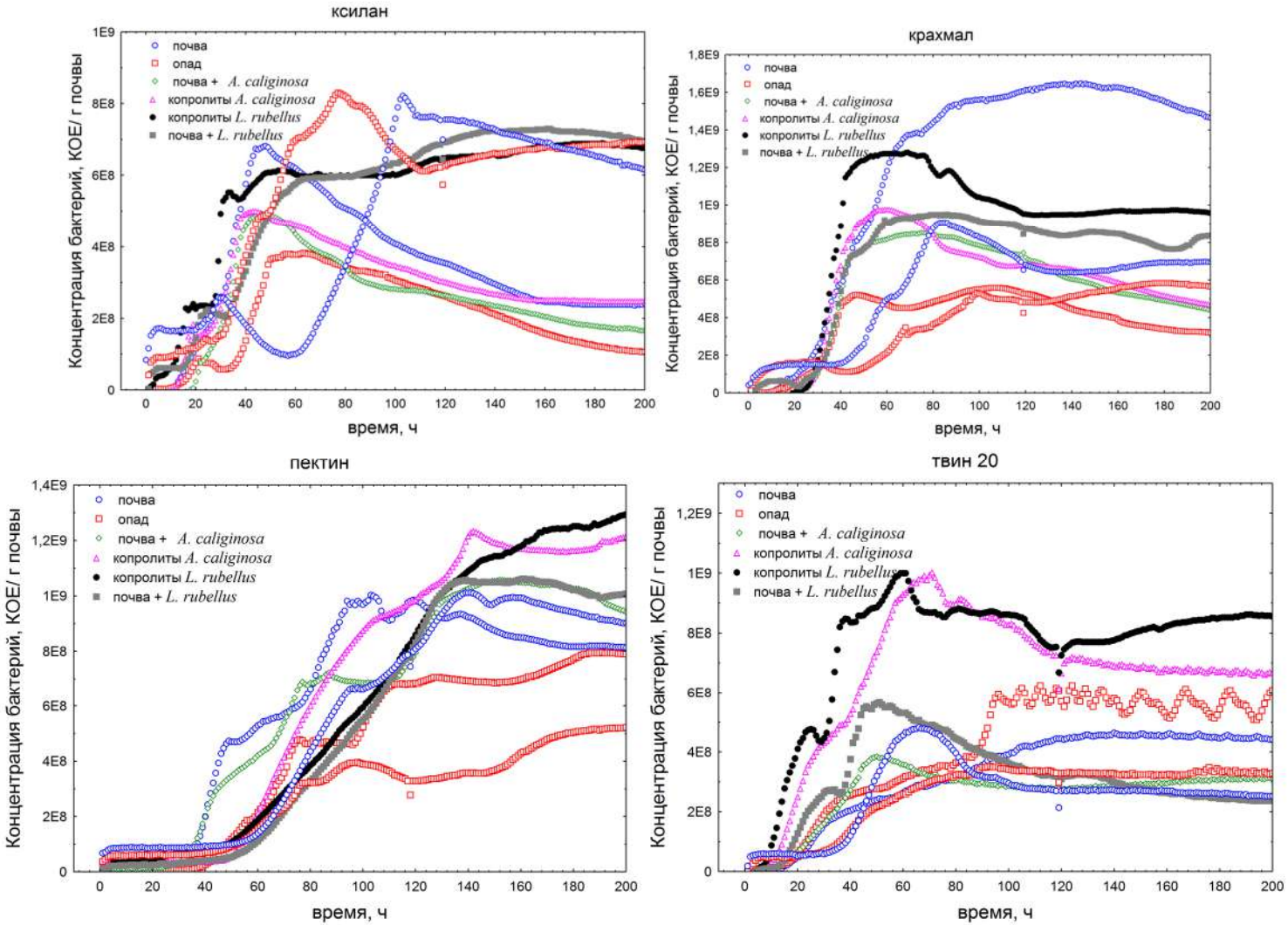
Продолжение приложения 19.

	декстран 500	инулин	казеин	кератин	крахмал	ксилан	НК	пектин	твин 20	целлюлоза	Дегидроген. акт. (мг ттф/10г в стуки)	C, %	N, %	C/N	δ15N	^{13}C	угол смачивания
ГС 250-500 мкм	0,55	0,36	-0,33	0,32	0,57	0,17	-0,16	-0,44	0,44	-0,57	0,50	0,01	0,08	-0,05	0,49	0,18	-0,17
ГС 500-1000 мкм	0,36	0,23	-0,15	0,14	**0,76**	0,02	-0,12	-0,28	0,19	-0,62	0,53	0,07	0,05	0,05	0,47	0,25	-0,15
Микроагрегатный состав 0-2 мкм	-0,15	-0,02	0,40	0,01	-0,77	-0,27	0,35	0,40	-0,25	0,21	-0,26	0,08	0,26	-0,10	-0,54	-0,06	0,36
Микроагрегатный состав 2-20 мкм	-0,04	0,07	0,52	0,18	-0,48	-0,28	0,51	0,51	-0,18	0,35	0,22	**0,72**	0,51	0,57	-0,07	0,65	0,41
Микроагрегатный состав 20-50 мкм	-0,43	-0,18	0,38	-0,30	0,55	-0,44	0,21	0,40	-0,51	-0,06	0,10	-0,04	-0,30	0,20	0,44	0,07	-0,27
Микроагрегатный состав 50-100 мкм	0,33	0,41	-0,33	0,25	0,30	-0,06	-0,10	-0,37	0,32	-0,72	0,31	-0,29	0,02	-0,42	0,18	-0,17	-0,22
Микроагрегатный состав 100-250 мкм	0,06	-0,25	-0,70	-0,22	0,01	0,66	-0,72	-0,66	0,34	0,06	-0,56	-0,72	-0,45	-0,62	-0,33	-0,78	-0,22
Микроагрегатный состав 250-500 мкм	-0,24	-0,48	-0,38	-0,38	0,04	0,52	-0,53	-0,29	0,03	0,48	-0,64	-0,50	-0,58	-0,21	-0,19	-0,60	-0,23
Микроагрегатный состав 500-1000 мкм	0,14	0,46	-0,02	0,47	0,21	-0,25	0,38	0,08	0,28	-0,03	0,55	0,32	-0,07	0,49	0,70	0,41	-0,23
Эстеразная активность (Vm)	0,04	0,02	-0,30	-0,14	**0,77**	0,01	-0,29	-0,33	0,06	-0,56	0,25	-0,37	-0,24	-0,31	0,50	-0,20	-0,54
Эстеразная активность (Km)	0,13	0,26	0,28	0,27	0,23	-0,23	0,35	0,25	-0,02	-0,01	0,70	**0,85**	0,57	0,69	0,45	**0,92**	0,13
декстран 500	***1,00***	0,59	-0,42	0,68	-0,02	0,48	-0,18	-0,60	**0,79**	-0,46	0,32	0,15	0,33	-0,07	-0,13	0,19	0,40
инулин	0,59	***1,00***	-0,28	**0,96**	-0,41	-0,30	0,48	-0,21	**0,75**	-0,51	**0,73**	0,24	0,36	0,02	0,32	0,31	0,00
казеин	-0,42	-0,28	***1,00***	-0,22	-0,14	-0,53	0,63	**0,94**	-0,77	0,48	-0,17	0,40	-0,05	0,60	-0,03	0,35	0,35
кератин	0,68	**0,96**	-0,22	***1,00***	-0,48	-0,17	0,48	-0,18	**0,77**	-0,32	0,63	0,33	0,34	0,16	0,24	0,37	0,17
крахмал	-0,02	-0,41	-0,14	-0,48	***1,00***	0,32	-0,54	-0,28	-0,19	-0,27	0,03	-0,14	-0,17	-0,04	0,25	-0,01	-0,22
ксилан	0,48	-0,30	-0,53	-0,17	0,32	***1,00***	-0,85	-0,71	0,36	0,07	-0,39	-0,19	-0,05	-0,22	-0,41	-0,24	0,24
НК	-0,18	0,48	0,63	0,48	-0,54	-0,85	***1,00***	**0,75**	-0,16	0,15	0,39	0,46	0,13	0,52	0,33	0,46	0,10
пектин	-0,60	-0,21	**0,94**	-0,18	-0,28	-0,71	**0,75**	***1,00***	-0,75	0,54	-0,10	0,37	-0,10	0,59	0,11	0,32	0,16

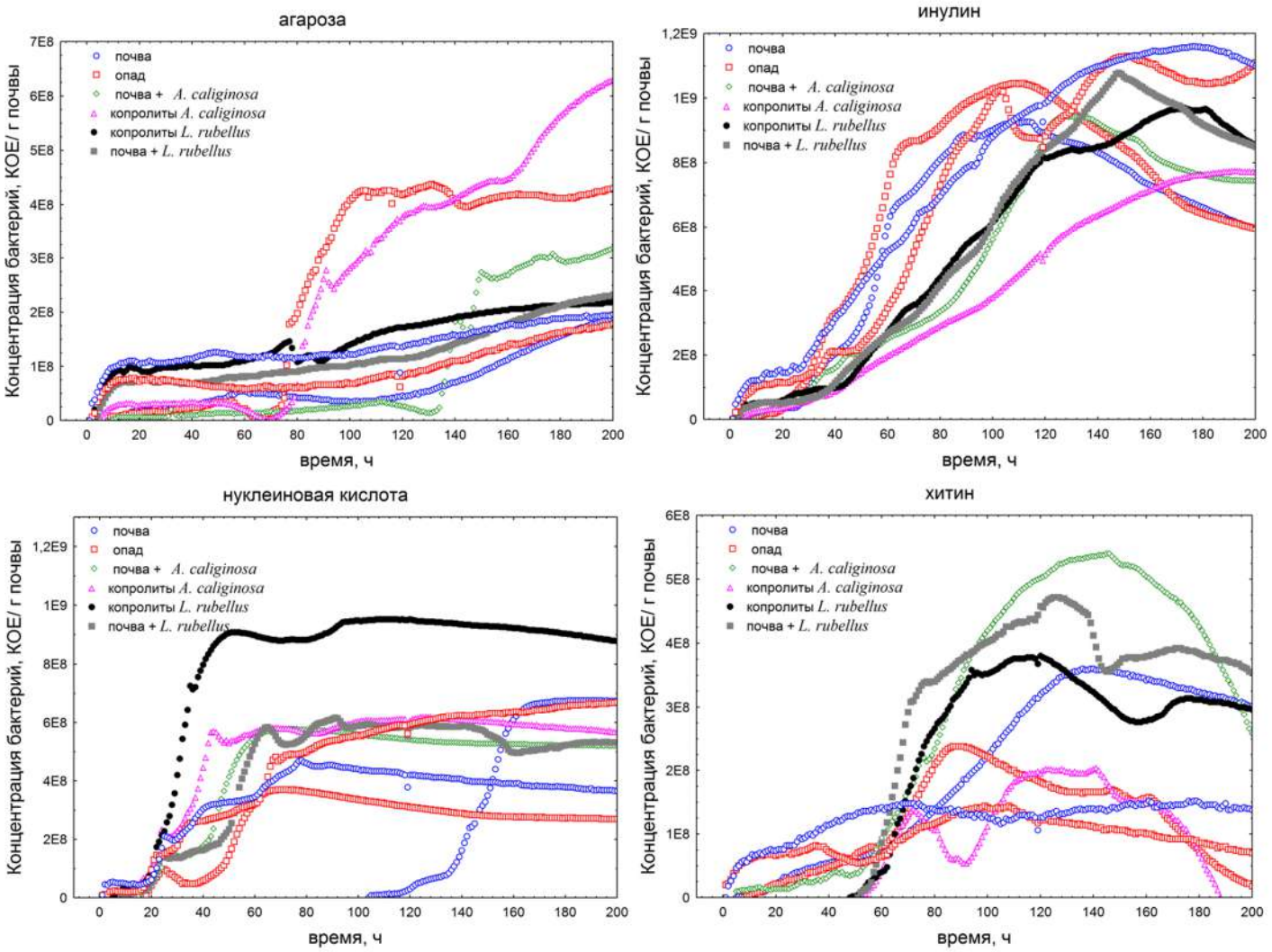
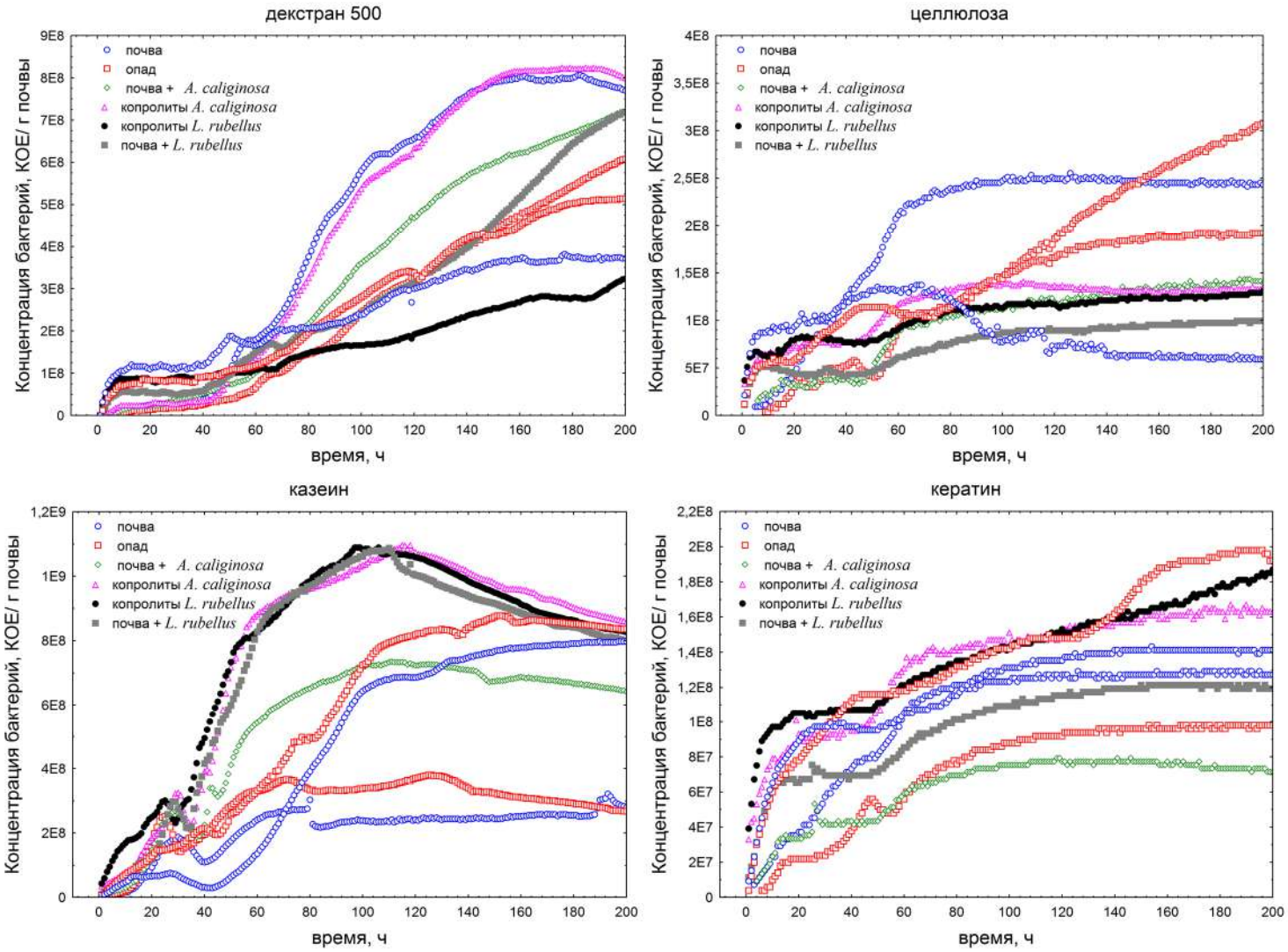
Продолжение приложения 19.

	декстран 500	**Инулин**	**казеин**	**кератин**	**крахмал**	**ксилан**	**НК**	**пектин**	**твин 20**	**целлюлоза**	**Дегидрогеназая активность (мг ттф/10г в стуки)**	**C, %**	**N, %**	**C/N**	**$\delta^{15}N$**	**$\delta^{13}C$**	**угол смачивания**
твин 20	**0,79**	**0,75**	-0,77	**0,77**	-0,19	0,36	-0,16	-0,75	***1,00***	-0,47	0,44	-0,02	0,24	-0,24	0,09	0,02	0,00
целлюлоза	-0,46	-0,51	0,48	-0,32	-0,27	0,07	0,15	0,54	-0,47	***1,00***	-0,54	0,24	-0,28	0,56	-0,15	0,09	0,23
Дегидрогеназая активность (мг ттф/10г в стуки)	0,32	**0,73**	-0,17	0,63	0,03	-0,39	0,39	-0,10	0,44	-0,54	***1,00***	0,57	0,64	0,24	0,56	0,68	-0,17
C, %	0,15	0,24	0,40	0,33	-0,14	-0,19	0,46	0,37	-0,02	0,24	0,57	***1,00***	0,70	**0,80**	0,16	**0,97**	0,40
N, %	0,33	0,36	-0,05	0,34	-0,17	-0,05	0,13	-0,10	0,24	-0,28	0,64	0,70	***1,00***	0,12	-0,07	0,68	0,25
C/N	-0,07	0,02	0,60	0,16	-0,04	-0,22	0,52	0,59	-0,24	0,56	0,24	**0,80**	0,12	***1,00***	0,26	**0,77**	0,34
$\delta^{15}N$	-0,13	0,32	-0,03	0,24	0,25	-0,41	0,33	0,11	0,09	-0,15	0,56	0,16	-0,07	0,26	***1,00***	0,32	-0,69
$\delta^{13}C$	0,19	0,31	0,35	0,37	-0,01	-0,24	0,46	0,32	0,02	0,09	0,68	**0,97**	0,68	**0,77**	0,32	***1,00***	0,30
угол смачивания	0,40	0,00	0,35	0,17	-0,22	0,24	0,10	0,16	0,00	0,23	-0,17	0,40	0,25	0,34	-0,69	0,30	***1,00***

Приложение 20. Примеры кривых роста бактерийи на селективных средах.



Продолжение приложения 20.



Продолжение приложения 20.