

Санкт-Петербургский государственный университет

КУЗЬМИНА Анастасия Алексеевна

Выпускная квалификационная работа

Биологическая активность почв разной степени увлажнения Лисинского лесничества

Уровень образования: магистратура

Направление *06.04.02 «Почвоведение»*

Основная образовательная программа *ВМ.5522 «Почвоведение»*

Научный руководитель: д.г.н., профессор
кафедры почвоведения и экологии почв
Сухачева Е.Ю.

Соруководитель: к.б.н., в.н.с.
ЦМП им. В.В. Докучаева – филиал ФГБНУ ФИЦ
«Почвенный институт имени В.В. Докучаева»
Пятина Е.В.

Рецензент: к.б.н., доцент, зав. кафедры биологии и
почвоведения ФГБОУ ВО ОГУ
Галактионова Л.В.

Санкт-Петербург

2024

Содержание

Введение.....	4
1. Обзор литературы.....	6
1.1. Биологическая активность почв и факторы, влияющие на нее.....	6
1.2. Методы определения биологической активности почв.....	7
1.3. Микробиологическая активность почв.....	8
1.4. Ферментативная активность почв.....	9
1.5. Трофическая активность почвенных беспозвоночных.....	11
1.6. Морфологические индикаторы интенсивности биологических процессов.....	13
2. Природные условия исследуемого района.....	15
2.1. Климат.....	15
2.2. Рельеф.....	16
2.3. Почвообразующие породы.....	17
2.4. Растительный покров.....	17
3. Объекты и методы.....	20
3.1. Анализ изменения климатических показателей в период проведения исследований...20	
3.2. Растительный покров ППЭМ «Гришкино».....	22
3.3. Описание макрофауны полигона ПЭМ «Гришкино».....	23
3.4. Описание опорных разрезов.....	23
3.5. Методы исследования.....	27
4. Результаты и обсуждения.....	30
4.1. Морфофункциональная характеристика подстилок.....	30
4.2. Трофическая активность почвенных сапрофагов.....	32
4.3. Дыхание почв.....	35
4.4. Микробиологическая активность почв.....	36

4.5. Ферментативная активность почв.....	38
Выводы.....	39
Список литературы.....	41
Приложения.....	46

Введение

Важным индикатором экологического состояния природных экосистем является биологическая активность почв. Она определяет интенсивность трансформации органических веществ и разрушения минералов, а также в целом характеризует скорость и направление процессов превращения вещества и энергии (Нечаева и др., 2015). Естественные глобальные процессы изменения природной среды и климата наряду с антропогенным воздействием вызывают изменения биологической активности почв, что влечет за собой неизбежное изменение круговорота биогенных макроэлементов (Чимитдоржиева и др., 2022).

Большинство работ по изучению биологической активности почв проводятся с целью выявления последствий окультуривания или техногенного загрязнения. Работ, посвященных исследованию биологической активности почв естественных экосистем, типичных для Северо-Запада России, проведено крайне мало.

Перспективной территорией для изучения биологической активности естественных экосистем Ленинградской области может служить Лисинский учебно-опытный лесхоз. За многолетнюю историю исследований были собраны многочисленные данные о почвенном покрове лесхоза. Первые значительные исследования были проведены А.А. Роде в 1926-1929 гг. (Роде, 1931). В дальнейшем в разные годы изучением почв лесхоза занимались такие известные почвоведы, как И.В. Тюрин, В.В. Пономарева и Л.Н. Благовидов (Полигоны..., 2021). Кроме того, в 1996 г. Лисинскому лесничеству был присвоен статус регионального комплексного заказника, что определяет его ценность при проведении мониторинговых исследований (Постановление..., 1996). В связи с этим в 2012-2013 годах на территории лесхоза были заложены мониторинговые площадки, представленные 10-ю полигонами почвенно-экологического мониторинга (ППЭМ) (Апарин и др., 2016).

Одним из заложенных полигонов почвенно-экологического мониторинга, является полигон «Гришкино», почвенный и растительный покровы которого впервые были исследованы в 1967 г. Г.Ф. Копосовым и Б.В. Надеждиным в рамках работ по изучению процессов заболачивания (Копосов, Надеждин, 1967). В 2021 году исследования на данном полигоне были возобновлены сотрудниками ЦМП им. В.В. Докучаева. Результатами исследования является комплексная характеристика почвенного покрова и растительности полигона, а также описание видового и группового состава его макропедофауны (Отчет..., 2023). Однако, изучение биологической активности почв полигона и ее связи с почвенными условиями ранее не проводилось. Это определяет научную новизну настоящей работы.

Полученные результаты могут служить основой для продолжения мониторинговых исследований, а также могут быть использованы для дополнения общей базы данных по ППЭМ «Гришкино».

Цель – изучить биологическую активность почв в градиенте увлажнения на полигоне почвенно-экологического мониторинга «Гришкино» (Ленинградская область, Лисинский учебно-опытный лесхоз).

Задачи:

- провести анализ факторов почвообразования, а также морфогенетических свойств почв ППЭМ «Гришкино»;
- исследовать морфофункциональные особенности подстилок почв полигона;
- оценить трофическую активность макро- и мезопедофауны;
- определить дыхание и ферментативную активность почв;
- оценить микробиологическую активность почв.

1. Обзор литературы

1.1. Биологическая активность почв и факторы, влияющие на нее

Под биологической активностью почв понимают совокупность биологических и биохимических процессов, протекающих в почве (Толковый словарь..., 1975; ГОСТ..., 1988). Биологическая активность определяется деятельностью различных групп живых организмов, среди которых обычно выделяют почвенные микроорганизмы, корни растений и почвенных беспозвоночных (червей, моллюсков, насекомых и др.) (Хазеев, 1982; Коваленко и др., 2019). Однако в большинстве исследований рассматривается преимущественно активность почвенных микроорганизмов. Это объясняется значительной динамичностью микробиологических показателей, связанной с высокой чувствительностью микроорганизмов к изменениям условий среды (Звягинцев и др., 2005).

Многочисленные исследования также показывают, что необходимо разделять биологическую активность почв на актуальную и потенциальную, которые в большинстве случаев не совпадают. Актуальная (полевая, реальная) биологическая активность, измеряемая непосредственно в полевых условиях, отражает реальную активность почвенной биоты в определенный момент времени. Потенциальная же активность измеряется в искусственно созданных условиях, оптимальных для протекания того или иного биологического процесса и не дает понимания о степени воздействия внешних факторов. Данное разделение необходимо, т.к. актуальная активность сильно зависит от влияния многочисленных внешних факторов и отражает степень реализации того или иного биологического процесса в конкретных условиях, тогда как потенциальная активность, реализуемая в оптимальных условиях, не отражает реальных процессов, а лишь демонстрирует их максимально возможное проявление. (Алексеева, Фомина, 2015).

Влияние на биологическую активность почв оказывают ее химические и физические характеристики (Хазиев, 2018). К ним относятся окислительно-восстановительные условия, рН, тепловой и гидрологический режимы, доступность питательных элементов и др. Однако, оптимальные условия функционирования почвообитающих организмов в первую очередь связаны с двумя факторами - температурой и влажностью (Кудряшева, Бызова, 1984; Звягинцев и др., 2005). В наиболее заселенных биотой верхних горизонтах почвы колебания температуры значительно выше, поэтому изменение температуры воздуха в приземном слое атмосферы играет важную роль при изучении биологической активности почв. Температура является лимитирующим фактором протекания всех биохимических реакций. Изменение температуры даже на один градус может приводить к существенным

изменениям скорости биохимических процессов и метаболизма в целом (Звягинцев и др., 2005). Наряду с температурой, лимитирующим фактором жизнедеятельности почвенной биоты является увлажнение. При насыщении почвы влагой до полной влагоемкости все поры и пространства, за исключением пор с «защемленным воздухом», заняты почвенным раствором, что в свою очередь способствует развитию анаэробных процессов. С почвенным раствором также связано понятие осмотического давления, которое выступает важным фактором, влияющим на развитие почвенных микроорганизмов. Осмотическое давление в почвах может колебаться в среднем от 50 до 500 кПа. Чем суше почва, тем выше осмотическое давление почвенного раствора. (Клебанович и др., 2018).

1.2. Методы определения биологической активности почв

Методы определения биологической активности почв очень многообразны. Их разделяют на две большие группы - методы определения актуальной и потенциальной биологической активности. Определение актуальной активности, проводимое непосредственно в полевых условиях, повторяют в разные периоды вегетационного сезона, т.к. она сильно зависит от гидротермических условий. Гораздо проще получать характеристику потенциальной биологической активности почв, вследствие того, что определения проводятся в строго контролируемых условиях. Однако хоть потенциальная активность и характеризует определенный тип почвы и ее состояние, но ничего не говорит о реальном развитии почвенных организмов и скорости проводимых ими процессов (Звягинцев и др., 2005). К методам оценки актуальной активности относятся прежде всего определение дыхания почвы, интенсивности азотфиксации и денитрификации (образование окиси и закиси азота), аппликационные методы, определение численности и видового состава микробоценозов методами «стеклол обрастания» Холодного и др. (Сиротин, 2007). Потенциальная активность оценивается через определение численности и биомассы бактерий, актиномицетов и грибов прямыми микроскопическими методами; определение численности микроорганизмов методом посева; определение ферментативной активности почв и др. (Звягинцев и др., 2005; Алексеева, Фомина, 2015).

Существует и другая классификация методов определения биологической активности почв. Согласно этой классификации, методы подразделяются на 4 группы: микробиологические (прямой подсчет микроорганизмов разных групп, определение микроорганизмов на разных питательных средах), биохимические (определение ферментативной активности почв), физиологические (определение дыхания почв, физиологический метод определения биомассы микроорганизмов), химические (определение содержания нитрата, аммиака) (Алексеева, Фомина, 2015).

Биологическая активность почв является интегральным показателем. Для получения более точных данных при проведении биодиагностики почв используют комплексный подход и оценивают биологическую активность в различных ее проявлениях с применением различных методов (Звягинцев и др., 2005). Тем не менее в большинстве работ используется преимущественно какой-либо один показатель.

1.3. Микробиологическая активность почв

Наибольший вклад в общие показатели биологической активности вносят микроорганизмы, выступающие в роли редуцентов органических остатков (Алексеева, Фомина, 2015). Среди осуществляемых микроорганизмами процессов, которые оказывают наибольшее воздействие на почвы, выделяют минерализацию органического вещества, иммобилизацию элементов в микробной биомассе, азотфиксацию, нитрификацию, денитрификацию (Стольников, 2010).

Одним из основных составляющих микробиологической активности почв является микробное дыхание, которое отражает процесс минерализации почвенного органического вещества микроскопическими грибами, бактериями, археями и протистами (Ясулбутаева, Магомедов, 2011; Ананьева и др., 2020). Результатом микробного дыхания почв наряду с корневым дыханием является эмиссия углекислого газа из почвы в атмосферу, динамика и скорость которой позволяет судить о напряженности биологических процессов (Завьялова и др., 2020).

При изучении микробного дыхания непосредственно в полевых условиях существенной проблемой является разделение общей эмиссии CO_2 на составляющие потоки. Наиболее часто используемым в полевых условиях методом определения скорости выделения CO_2 из почвы является абсорбционный метод, который основан на диффузном поглощении выделяемого CO_2 щелочью (Шарков, 1987). Однако данный метод отражает общую эмиссию углекислого газа, которая исходит не только от микроорганизмов, но и от корней растений. Одним из способов решения этой проблемы является механическое исключение корней (метод интеграции компонентов, применение корнеизолирующих материалов и т.д.), однако это приводит к нарушению структуры почвы, угнетению и исключению дыхания ризобактерий, а также имеет ряд методических сложностей (Kuzyakov, 2006). Связи с этим, для разделения микробного и корневого дыхания используют метод субстрат-индуцированного дыхания (СИД), при котором для получения дыхательного отклика от микроорганизмов, в почву вносят глюкозу. (Паников и др., 1991). Данный метод имеет ряд преимуществ, среди которых выделяют минимальное нарушение почвы, учет ризомикробного дыхания, применимость для разных экосистем и низкую

стоимость. Определение микробного дыхания в полевых условиях методом субстрат-индуцированного дыхания является трудоемким процессом, поэтому число наблюдений, проведенных с использованием этого метода, не столь велико (Ананьева и др., 2020).

Альтернативной методикой определения скорости минерализации органического вещества почв под действием почвенных микроорганизмов в полевых условиях может служить метод Tea bag index (ТБИ) (Keuskamp et al., 2013; Ivashenko et al., 2024). В методе ТБИ интенсивность минерализации оценивается через потерю массы чая с применением стандартизованных чайных пакетиков Lipton. Стандартизированная методика, а также простота и низкая стоимость метода обуславливают наличие глобальных исследований, проводимых с его применением. Наиболее значимым из них можно назвать проект Tea Composition Initiative, целью которого является оценка разложения органического вещества в различных типах почв (Djukic et al., 2018). Метод также апробирован на в широком ряду почв Европейской территории России (Ivashenko et al., 2024). Главным преимуществом стандартизированной методики является то, что она позволяет оценить динамику микробной активности с учетом в первую очередь факторов, обусловленных определенной спецификой различных биоклиматических условий (Иващенко и др., 2023).

Помимо оценки микробного дыхания в полевых условиях, существуют также методы определения потенциального микробной активности. Среди таких методов наибольшее распространение получил метод определения базального дыхания. Он позволяет оценить скорость продуцирования CO_2 в лишенном корней почвенном образце в условиях оптимальной температуры и влажности (ISO..., 2002).

1.4. Ферментативная активность почв

Наряду с дыханием почв важнейшей характеристикой, отражающей биологическую активность почв, является ее ферментативная активность (Хазиев, 2018). Показатель ферментативной активности почв получил широкое распространение в мониторинге динамики почв, так как он наиболее адекватно отражает изменения свойств почв (Казеев и др., 2004).

В почве непрерывно осуществляются разнообразные биохимические превращения, которые осуществляются благодаря присутствию в почве ферментов. Общий ферментный пул почвы представляет собой сложный комплекс (рис. 1) и складывается из внутри- и внеклеточных ферментных систем, источником которых являются почвенные микроорганизмы, растительные и животные организмы (Хазиев, 2018).

Происхождение	Ферментативная активность почвы							Внутри-клеточные ферменты делящихся микроорганизмов, корней растений, почвенной фауны
	абиотические ферменты							
	накопленные в почве ферменты					постоянно выделяемые внеклеточные ферменты		
	связанные с клетками микроорганизмов			несвязанные с клетками				
Локализация в почве	в неделящихся живых клетках	в мертвых клетках	в клеточных фрагментах	происходившие из микроорганизмов и почвенной фауны		Происходившие из корней растений	Из микроорганизмов	Из корней растений
				Внутриклеточные ферменты разрушающихся клеток	Внеклеточные ферменты			
				в жидкой фазе почвы				
связанные с почвенными компонентами							в организмах	

Рисунок 1. Состав ферментного пула почвы (Хазиев, 2018)

В существующей общепризнанной классификации ферменты подразделяют на шесть классов:

- оксиредуктазы - ферменты, катализирующие окислительно-восстановительные реакции;
- трансферазы - ферменты, катализирующие реакции межмолекулярного переноса различных химических групп и остатков;
- гидролазы - ферменты, катализирующие реакции гидролитического расщепления внутримолекулярных связей;
- лиазы - ферменты, катализирующие реакции присоединения групп по двойным связям и обратные реакции отрыва таких групп;
- изомеразы - ферменты, катализирующие, реакции изомеризации;
- лигазы - ферменты, катализирующие химические реакции с образованием связей за счет АТФ (аденозинтрифосфорной кислоты) (Аристовская, 1980).

В почве в разной степени представлены 4 класса ферментов - гидролазы, лиазы, оксидоредуктазы и трансферазы. Однако ведущую роль в динамике биологической активности почв играют лишь два класса - оксидоредуктазы и гидролазы, т.к. они принимают участие в основных процессах гумификации. Поэтому большинство методов оценки ферментативной активности почв связаны именно с этими классами ферментов. К гидролазам, распространенным в почвах, относят инвертазу, уреазу, фосфатазу, протеазу и др., к оксидоредуктазам - каталазу, различные пероксидазы и дегидрогензы и др. (Методы определения..., 2021).

Но, несмотря на популярность методов определения ферментативной активности почв, существует ряд до конца не решенных вопросов. Процесс выделения ферментов из

почвенной среды является методически сложным по нескольким причинам. Во-первых, затруднение с выделением ферментов из почвы связаны с многообразием источников их поступления и их различной локализации в почвенном профиле. Во-вторых, физическое и химическое воздействия при экстракции ферментов из почвы могут привести к денатурации ферментов и их инактивации. По этим причинам большинство методов изучения ферментативной активности основаны на ее определении непосредственно в почве с использованием почвенной суспензии. В большинстве методик применяется добавление раствора субстрата известной концентрации к известному количеству почвы с последующим определением конечных продуктов преобразования субстрата. Причем обязательным требованием при проведении любых исследований при оценке ферментативной активности является соблюдение набора условий, к которым относятся оптимальные для активации фермента и протекания реакции температура, определенный уровень pH, влажность почвы и т.д. Даже незначительные изменения, происходящие в ходе определения ферментативной активности, могут повлечь за собой ошибки в окончательных значениях. Существенной проблемой является то, что условия проведения исследования ферментативной активности в лабораторных условиях во многом отличаются от таковых в почве. Для лабораторных определений в качестве субстратов используются простые растворимые соединения, тогда как субстраты, находящиеся непосредственно в почве, представляют собой более сложные нерастворимые полимеры, разлагающиеся до более простых мономеров. Кроме того, существует проблема, связанная с неоднородностью почвы в пространстве и времени - скорость реакций в разные периоды вегетационного сезона, а также в разных областях почвенного пространства различна. Все это приводит к тому, что оценка ферментативной активности позволяет оценить лишь потенциальную биологическую активность почв и дает ограниченное представление о их реальной активности (Методы определения..., 2021).

1.5 Трофическая активность почвенных беспозвоночных

Важная роль в почвенных биоценозах принадлежит беспозвоночным. С одной стороны, макропедофауна участвует в размельчении поступающего в почву опада, что в свою очередь приводит к увеличению площади поверхности, доступной для деятельности микроорганизмов и дальнейшего окисления. С другой стороны, при продвижении опада через кишечник беспозвоночных происходит минерализация и частичная гумификация органических соединений под действием собственных ферментов беспозвоночных и

ферментов их интестинальной микрофлоры. Таким образом, деятельность педобионтов определяет глубину гумификации и минерализацию опада (Гиляров, 1970).

По детритным трофическим цепям, в основе которых лежит разложение растительных остатков, осуществляется основной поток энергии в почвах (Стриганова, 1980). По этой причине наиболее многочисленной и значимой группой беспозвоночных являются сапрофаги - беспозвоночные, питающиеся мертвыми остатками растений, опадом и отпадом как на поверхности почвы — в подстилке, так и в зоне корневых систем растений (Звягинцев и др., 2005). Сапрофаги представляют собой неоднородную группу, включающую формы различные по своей пищевой специализации и связанные с разными компонентами почвенной мортмассы. Вклад разных групп сапрофагов в процессы трансформации органических остатков неравноценен. Наибольшую роль играют дождевые черви, которые обеспечивают закрепление углерода в почве двумя основными путями: через гумусообразование в результате трофической деятельности и через перенос углерода с поверхности почвы в нижние горизонты в процессе их активной роющей деятельности. При отсутствии в почве дождевых червей или других крупных сапрофагов деструкция опада осуществляется микроорганизмами и сапротрофной мезо- и микрофауной, что в значительной степени снижает скорость и глубину процессов гумусообразования (Гераскина, 2020).

Учет различных групп педофауны, в том числе и сапрофагов, как правило, проводится методом послойной выкопки и разборки почвенных проб. Разбор проб осуществляется вручную для представителей макропедофауны или с использованием специальных экстракторов для мезо- и микропедофауны (Бабенко, 2010). Однако, в силу высокой подвижности почвенных беспозвоночных, данный метод может иметь значительную погрешность и не всегда дает адекватную оценку трофической структуры педофауны.

В зарубежной литературе широкое распространение получил экспресс-метод оценки трофической активности почвенных сапрофагов с использованием приманочных пластинок bait-lamina test (BLT) (von Torne, 1990). Метод BLT имеет преимущества показательного метода, который является быстрым и недорогим для оценки биологической активности почв и позволяет оценить активность макро- и мезопедофауны *in vivo* (Kratz, 1998).

1.6. Морфологические индикаторы интенсивности биологических процессов

Скорость трансформации органического вещества почв также оценивается через ее морфологические проявления, диагностируемые в органических и органоминеральных горизонтах почвы. Система таких морфологических критериев оценки положена в основу экологической классификации форм (типов) гумуса (Чертов, Надпорожская, 2018). Первые упоминания о морфологических различиях процессов гумусообразования в лесных почвах восходят к первой половине XIX века, однако систематическое изучение и первая классификация форм гумуса вошли в почвоведение лишь в конце 1880-х годов благодаря датскому ученому П. Мюллеру. В дальнейшем в свет выходило множество работ в области диагностики и классификации форм гумуса. Среди зарубежных авторов этим вопросом занимались Е. Раммон, С. Уайльд, Ф. Дюшофур, В. Кубиена и многие другие. В отечественном почвоведении начало исследований форм гумуса было положено в 1940-х годов И.В. Тюриным и В.В. Пономаревой (Чертов, 1965). Существенный вклад в изучение этого вопроса вложил О.Г. Чертов (Чертов, 1981).

В результате множества исследований, к концу XX века сформировалась «классическая триада» форм гумуса: «мягкий гумус», или мюль, характеризующийся быстрыми процессами разложения растительного опада с последующим формированием рыхлого оструктуренного гумусового горизонта, и «грубый гумус», или мор, отличающийся наличием мощной подстилки, формирование которой обусловлено замедленными процессами разложения растительного материала, и промежуточная форма гумуса - модер. В ряду мюль → модер → мор снижается роль макро- и мезопедофауны в переработке растительного опада. Основная роль в формировании мюль-типа принадлежит эндо- и эпигейным видам дождевых червей, модер-типа - эпигейным видам дождевых червей, мезопедофауне (энхетридам, микроартроподам и т.д.) и грибам. Формирование мор-типа идет в отсутствие крупных сапрофагов, а основным агентом разложения органических остатков являются микро- и макромицеты (Коркина, Воробейчик, 2016).

В настоящее время широкое распространение за рубежом получила Европейская морфофункциональная классификация форм гумуса (European Reference Base for humus forms) (Zanella et al., 2011). Данная классификация построена по иерархическому признаку и включает 31 реферативную группу форм гумуса (рис. 2). Самым высоким иерархическим уровнем выступает класс системы гумуса - Terrestrial и Semiterrestrial Humus Systems, которые далее подразделяются на группы по разным признакам: типичные (terro-), специфичные на различных субстратах (litho-, psammo-, rhizo-, lingo-), влажные (hydro-) и органические (histo-) формы гумуса. Также в этой классификации в дополнение к трем классическим формам гумуса внесены еще два: амфи-тип, представляющий собой особую

форму модер-типа в лесах и редколесьях аридной зоны, и тангель-тип – специфический грубый гумус горных почв на плотных карбонатных породах под хвойными лесами (Чертов, Надпорожская, 2018).

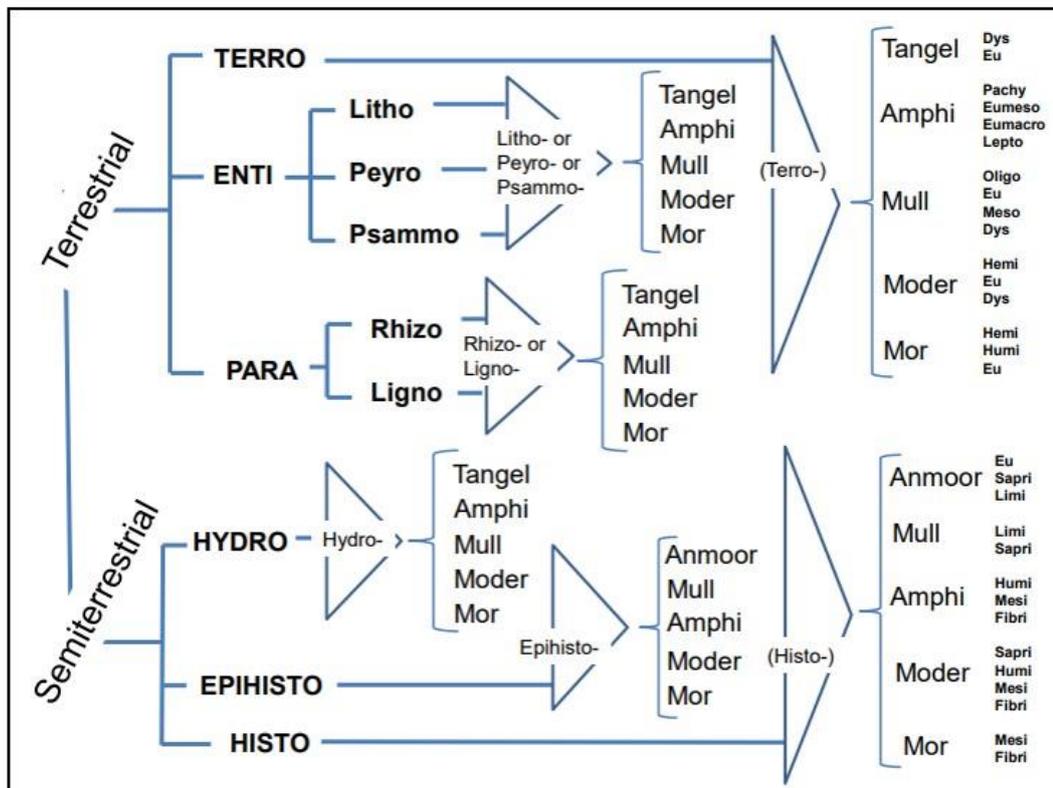


Рисунок 2. Классификационная схема Европейской морфофункциональной классификации форм гумуса (Zanella et al., 2011)

Таким образом, морфофункциональная классификация форм гумуса является высокоинформативным и малотрудоемким инструментом оценки состояния почвенной биоты (Коркина, Воробейчик, 2016).

2. Природные условия исследуемого района

Лисинский учебно-опытный лесхоз расположен на юге-западе Ленинградской области в Тосненском районе в 60 км от г. Санкт-Петербурга. Площадь лесхоза составляет около 28 тыс. га (Егоров, Титов, 1997). В лесхозе в 2012-2013 годах были заложены 10 полигонов почвенно-экологического мониторинга (ППЭМ), которые представляют картографические выделы, содержащие сведения о состоянии почвенного и растительного покрова на определенный момент времени (Полигоны..., 2022).

Исследованный ППЭМ «Гришкино» находится в 127 квартале Гришкинской дачи (рис. 3).

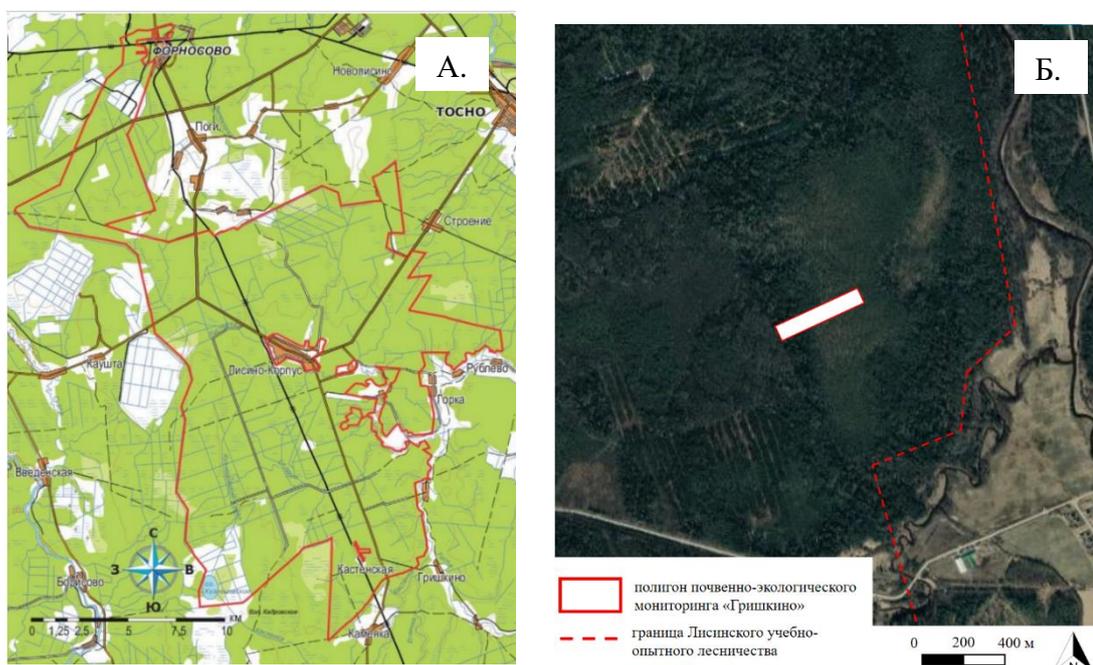


Рисунок 3. А - местоположение Лисинского учебно-опытного лесхоза (красным линия – граница лесхоза) (Отчет..., 2019); Б - местоположение ППЭМ «Гришкино» (Google, 2024)

2.1. Климат

Территория Лисинского учебно-опытного лесхоза принадлежит к области бореально-континентального климата с некоторыми переходными к приморскому климату чертами. Особое влияние на локальные изменения климата оказывает относительная близость Балтийского моря и Ладожского озера, приводящая к сглаживанию температурного режима - в зимние месяцы часто наблюдаются смены заморозков и оттепелей, а в летний период нередко похолодания, сопровождаемые обильными осадками.

Согласно данным метеорологической станции г. Тосно, среднегодовая температура воздуха составляет +3,6 °С. Наименьшая средняя температура в течение года отмечается в январе и феврале и в среднем составляет -8,8 °С, наибольшая средняя температура

отмечается в июле и равна +17 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает -40 °С, абсолютный максимум составляет +34 °С. Продолжительность безморозного периода в среднем составляет 150- 160 дней.

Среднегодовая сумма осадков равна 594 мм, а годовая величина испаряемости - 400 мм (Егоров, Титов, 1997). Значения КУ, превышающие 1, обуславливает теоретически промывной водный режим.

Территория лесхоза находится в пределах зоны избыточного увлажнения вегетационного периода, гидротермический коэффициент (ГТК) которой выше 1,5 (Национальный атлас..., 2004). Сумма активных температур ($t > 10^{\circ}\text{C}$) в среднем составляет 1830°С (Карманов, Булгаков, 2012), период вегетации имеет продолжительность 150-160 дней, суммарная солнечная радиация составляет 70-80 ккал/см² (Егоров, Титов, 1997).

Преобладают ветры западных направлений со средней скоростью 2,4-3,3 м/с. Нередки сильные ветры со скоростью до 25-30 км/ч, вызывающие ветровалы и буреломы (Селиховкин и др., 2009).

Таким образом, климатические условия на территории лесхоза являются оптимальными для формирования типичной лесной растительности южной тайги и почв подзолистого и болотного типов почвообразования.

2.2. Рельеф

Рельеф территории обусловлен последним четвертичным (валдайским) оледенением, а сложившиеся в послеледниковую эпоху ландшафты характеризуются относительной молодостью (Гагарина и др., 1995). Лисинский лесхоз расположен в пределах Ладожско-Ильменской низменности, имеющей озерно-гляциальное происхождение. Абсолютные высоты в пределах лесхоза колеблются от 35 до 70 м над уровнем моря. В целом рельеф лесхоза представлен плоской волнистой равниной со слабым наклоном к востоку и юго-востоку в сторону р. Тосно. Положительными формами рельефа являются немногочисленные озы, расположенные на юге, северо- западе и северо-востоке лесхоза, и небольшие плоские холмики, сложенные ледниковыми наносами, разбросанные по всей площади лесхоза; относительная высота их – до 2,5 м, а поперечник – 100-200 м (Тимофеев, Савицкая, 2009).

Для полигона «Гришкино» характерен равнинный рельеф со слабым уклоном, что в совокупности с маловодопроницаемой почвообразующей породой, представленной

ленточными глинами, препятствует достаточному дренажу почвенного профиля. Поэтому, несмотря на то, что $KУ > 1$ обуславливает теоретически промывной водный режим, для территории исследования будет характерно временное избыточное увлажнение.

2.3. Почвообразующие породы

Территория Лисинского лесхоза принадлежит к области Девонской равнины. Коренные (дочетвертичные) породы, представленные девонскими песчаниками живетского яруса, не выходят на дневную поверхность и перекрыты мощным чехлом четвертичных отложений (более 100 м). В результате протекания различных геологических процессов, имевших место в последний ледниковый и послеледниковый периоды, и их наложения друг на друга, на территории лесхоза наблюдается сильная пестрота почвообразующих пород. Б.Ф. Земляковым в результате детальной геологической съемки было выделено 11 видов четвертичных отложений, которые могут быть поделены на 3 группы: 1) наносы ледникового времени (валунные суглинки, валунные пески и т.д.); 2) наносы позднеледникового времени (ленточные глины, морена и т.д.); 3) наносы послеледникового времени (безвалунные пески, аллювиальные отложения, торфяники и т.д.) (Селиховкин и др., 2009). Главными почвообразующими породами являются ленточные глины и валунный суглинок, занимающие около 90% всей его территории (Отчет..., 2019).

Почвы полигона «Гришкино» формируются на ленточных глинах, способствующих заболачиванию территории даже при небольших уклонах. Ряд специфических особенностей данных почвообразующих пород определяет состав и свойства почв полигона, а также влияют на характер основных почвообразующих процессов (Матинян, 2015). Среди таких особенностей можно выделить высокую плотность сложения, бесструктурность, малую водопроницаемость, что в совокупности обуславливает высокую склонность к оглеению (Гагарина, 2004). Высокое содержание двух- и одновалентных оснований, а также полуторных оксидов железа и алюминия, в свою очередь, служит причиной относительного богатства ленточных глин элементами питания (Тимофеев, Савицкая, 2009).

2.4. Растительный покров

В соответствии с принятым геоботаническим районированием территория Лисинского учебно-опытного лесхоза расположена в пределах полосы южной тайги на границе Лужского и Волховского округов Северо-Европейской таежной провинции. Для данных округов характерно преобладание еловых зеленомошных лесов в сочетании с

производными от них мелколиственными лесами. Часто встречаются сосновые заболоченные леса.

Около 80% территории Лисинского лесхоза занимают долгомошные, сфагновые и зеленомошные леса. Основными древесными породами в таких лесах являются ель (*Picea abies*), сосна (*Pinus sylvestris*) и береза (*Betula pendula*, *Betula pubescens*), реже осина (*Populus tremula*). В подлеске могут встречаться ива козья (*Salix caprea*), черемуха (*Prunus padus*) и рябина (*Sorbus aucuparia*).

Для долгомошных и сфагновых лесов характерно преобладание в травяно-кустарничковом ярусе черники и брусники (*Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea*). Среди трав часто встречается осока шарообразная (*Carex globularis*) и виды таежного мелкотравья - майник двулистный (*Majanthemum bifolium*), седмичник европейский (*Trientalis europaea*), костяника каменистая (*Rubus saxatilis*), ожика волосистая (*Luzula pilosa*), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*), иногда папоротники — кочедыжник женский (*Athyrium felix-femina*), щитовник расширенный (*Dryopteris expansa*), щитовник картузианский (*Dryopteris carthusiana*). В мохово-лишайниковом ярусе зачастую доминируют сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*).

Травяно-кустарничковый ярус зеленомошных лесов в основном сложен брусникой и черникой (*Vaccinium vitis-idaea* и *V. myrtillus*), а также травами, включая кислицу (*Oxalis acetosella*), майник (*Majanthemum bifolium*), голокучник Линнея (*Gymnocarpium dryopteris*). На средних по увлажнению почвах среди зеленомошных лесов преобладают черничники, на относительно богатых почвах - кисличники. В зеленомошных лесах хорошо развит мохово-лишайниковый ярус, представленный зелеными мхами-мезофитами с доминированием *Pleurozium schreberi* и *Dicranum spp.* На богатых почвах встречаются *Brachythecium spp.*, *Plagiomnium spp.*, *Rhodobryum roseum*, а доминирующими видами являются *Hylocomium splendens*, *Rhytidiadelphus triquetrus* (Селиховкин и др., 2009).

Верховые сфагновые болота занимают небольшие территории (до 4% от общей площади) и покрыты сосновыми и березовыми рединами. По окраинам болот встречаются несколько видов ивы (*Salix myrtilloides*, *S. cinerea*, *S. philocifolia*), кустарнички – вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris*), подбел многолистный (*Andromeda polifolia*), болотный мирт обыкновенный (*Chamaedaphne calyculata*), багульник болотный (*Ledum palustre*), клюква мелкоплодная и обыкновенная (*Oxycoccus microcarpus*, *O. palustris*), голубика и брусника (*Vaccinium uliginosum*, *V. Vitis-idaea*), травы – морощка (*Rubus chamaemorus*), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum*) и др., а в мочажинах – шейхцерия болотная (*Sheuchzeria palustris*), очеретник белый (*Rhynchospora alba*) и осока топяная (*Carex*

limosa). Моховой покров сплошной и представлен различными видами сфагновых мхов (*Sphagnum angustifolium*, *Sph. Magellanicum*, *Sph. Fuscum* и др) (Егоров, Титов, 1997).

3. Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на территории полигона почвенно-экологического мониторинга (ППЭМ) «Гришкино», расположенного в пределах Лисинского учебно-опытного лесхоза (Ленинградской область, Тосненский район, пос. Лисино-корпус). Исследования проводились на 3 отличающихся по степени увлажнения участках, каждый из которых включал 3 пробные площади. Участки приурочены к 3 опорным разрезам, заложенным в 2021 г. на полигоне «Гришкино» сотрудниками Центрального музея почвоведения имени В.В. Докучаева (Отчет..., 2023). Расположение опорных разрезов и пробных площадей представлено на рисунке 4.



Рисунок 4. Схема расположения опорных разрезов и пробных площадей на территории ППЭМ «Гришкино»

3.1. Анализ динамики климатических показателей в период проведения исследований

Для оценки влияния погодных условий на биологическую активность почв полигона «Гришкино» использованы данные с метеорологической станций 1 разряда Любань (Ленинградская обл., Тосненский район, Любанское городское поселение), расположенной на востоке Мгинско-Тосненской равнины в 33 км к юго-востоку от Лисинского учебно-опытного лесхоза. Метеорологические данные со станции Любань были взяты с сайта «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru/history.php>), данные о климатической

норме – с сайта ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>).

Средние температуры воздуха в вегетационный сезон 2023 г. имели ряд отличий от климатической нормы, рассчитанной на период 1991-2020 гг. (рис. 5). В начале вегетационного сезона температура воздуха была близка к климатической норме, в середине – была ниже на 1,5 °С, а в конце - больше в среднем на 2,7 °С.

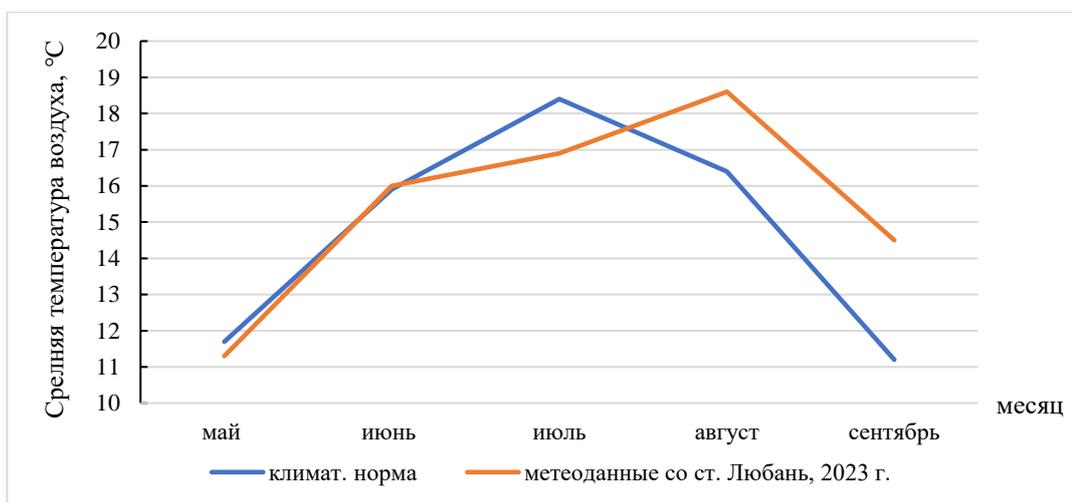


Рисунок 5. Сравнение климатической нормы 1991-2020 гг. и метеоданных со станции Любань за 2023 г. по средней температуре воздуха за май-сентябрь

Отклонения от климатической нормы наблюдаются и в отношении суммы осадков (рис. 6).

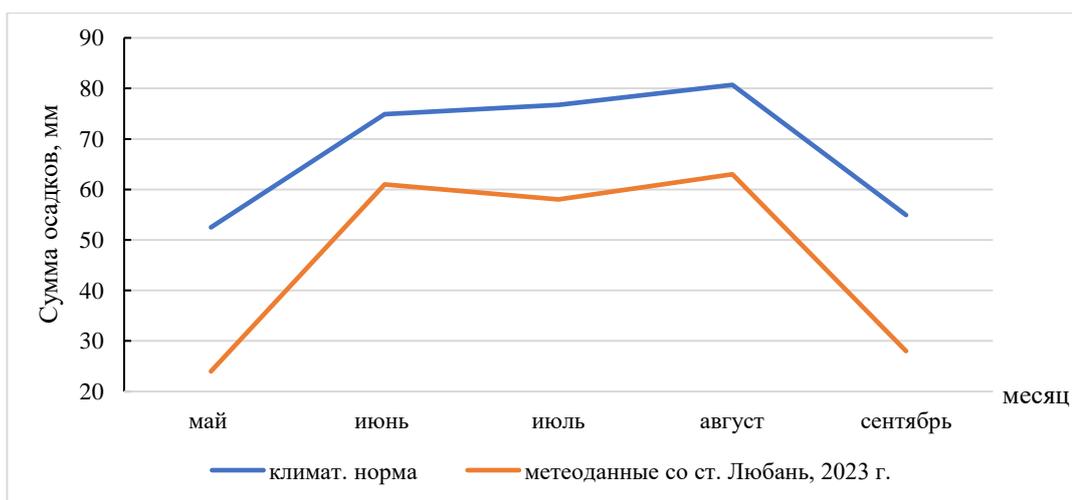


Рисунок 6. Сравнение климатической нормы 1991-2020 гг. и метеоданных со станции Любань за 2023 г. по сумме осадков за май-сентябрь

На протяжении всего вегетационного сезона сумма осадков была ниже климатической нормы, причем наибольшая разница отмечалась в начале (май) и в конце (сентябрь) вегетационного сезона. В целом вегетационный сезон 2023 г. может быть охарактеризован как сухой и теплый. Наиболее оптимальные условия отмечались в середине вегетационного сезона (июнь-июль).

Данные об изменении температуры воздуха и сумме выпавших осадков в период проведения полевых исследований в мае, июле и сентябре-октябре 2023 г. представлены на рисунке 7 и в таблице 1.

Таблица 1. Средняя температура воздуха и сумма осадков в периоды проведения полевых исследований на ППЭМ «Гришкино», май-октябрь 2023 г.

Даты проведения исследований	Средняя температура воздуха, °С	Сумма осадков, мм
23.05-30.05	13,47	8,9
24.07-31.07	17,11	36,4
26.09-03.10	12,71	21,3

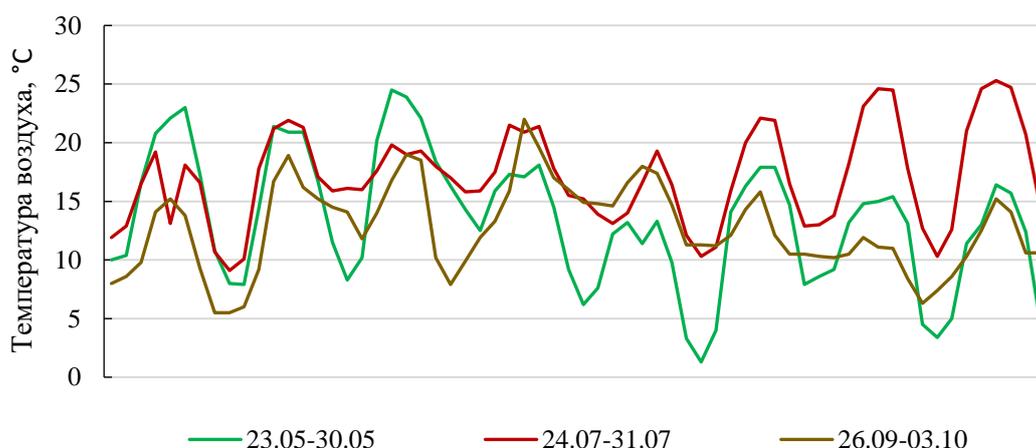


Рисунок 7. Изменение температуры воздуха в периоды проведения полевых исследований на ППЭМ «Гришкино», май-октябрь 2023 г.

3.2. Растительный покров ППЭМ «Гришкино»

Растительные сообщества полигона различны и закономерно сменяют друг друга в зависимости от условий увлажнения (Копосов, Надеждин, 1967). На автоморфных позициях (участок 1) фитоценоз представлен сосново-ельником разнотравным, который постепенно сменяется на елово-сосняк чернично-сфагновый (участок 2). На гидроморфных позициях фитоценоз представлен сосняком с березой сфагновым (участок 3). Фотографии фитоценозов участков 1-3 и представлены в приложении Б.

Максимальное проективное покрытие в травяно-кустарничковом ярусе характерно для участка 1 и составляет 90%, промежуточное положение занимает участок 2 (50 %), а наименьшие значения отмечаются на участке 3 (13 %). При продвижении от участка 1 к участку 3 сокращается не только проективное покрытие, но и видовое разнообразие - в травяно-кустарничковом ярусе на 1 участке можно выделить 17 видов сосудистых растений, а на 3 участке их количество сокращается до 7 видов.

По мере увеличения влажности возрастает проективное покрытие в мохово-лишайниковом покрове - для участка 1 оно составляет 30%, для участка 2 - 90%, а для участка 3 - 95%. Причем на 1 участке встречаются преимущественно листостебельные мхи (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Rhytidiadelphus triquetrus*), на втором участке наряду с листостебельными мхами значительные площади заняты сфагнумом (*Sphagnum* sp.). На участке 3 весь мохово-лишайниковый покров представлен исключительно сфагнумом.

3.3. Описание макрофауны полигона ПЭМ «Гришкино»

Структурно-функциональная организации макропедофауны демонстрирует неоднозначные изменения в градиенте увлажнения. Наибольшая средняя плотность макрофауны отмечается на участке 1 и составляет 79 экз./м², однако при дальнейшем продвижении по градиенту увлажнения она сначала сокращается до 28 экз./м² на 2 участке, а затем на 3 участке вновь возрастает до 54 экз./м². При сравнительном анализе трофической структуры макрофауны почв полигона, отмечается снижение плотности сапрофагов и увеличение плотности зоофагов в структуре сообществ с увеличением увлажнения. Дождевые черви, выступающие в роли одной из наиболее важных групп беспозвоночных, участвующих в трансформации опада, встречаются только на 1 участке. Более оптимальные условия увлажнения и разнообразный состав растительного опада приводят к тому, что на участке 1 сосредоточение макрофауны происходит не только в подстилке, но и в гумусовом горизонте (Шатских, Пятина, 2022).

3.4. Описание опорных разрезов

Согласно почвенной карте ПЭМ «Гришкино» (рис. 8), опорные разрезы №1 и №2 заложены в пределах контура дерново-элювиально-метаморфических потечно-гумусовых глееватых почв (Классификация..., 2004). Опорный разрез №3 занимает промежуточное положение - он заложен в контуре элювиально-метаморфических потечно-гумусовых глееватых почв, однако его расположение достаточно близко к границе торфяно-глееземов

потечно-гумусовых. Отсутствие типоморфного для глееземов горизонта G не позволяет отнести почвы данного разреза к торфяно-глеезам, но в то же время в разрезе хорошо диагностируется оторфованная подстилка и торфяной горизонт T, мощностью более 10 см, что говорит о значительном переувлажнении исследуемого участка.

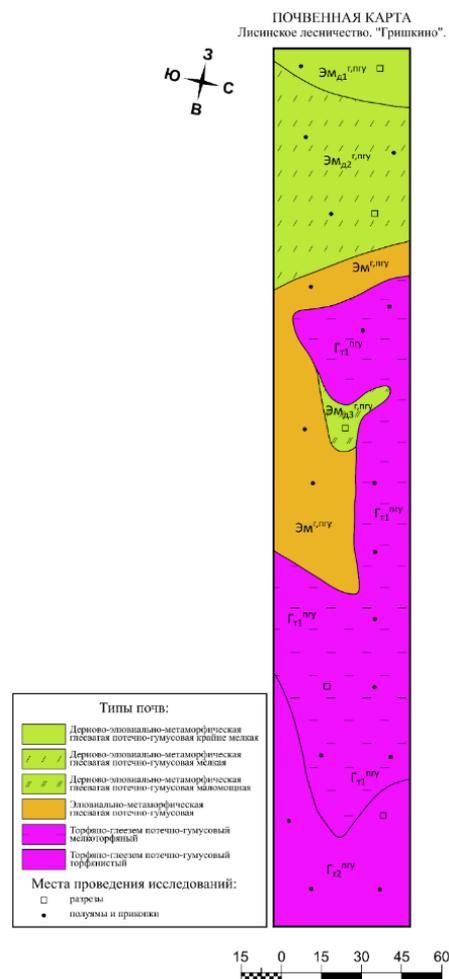


Рисунок 8. Почвенная карта ППЭМ «Гришкино» (Отчет..., 2023).

Морфологические описания разрезов, составленные сотрудниками Центрального музея почвоведения имени В.В. Докучаева, представлены в таблицах 2-4. Фото разрезов 1 и 3 вынесено в приложение А.

По мере увеличения увлажнения в ряду дерново-элювиально-метаморфических почв (от разреза 1 к 2), прослеживается тенденция к уменьшению гумусово-аккумулятивных горизонтов, а в условиях максимального увлажнения (разрез 3) наблюдается процесс торфообразования и наличие торфяного горизонта с высокой степенью разложения растительного материала в нижней части.

Во всех почвах элювиальный горизонт в разной степени прокрашен потечным гумусом, а минеральная часть затронута процессами оглеения и метаморфизации разной степени выраженности (Отчет..., 2023).

Таблица 2. Морфологическое описание опорного разреза 1 (Отчет..., 2023).

Горизонт	Описание
О (0-10 см)	Бурая подстилка, рыхлая, слаборазложившиеся остатки растительности. Встречаются ветки, листовые пластинки, большие корни большие (диаметр 1-7 см). Переход резкий, граница волнистая.
АУ (10-20 см)	Серый, свежий, комковатый и мелкокомковатый, рыхлый, среднесуглинистый, много мелких древесных корней, переход постепенный.
ELg (20-40 см)	Влажный, охристо-сизый (сизые тона преобладают), плотный, крупно-плитчатый, среднесуглинистый, сизые затеки, идущие в горизонт VMg, переход ясный, граница волнистая.
VMg (40-63 см)	Влажный, буро-сизый (соотношение цветов 50/50), плотный, ореховато-призматический, средний суглинок, ближе к тяжелому, очень редкие и тонкие мелкие глинистые кутаны.
Почва: дерново-элювиально-метаморфическая глееватая легкосуглинистая на ленточных глинах	

Таблица 3. Морфологическое описание опорного разреза 2 (Отчет..., 2023).

Горизонт	Описание
О (0-6 см)	Подстилка, состоящая из мелких корешков, остатков растительности, палочек, шишек. Граница волнистая, переход резкий.
АУ (6-13 см)	Мокрый, серый, рыхлый, легкосуглинистый, мелкокомковатый и ореховато-комковатый, единичные мелкие корешки. Граница затечная, переход постепенный.
ELhi (13-24 см)	Сырой, белесый с буро-серыми и мелкими ржавыми пятнами, слегка уплотнен, ореховато-плитчатый, среднесуглинистый, единичные мелкие корни. Граница затечная, переход заметный.
ELg (24-54 см)	Сырой, ржавый фон с сизовато-белесыми пятнами и частыми затеками из ELhi, крупно-плитчатый, плитчатый, плотнее предыдущего, среднесуглинистый, переход постепенный.

Продолжение таблицы 3

Горизонт	Описание
BMg (54-64 см)	Сырой, бурый с мощными сизыми затеками, чуть плотнее предыдущего, тяжелосуглинистый, структура призматическая, делящаяся на мелкие орешки, единичные гумусовые затеки по ходам корней. Переход постепенный.
Почва: дерново-элювиально-метаморфическая потечно-гумусовая глееватая среднесуглинистая на ленточных глинах	

Таблица 4. Морфологическое описание опорного разреза 3 (Отчет..., 2023).

Горизонт	Описание
O (0-4 см)	Влажная буровато-коричневая подстилка, состоящая из плохо разложившийся сфагнома, коры, листьев, мелких веток, шишек.
T (4-14(17))	Влажный, рыхлый, темнее вышележащего, буровато-коричневый, состоит из сфагнома разной степени разложения, , начиная с 4 см сначала слабая-средняя степень, затем средняя и к низу сильная степень разложенности, мажет руку. Граница слабоволнистая.
Elhi,g (4-14 (17) -27)	Свежий, сизовато-белесый, уплотнённый, редкие ржавые затеки, плохо оструктурен, среднесуглинистый, древесные корни, переход заметный по цвету и плотности, граница слабоволнистая.
BMg (27-48 см)	Влажный, охристо-бурый с множеством сизых пятен и затеков, ржавый по ходам корней, призматический, более уплотненный, чем вышележащий, тяжелосуглинистый меньше корней, чем в вышележащем (почти нет).
Почва: торфяно-элювиально-метаморфическая глееватая среднесуглинистая на ленточных глинах	

Физико-химические характеристики органических и органоминеральных горизонтов, представлены в таблице 5 (Отчет..., 2023).

Таблица 5. Физико-химические параметры образцов почв в точках отбора фауны

№ участка	№ пробной площади	Горизонт	W, %	pH _{вод.}	ППП, %
1	1.1	O	124,02	4,88	66,29
	1.1	AУ	56,08	4,78	11,84
	1.2	O	132,54	4,54	73,47
	1.2	AУ	37,32	4,75	9,53
	1.3	O	96,15	4,40	65,52
	1.3	AУ	46,87	4,99	12,78
2	2.1	O	240,61	4,47	88,44
	2.1	AУh	154,09	5,25	29,97
	2.2	O	100,74	4,16	93,63
	2.2	AУh	108,63	3,86	26,77
	2.3	O	220,24	3,69	89,83
	2.3	AУ	41,75	4,42	10,27
3	3.1	O	211,35	4,28	94,24
	3.1	T	100,78	4,62	73,98
	3.2	O	185,53	3,98	91,44
	3.2	T	130,92	4,50	79,96
	3.3	O	119,07	3,02	88,05
	3.3	T	144,15	4,82	72,46

3.5. Методы исследования

Исследование биологической активности проводилось в период с мая по октябрь 2023 г. на трех участках, различающихся по степени увлажнения и приуроченных к опорным почвенным разрезам. В пределах каждого участка заложены по три пробные

площади, размером 1x1 м (всего 9 площадок), находящиеся на расстоянии более 25 метров друг от друга.

Определение актуального почвенного дыхания производилось в полевых условиях через оценку скорости продуцирования почвами CO₂ с применением абсорбционного метода Штатнова (Вадюнина, Корчагина, 1986). Для улавливания углекислого газа на поверхность почвы, предварительно лишенной растительности, устанавливалась чашка Петри с 0,1н NaOH. Одновременно на поддон, изолированный от внешнего воздуха насыщенным раствором NaCl, устанавливалась контрольная чашка Петри с тем же количеством 0,1н NaOH. Чашки Петри закрывали сосудом изолятором и через 1 час экспонирования избыток NaOH, не пошедшей на улавливание CO₂, оттитровывали 0,1н HCl по фенолфталеину. Расчет выделенного почвой CO₂ производили по формуле:

$$D = \frac{(a - b) \cdot K}{S \cdot t}$$

где D — выделение почвой CO₂, мг CO₂/м²·ч; a — количество 0,1 н HCl, пошедшей на титрование щелочи при холостом определении, мл; b — то же в опыте, мл; K — коэффициент для перевода мл 0,1 н щелочи в мг CO₂, равный 2,2; S — площадь сосуда-изолятора, м²; t — время экспозиции, ч.

Актуальную микробиологическую активность оценивали через интенсивность минерализации органического вещества с применением метода Tea bag index (TBI) (Keuskamp et al., 2013). Для этого использовали коммерчески доступные в России виды чайных пакетиков - Вкусвилл ройбуш и Бертон зеленый (Ivashchenko et al., 2024). Чайные пакетики устанавливали в почву на глубину 8 см в мае. Спустя 98 дней пакетики изымались из почвы и повторно взвешивались после предварительного высушивания (Keuskamp et al., 2013). Для перерасчета потери массы альтернативного чая использовался коэффициент 1,29 для зеленого чая и 1,18 - для чая ройбуш (Ivashchenko et al., 2024).

Определение потенциальной ферментативной активности производилось в лабораторных условиях через оценку уреазной активности почв по методу Аристовской-Чугуновой (Аристовская, Чугунова, 1989). Навески почвы по 45 г предварительно увлажняли до влажности образования агрегатов, после чего они инкубировались в течение недели в биологическом термостате. Далее к почвенным образцам добавляли по 0,5 г и 0,25 г мочевины. Оценка количества образующегося при разложении мочевины аммиака производилась через изменение pH, которое фиксировали полосками универсального индикатора, приклеенными к крышкам чашек Петри.

Исследование трофической активности почвенных сапрофагов проводилось в полевых условиях в мае, июле и сентябре 2023 г. Оценка трофической активности осуществлялась косвенно через степень потребления приманки по методу bait-lamina test (BLT) (von Törne, 1990). На каждой пробной площади методом конверта устанавливали по 25 приманочных пластин (по 5 в каждой вершине конверта), содержащих 16 отверстий, заполненных приманкой, состоящей из микрокристаллической целлюлозы и измельченной крапивы, смешанных в соотношении 7:3. По истечении 7 дней экспонирования пластины изымались из почвы и проводилась визуальная оценка степени потребления приманки по пятибалльной шкале (Бергман и др., 2017). Помимо определения средней степени потребления приманки на каждой пробной площади, также проводилось сравнение степени потребления приманки в 0-4 см слое почвы (1-8 отверстия) и в 4-8 см слое почвы (9-16 отверстия).

Также проводилась диагностика типов гумуса по Европейской морфофункциональной классификации форм гумуса (Zanella et al., 2011). Для этого на каждом участке в характерных фитоценозах случайным образом закладывали по 3 почвенных прикола глубиной около 20 см. Для выделения форм гумуса использовали следующие диагностические признаки: 1) стратификация подстилки на горизонты OL, OF, OH; 2) наличие признаков зоогенной или незоогенной трансформации опада; 3) размер перехода между подстилкой и органоминеральным горизонтом; 4) структура органоминеральных горизонтов (Коркина, Воробейчик, 2016).

Статистическую обработку проводили в программе MS Excel с применением преобразования Фишера. Участки и пробные площади сравнивали с применением двухфакторного дисперсионного анализа.

4. Результаты и обсуждения

4.1. Морфофункциональная характеристика подстилок

Морфологические описания лесных подстилок для всех пробных площадей представлены в таблице 6. Практически на всех пробных площадях органический горизонт (O) четко фрагментирован на 3 отдельных горизонта – OL (fresh litter), OF (fermentated litter), OH (humificated litter). В горизонте OL на 1 и 2 участках преобладают листья осины (*Populus tremula*), иголки сосны (*Pinus sylvestris*), шишки и мелкие веточки. На 3 участке горизонт OL, расположенный под живой зеленой частью сфагнома, представлен отмирающими частями сфагновых мхов с единично встречающимися иголками сосны. Горизонт OF на большинстве пробных площадей имеет незоогенное происхождение, о чем свидетельствует наличие грибного мицелия и растительных остатков слабой и средней степени разложения. На участке 3 горизонт OF образован бурыми мертвыми остатками сфагновых мхов. Признаки зоогенной переработки растительного материала (высокая степень разлаженности, ходы животных и т.д.) встречаются лишь на пробных площадях 1.2 и 1.3 в пределах 1 участка. На этих пробных площадках было зафиксировано присутствие эпигейных видов дождевых червей (*Lumbricus rubellus*), что в свою очередь и может служить причиной наличия признаков зоогенной трансформации растительного опада в горизонте OF.

Таблица 6. Морфологические особенности почвенных подстилок на участках 1-3 (ППЭМ «Гришкино»)

№ пробной площади	Последовательность горизонтов (мощность, см)		О/А (O/EL), мм	Форма гумуса
	органические	органо-минеральные		
1.1	OL (0,5) / nzoOF (2,5) / OH (0,5)	miA (5)	<3	Eumor
1.2	OL (1) / nzoOF (2) / zoOF (1)	miA (6)	<3	Humimor
1.3	OL (1) / zoOF (2) / OH (1,5)	meA (7)	3-5	Dysmoder
2.1	OL (1) / nzoOF (3) / OH (1)	miA (3) + msA	<3	Eumor
2.2	OL (1) / nzoOF (2) / OH (1,5)	miA (4) + msA	<3	Eumor
2.3	OL (1) / nzoOF (3) / OH (2)	msA (5)	<3	Eumor
3.1	bryOL (2) / bryOF (8) / gOH (2)	gEL (12)	<3	Hydromor
3.2	bryOL (2) / bryOF (9) / gOH (1)	gEL (10)	<3	Hydromor
3.3	bryOL (5) / bryOF (8) / gOH (1)	gEL (13)	<3	Hydromor

Примечание: О/А (O/EL) – размер области перехода между органическими (O) и органоминеральными (A или EL) горизонтами; признаки зоогенной трансформации растительных остатков: zo - есть, nzo – нет; структура органоминеральных горизонтов: mi – биомикроструктурированный, me – биомезоструктурированный, ms – массивный; g – гидроморфные признаки; bry – наличие мхов разной степени разлаженности.

Согласно Европейской морфофункциональной классификации форм гумуса (Zanella et al., 2011), залегающие под подстилкой органоминеральные горизонты (AY) на участках 1 и 2 в основном могут быть охарактеризованы, как биомикроструктурированные (miA) - размер агрегатов не превышает 1 мм. Также на участке 2 отмечена массивная структура органоминерального горизонта (msA), при которой обособление отдельных агрегатов представляется затруднительным. Выделяется по структуре гумусовый горизонт на пробной площади 1.3 – он представлен агрегатами с размерами от 1 до 4 мм, что позволяет диагностировать его, как биомезоструктурированный (meA). На 3 участке гумусовый горизонт не выделяется, а торфяной горизонт залегает на элювиальном, в котором отмечаются гидроморфные признаки оглеения.

На участке 1, в отличие от других участков, встречаются Humimor и Dysmoder формы гумуса, для которых характерно наличие zoOF горизонта. Это говорит о том, что в трансформации растительного опада участвуют не только грибы, но и представители макропедофауны (эпигейные виды дождевых червей) и мезопедофауны (энхитреиды и микроартроподы). Также на участке 1 можно выделить и Eumor форму гумуса, однако, в отличие от аналогичных форм, встречающихся на участке 2, мощность органических горизонтов здесь будет меньше, что свидетельствует о большей интенсивности процессов трансформации опада.

На участке 2 отмечена исключительно Eumor форма гумуса. Из этого следует, что формирование верхних органических и органоминеральных горизонтов идет преимущественно за счет грибного разложения и работы мезопедофауны, а крупные сапрофаги на данных участках отсутствуют, в результате чего в почвенном профиле диагностируется горизонт OF незоогенного происхождения.

На участке 3 мощность органических горизонтов максимальна. Под живой зеленой массой сфагновых мхов залегает bryOL горизонт, образованный отмирающими частями мха. Далее при продвижении вниз по профилю наблюдается увеличение степени разлаженности мхов. В горизонте bryOF, имеющем наибольшую мощность среди органических горизонтов на этом участке, еще диагностируются отмершие остатки сфагновых мхов, в то время как горизонт OH характеризуется высокой степенью разлаженности - волокна мхов не выделяются, при растирании пачкает руку. Гумусовый горизонт не выделяется, подстилка залегает на оглеенном элювиальном горизонте. Большая мощность подстилки без признаков зоогенной переработки растительного материала и наличие гидроморфных признаков позволяет диагностировать на 3 участке Hydromor формы гумуса.

Таким образом, с увеличением увлажнения при движении от участка 1 к участку 3 увеличивается мощность горизонта OF и появляются признаки гидроморфизма. На участках 2 и 3 в трансформации растительного опада преимущественно участвуют грибы и мезофауна, тогда как на участке 1 в этом процессе участвуют также и крупные сапрофаги.

4.2. Трофическая активность почвенных сапрофагов

Результаты исследования трофической активности почвенных сапрофагов с применением метода BLT приведены в таблице 7. Наибольшая степень потребления приманки зафиксирована на участке 1, для которого характерны высокое видовое разнообразие фитоценоза и почвы автоморфных позиций, характеризующиеся слабнокислой реакцией среды (рН ~ 4,7) (табл. 5). Стоит отметить, что на этом участке ранее фиксировалась максимальная плотность макропедобионтов, равная 79 экз./м², и максимальная доля сапрофагов в трофической структуре фитоценоза. Также только на этом участке отмечалось наличие дождевых червей (Шатских, Пятина, 2022).

Таблица 7. Средняя степень потребления приманки почвенными сапрофагами на ППЭМ «Гришкино» в мае-октябре 2023 г.

№ участка	Средняя степень потребления приманки (общая), %	Средняя степень потребления приманки в слое 0-4 см, %	Средняя степень потребления приманки в слое 4-8 см, %
1 участок	17,43 ± 3,3	26,81 ± 7,47	5,73 ± 9,98
2 участок	12,12 ± 0,05	21,03 ± 1,89	2,02 ± 3,1
3 участок	14,75 ± 22,28	21,21 ± 22,32	6,63 ± 24,64

Наименьшая степень потребления приманки отмечалась на участке 2. Для данного участка также отмечалась наименьшая плотность макропедобионтов - 28 экз./м² (Шатских, Пятина, 2022), что позволяет сделать вывод о том, что основным потребителем приманки на этом участке является преимущественно мезофауна.

Участок 3, приуроченный к гидроморфным позициям, занимает промежуточное положение между 1 и 2 участками по степени потребления приманки и по плотности макрофауны (и 56 экз./м²). Здесь, как и на участке 2, потребление приманки осуществлялось преимущественно за счет мезофауны.

Степень потребления приманки зависит не только от качественного и количественного состава почвенных беспозвоночных, но и от их физиологического

состояния, определяемого химическими и физическими (прежде всего температурой и увлажнением) свойствами почвы, а также наличием и качеством доступной в верхней части профиля пищевой базы (Gongalsky et al., 2004; Scheunemann, Russell, 2023). Видовое богатство фитоценозов уменьшается в градиенте увлажнения от участка 1 к участку 3 - на участке 1 оно максимальное, следовательно, и пищевой субстрат будет содержать большее количество доступных для питания сапрофагов элементов. Кроме того, на участке 1 наиболее благоприятный водно-воздушный режим почв.

Также из таблицы 9 видно, что на всех участках степень потребления приманки выше в первых 4 см почвы, т.е. основная масса сапрофагов сосредоточена в верхних слоях подстилки. Это в первую очередь объясняется тем, что в верхних слоях подстилки выше количество и доступность пищевой базы в виде растительного опада, а также более оптимальные значения рН и условия увлажнения и аэрации (выше, чем в гумусовом горизонте) (табл. 5).

Различается трофическая активность не только между участками с разным увлажнением, но и внутри участков в течение вегетационного периода (рис. 9).

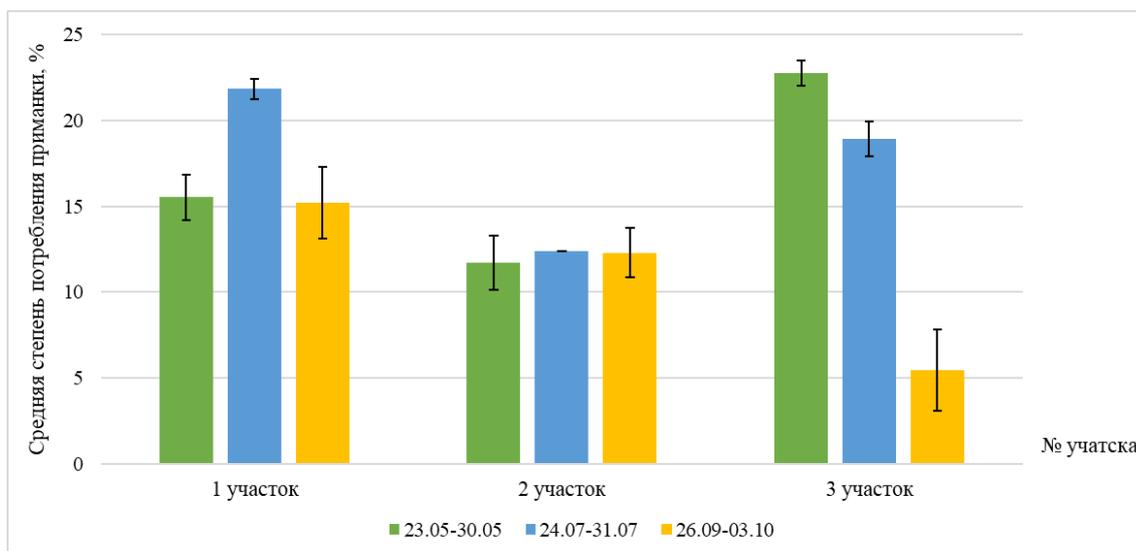


Рисунок 9. Изменение степени потребления приманки на участках 1-3 в течение вегетационного периода (ППЭМ «Гришкино», 2023 г.)

Общая трофическая активность максимальная на участке 1, но из рисунка 9 видно, что в мае максимальная степень потребления приманки фиксировалась на участке 3 и была равна $22,76 \pm 0,74$ %, тогда как на участке 1 она составила лишь $15,53 \pm 1,33$ %. Это можно объяснить тем, что в мае 2023 г. наблюдалось снижение суммы осадков практически вдвое относительно климатической нормы (рис. 6), что привело к иссушению верхней части

почвенного профиля. Однако на участке 3 в силу гидроморфности условий это оказало наименьшее воздействие на макро- и мезофауну. Наиболее оптимальные условия по увлажнению и температуре наблюдались в июле (рис. 5 и 6) - возросла степень насыщения почвенного профиля влагой вследствие обильных осадков после относительно сухого начала вегетационного периода, а также сгладились суточные колебания температуры (рис. 7). Это вызвало рост трофической активности на 1 участке - степень потребления приманки возросла на 6,32%. На участке 3 в июле наоборот наблюдалось падение трофической активности почвенных сапрофагов. Скорее всего это связано с тем, что из-за высокой влагоемкости почв на 3 участке, обильные осадки послужили причиной возникновения избыточного увлажнения. В конце вегетационного периода наблюдается падение трофической активности, что может объясняться несколькими причинами. Во-первых, в сентябре зафиксирована наименьшая средняя температура воздуха (табл. 1). Во-вторых, колебания температуры в течение суток были значительны и достигали 6-13 °С, а ночные температуры приближались к пограничным значениям, ниже которых большинство позвоночных не активны (рис. 7) (Кононова, 1963; Кудряшева, Бызова, 1984). В-третьих, в силу недостаточной дренированности территории и ухудшенного оттока избыточной влаги, выпавшие осадки вызывали временное переувлажнение почвенного профиля, что в свою очередь негативно повлияло на трофическую активность беспозвоночных.

Тенденция изменения степени потребления приманки в течение вегетационного периода в 0-4 см и 4-8 см слоях почвы аналогична (рис. 10).

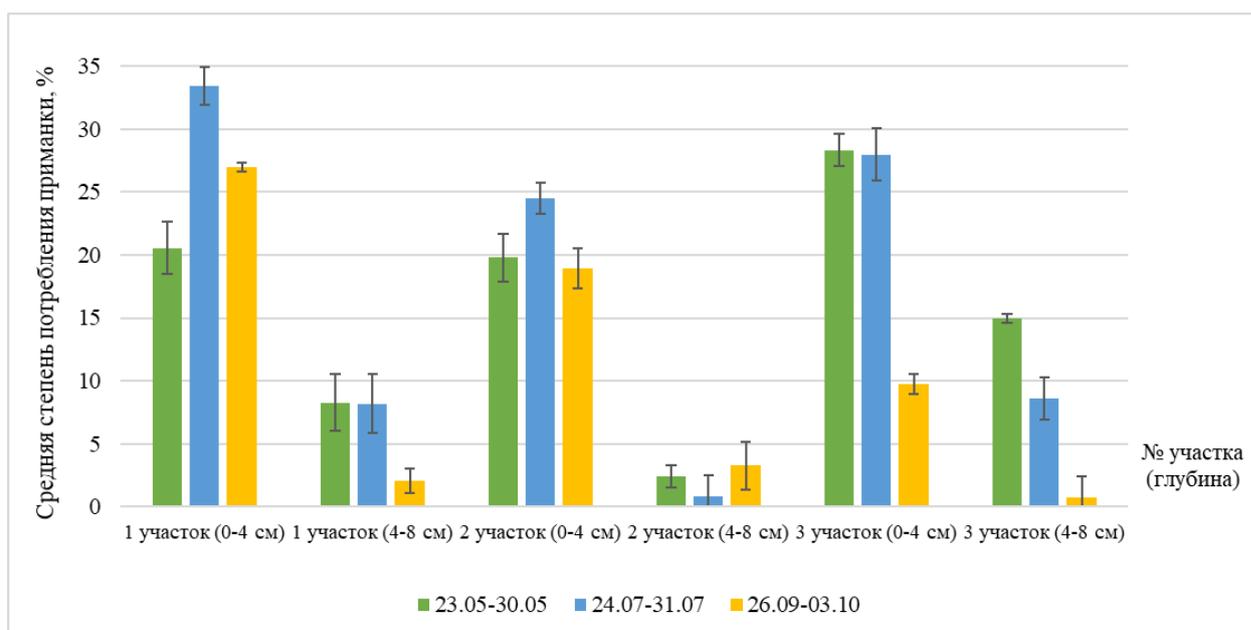


Рисунок 10. Изменение степени потребления приманки в 0-4 см и 4-8 см слое почвы в течение вегетационного периода (ППЭМ "Гришкино", 2023 г.)

Таким образом, наибольшая трофическая активность характерна для участка 1, так как для этого участка характерны, во-первых, наиболее оптимальная степень увлажнения верхней части профиля, а, во-вторых, наибольшее видовое богатство фитоценоза, обуславливающее наличие доступного и относительно богатого растительного опада. На других участках снижение трофической активности вызвано снижением питательной ценности пищевого субстрата и повышением увлажнения.

Следует отметить, что полученные данные не могут в полной мере отражать фоновую динамику трофической активности типичных для Северо-Запада лесных экосистем, так как вегетационный сезон, в который были проведены исследования, относительно многолетней климатической нормы, является более сухим и теплым. Поэтому требуется дальнейшее проведение исследований в этой области.

Для выявления влияния выбора участка и пробной площади внутри участка на трофическую активность почвенных беспозвоночных был выполнен двусторонний дисперсионный анализ. Он показал, что выбор участка оказывает статистически значимое влияние на трофическую активность ($p < 0,0001$). Выбор пробной площади внутри исследуемого участка не оказывает статистически значимого влияния на трофическую активность ($p = 0,04$). Это свидетельствует о том, что участки и пробные площади для проведения почвенно-экологического мониторинга были выбраны правильно.

4.3. Дыхание почв

Результаты определения почвенного дыхания по методу Штатнова приведены на рисунке 11. Интенсивность дыхания закономерно уменьшается с увеличением влажности. Максимальные средние значения интенсивности дыхания за весь период наблюдения характерны для участка 1 и равны $72,67 \pm 9,35$ мг/м²·ч. На участке 2 интенсивность дыхания снижается до $65,86 \pm 12,66$ мг/м²·ч, а на участке 3 она минимальна и составляет $36,4 \pm 0,41$ мг/м²·ч. Количество выделяемого почвами CO₂ различается также и в отдельные периоды вегетационного периода. На участках 1 и 2 наименьшая интенсивность дыхания отмечена в июле, а максимальная - в конце сентября. В июле, не смотря на наиболее оптимальные погодные и гидротермальные условия, микробиологическая активность была минимальна, что скорее всего связано с тем, что к июлю прошлогодний опад был уже частично переработан, а свежий опад поступал в незначительном количестве. В сентябре же на почву и в подстилку поступало большое количество свежего опада, что вызвало рост микробиологической активности и, как следствие, количества углекислого газа, выделяемого при минерализации органических остатков. На участке 3 низкая

интенсивность дыхания наблюдается на протяжении всего вегетационного сезона. Скорее всего это связано с преобладанием анаэробных процессов, малым количеством корней, а также с недостаточным количеством и низким качеством опада.

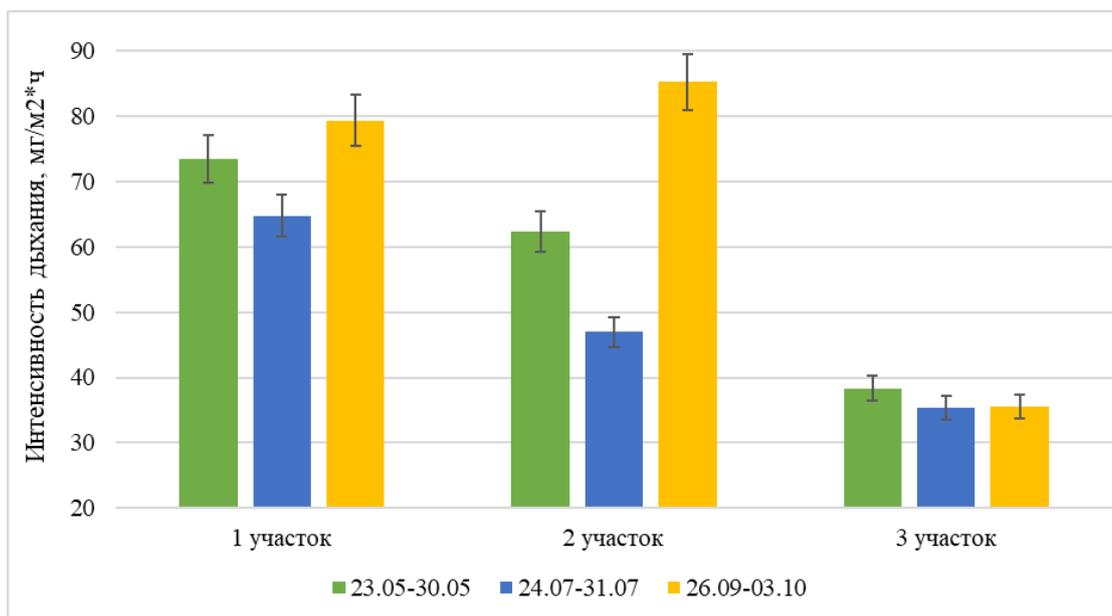


Рисунок 11. Изменение интенсивности выделения почвами CO₂ на участках 1-3 в течение вегетационного периода (ППЭМ "Гришкино", 2023 г.)

4.4. Микробиологическая активность

Если дыхание почв между участками различается значительно, то различия между потерями массы чая не столь велики (рис. 12). Потребление зеленого чая на разных участках практически не различается, тогда как потеря массы ройбуша выше на участке 3 (на 5,3% относительно 1 участка и на 9,3% - относительно 2 участка).

Если результаты определения дыхания почв, по методу Штатнова отражают не только микробное дыхание, но и корневое дыхание, а также дыхание почвенной фауны, то результаты, полученные с применением метода ТВІ, отражают лишь микробиологическую активность. Различия в результатах, полученных с применением разных методов объясняются в первую очередь тем, что существенный вклад в дыхание почв вносит корневое дыхание. Площадь проективного покрытия и видового богатства фитоценозов уменьшается от участка 1 к участку 3, поэтому уменьшается и общее дыхание почв.

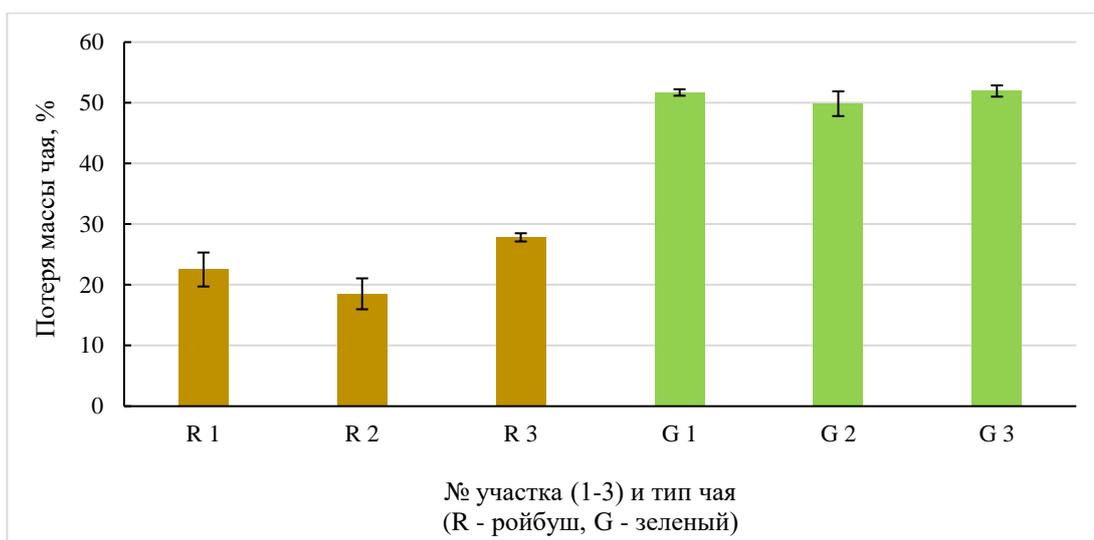


Рисунок 12. Потеря массы зеленого чая (G) и чая ройбуш (R) на участках 1-3 (ППЭМ "Гришкино", 2023)

Кроме того, при определении биологической активности методом Штатнова результаты сильно зависят от наличия и качества опада, тогда как при использовании метода ТВИ на всех сравниваемых участках субстрат (чай) есть и его количество и качество можно считать относительно одинаковыми.

Наиболее интенсивное потребление как зеленого чая, так и чая ройбуш наблюдалось на участке 3. Несмотря на то, что данный участок принадлежит к гидроморфным почвам, избыточное увлажнение в большей степени влияет на минеральные горизонты, в то время как чайные пакетики были заложены на глубину лишь в 8 см. В оторфованной подстилке на небольшой глубине еще сохраняются аэробные условия, поэтому микробиологическая активность там может быть относительно высокой. Также высокая влагоемкость сфагнома обеспечивает микроорганизмам постоянное увлажнение. На участках 1 и 2 влагоемкость подстилки ниже, в силу меньшего покрытия сфагнумом. Так как вегетационный сезон 2023 г. был сухим и теплым относительно климатической нормы, низкая микробиологическая активность и степень потребления чая на участках 1 и 2 скорее всего обусловлены недостаточным увлажнением подстилки.

При использовании полученных данных следует, аналогично с данными по трофической активности почвенных сапрофагов, стоит учитывать тот факт, что вегетационный сезон отличался от климатической нормы, и для получения более корректной фоновой динамики микробиологической активности, типичной для Северо-Запада лесных экосистем, необходимо проведение дополнительных исследований.

4.5. Ферментативная активность почв

Ферментативную активность почв оценивали через определение ее уреазной активности. Уреазная активность почв была определена в лабораторных условиях, поэтому по полученным данным можно судить лишь о разнице в биологической активности между площадками, но не о ее реальных значениях в естественных условиях. Тем не менее из полученных результатов (табл. 8) видно, что максимальная уреазная активность характерна для участка 1 - в образце, отобранном на пробной площади 1.1 произошло изменение рН с 6 до 8,5 при добавлении 0,25 г мочевины и с 6 до 9 - при добавлении 0,5 г мочевины. На остальных участках рН не поднималось более, чем на 1,5, а в образцах с пробных площадей 2.1 и 2.2 и 3.2 не изменилось вовсе.

Таблица 8. Результаты определения уреазной активности в образцах почв с участков 1-3

№ образца	Кол-во мочевины, г	Значение рН				
		0 мин	15 мин	30 мин	1 час	24 часа
1.1	0,25	6	6	6,5	7	8,5
	0,5	6	6	6,5	7	9
1.2	0,25	6	6	6	6,5	7
	0,5	6	6	6	6,5	7,5
1.3	0,25	6	6	6	6,5	7
	0,5	6	6	6	6,5	7
2.1	0,25	6	6	6	6	6
	0,5	6	6	6	6,5	7
2.2	0,25	6	6	6	6	6
	0,5	6	6	6	6	6
2.3	0,25	6	6	6	6	6,5
	0,5	6	6	6	6,5	7
3.1	0,25	6	6	6	6	6,5
	0,5	6	6	6	6,5	7
3.2	0,25	6	6	6	6	6
	0,5	6	6	6	6,5	6,5
3.3	0,25	6	6	6	6	6,5
	0,5	6	6	6	6	7

Выводы

1. По мере продвижения по градиенту увлажнения от участка 1 к участку 3 отмечается увеличение мощности подстилки и степени ее оторфованности. Во всех почвах может быть выделен элювиальный горизонт, в разной степени прокрашенный потечным гумусом, что свидетельствует о признаках переувлажнения исследуемых почв. Минеральная часть также затронута процессами оглеения разной степени выраженности.

2. Анализ морфофункциональных особенностей подстилок почв полигона показал преобладание мор-форм гумуса с характерными следами преобладания грибного разложения. Единственным участком, на котором в подстилке зафиксированы признаки зоогенной переработки растительного опада, а также выделена модер-форма гумуса (Dysmoder), является участок 1, приуроченный к наиболее автоморфным почвам. На гидроморфных позициях на участке 3 отмечено увеличение мощности, а также степени оторфованности подстилки и, из-за наличия гидроморфных признаков, выделена Hydromor форма гумуса.

3. Интенсивность дыхания почв закономерно уменьшается при продвижении от участка 1 к участку 3. Наибольшая урезная активность отмечена на участке 1. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что максимальная биологическая активность характерна для почв автоморфных позиций.

4. Общая степень потребления приманки, определённая по методу BLT, максимальна на участке 1, что свидетельствует о высокой трофической активности макро- и мезопедофауны в почвах на автоморфных позициях. Наиболее оптимальные условия функционирования почвенных беспозвоночных отмечены в середине вегетационного сезона.

5. Микробиологическая активность почв, оцененная с применением метода ТВІ, максимальна на участке 3, что не соответствует общей закономерности, установленной другими методами, и вероятнее всего связано с особенностями погодных условий вегетационного сезона 2023 г.

Благодарности

Выражаю благодарность за предоставление геоботанических описаний и морфологических описаний опорных разрезов и за содействие в их интерпретации сотрудникам Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева Мингареевой Е.В.,

Лазаревой М.А. и Касаткиной Г.А., за помощь в проведении статистической обработки данных д.с.-х.н., профессору кафедры почвоведения и экологии почв Попову А.И.

Список литературы

1. Алексеева А.А., Фомина Н.В. Общие принципы биодиагностических исследований агрогенно-измененных почв // Проблемы современной аграрной науки, 2015. С. 3-6.
2. Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К. В., Васенев В.И. Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи Европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение, 2020. № 10. С. 1276–1286.
3. Апарин Б. Ф., Бабиков Б. В., Касаткина Г. А., Сухачева Е. Ю. Лисинское лесничество как уникальный полигон почвенно-экологического мониторинга // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева, 2016. №83. С. 140-158.
4. Аристовская Т. В., Чугунова М. В. Экспресс-метод определения биологической активности почв // Почвоведение, 1989. Т. 11. С. 142-147.
5. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. // Л.: Наука, 1980. 187 с.
6. Бабенко А.С., Булатова У.А., Нужных С.А. Методы учета почвенных беспозвоночных // Томск: Изд-во ТГУ, 2010. 57 с.
7. Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л., Ермаков А.И. Влияние условий мегаполиса на трофическую активность почвенных сапрофагов в городских лесах // Почвоведение, 2017. № 1. С. 117-129.
8. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв // М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
9. Гагарина Э.И. Литологический фактор почвообразования (на примере Северо-Запада Русской равнины) // СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 260 с.
10. Гагарина Э.И., Матинян Н.Н., Счастливая Л.С., Касаткина Г.А. Почвы и почвенный покров Северо-Запада России // СПб.: из-во СПбГУ, 1995. 233 с.
11. Гераськина А.П. Влияние дождевых червей разных морфо-экологических групп на аккумуляцию углерода в лесных почвах // Вопросы лесной, 2020. Т. 3. № 2. С. 1-20.
12. Гиляров М.С. Почвенные беспозвоночные разрушители подстилки и пути повышения их полезной деятельности // Экология, 1970. №2. С. 8-21.
13. ГОСТ 27593-88. Почвы. Термины и определения: утвержден и введен в действия Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23.02.88 N 326: дата введения 1988-07-01. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007341> (дата обращения: 11.04.2024). - Текст: электронный.
14. Егоров А. А., Титов Ю. В. Флора Лисинского учебно-опытного лесхоза: Учебное пособие // СПб.: ЛТА, 1997. 96 с.

15. Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С. Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация в дерново-подзолистой почв Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение, 2020. № 3. С. 372-378.
16. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв // М.: Изд-во МГУ, 2005. 445 с.
17. Иващенко К.В., Корнейкова М.В., Сальник Н.В. и др. Оценка микробной активности почв вдоль широтного градиента Европейской территории России: применение международного подхода Tea Bag Index // Эволюция биосферы, биогеохимические циклы и биогеохимические технологии: связь фундаментальных и прикладных исследований: материалы XIII Международной биогеохимической школы-конференции, посвященной 160-летию со дня рождения В.И. Вернадского. - Пущино, 2023. С. 135-138.
18. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биология почв Юга России // Ростов-на-Дону, 2004. 350 с.
19. Карманов И.И., Булгаков Д.С. Методика почвенно-агроклиматической оценки пахотных земель для кадастра // М.: ГНУ Почвенный ин-т им В. В. Докучаева Россельхозакадемии, 2012. 119 с.
20. Классификация и диагностика почв России / авт.-сост. Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева [и др.] // Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.
21. Клебанович Н.В., Ефимова И.А., Чиж Д.А. Биология почв: учеб. материалы по спецкурсу «Биофизика почв» для студентов специальности 1-01 02 01 «География» // Минск: БГУ, 2018. 46 с.
22. Климат Санкт-Петербурга и Ленинградской области: ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2> (дата обращения: 10.04.2024)
23. Коваленко М.В., Касымов С.К., Сабырова А.С. Биологическая активность почвы в зависимости от способов основной обработки // Высокие технологии и инновации в науке: сборник статей Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2019. С. 81-84.
24. Кононова М.М. Органическое вещество почв // М.: Издательство: АН СССР, 1963. 314 с.
25. Копосов Г.Ф., Надеждин Б.В. Физические свойства и некоторые особенности водного режима подзолисто-глеевых почв на ленточных глинах в Лисинском учебно-опытном лесхозе // Л.: Лесотехническая академия им. С.М. Кирова, 1967. 33 с.

26. Коркина И.Н., Воробейчик Е.Л. Индекс форм гумуса - перспективный инструмент для экологического мониторинга // Экология, 2016. № 6. С. 434–440.
27. Кудряшева И.В., Бызова Ю.Б. Энергетический бюджет популяции червей *Eisenia nordenskioldi* (Eisen) // Проблемы почвенной зоологии. Ашхабад: Наука., 1984. С. 165–167
28. Матинян Н.Н. Ленточные глины озерно-ледниковых равнин Северо-Запада // Грунтоведение, 2015. №1(6). С. 22-35.
29. Методы определения ферментативной активности почв / Е. В. Даденко, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников // Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2021. 176 с.
30. Национальный атлас России Том.2. Природа и экология / Ключко А.А., Романовская М.А. и др. // М: ФГУП «Госгисцентр», 2004. 495 с.
31. Нечаева Е.Х., Марковская Г.К., Мельникова Н.А. Параметры оценки биологической активности почв // Эпоха науки, 2015. С. 495-498
32. Отчет ФГБНУ «Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева» за 2019 г. о научно-исследовательской работе «Система почвенных индикаторов глобального изменения климата и антропогенного воздействия на экосистемы таежной и степной природных зон разработанная на основе использования почвенных коллекций (промежуточный, этап 1)». Рег. № НИОКТР 119011590146-6.
33. Отчет ФГБНУ «Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева» за 2023 г. о научно-исследовательской работе «Система почвенных индикаторов глобального изменения климата и антропогенного воздействия на экосистемы таежной и степной природных зон разработанная на основе использования почвенных коллекций (заключительный)». Рег. № НИОКТР АААА-А 119011590146-6.
34. Паников Н.С., Палеева М.В., Дедыш С.Н., Дорофеев А.Г. Кинетические методы определения биомассы и активности различных групп почвенных микроорганизмов // Почвоведение, 1991. № 8. С. 109–120.
35. Погода и климат: летопись погоды в Любани URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/26078.htm> (дата обращения: 10.04.2024)
36. Полигоны почвенно-экологического мониторинга лесных экосистем таежной зоны : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Апарин, Б. В. Бабилов, Г. А. Касаткина [и др.]. — СПб: Лань, 2022. 140 с.
37. Постановление Правительства Ленинградской области от 26.12.1996 № 494 «О приведении в соответствие с новым природоохранным законодательством РФ существующей сети ООПТ Ленинградской области»

38. Роде, А. А. Материалы к изучению почвенного покрова Лисинского учебного леспромхоза // Природа и хозяйство учебных леспромхозов Лесотехнической академии. — Л.; М.: Сов. печатник, 1931. Вып. III. С. 94–162.
39. Селиховкин А.В., Бабилов Б. В., Алексеев А.С., Никифоров А.Г. и др. Лисино. 200 лет служения лесам России / отв. ред. А. В. Селиховкин // СПб:СПбГЛТА, 2009. 222 с.
40. Сиротин А.А. Практикум по микробиологии // Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. 80 с.
41. Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов // М.: Наука, 1980. 244 с.
42. Стольникова Е.В. Микробная биомасса, ее структура и продуцирование парниковых газов почвами разного землепользования: автореферат дис. на соискание ученой степени кан. биол. наук // М., 2010. 182 с.
43. Тимофеев, А. И., Савицкая С. Н. Почвообразующие породы Лисинского учебно-опытного лесхоза и их влияние на почвообразование // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2009, № 22. С. 139-146.
44. Толковый словарь по почвоведению / под. ред. А.А. Роде // М.: Наука, 1975. - 290 с.
45. Улимбашев А.М., Занилов А.Х. Сравнительная оценка методов определения дыхания почвы. Возможности их использования в климатических проектах // Известия СПбГАУ, 2022. № 2 (67). С. 83-90.
46. Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв // М.: Наука, 1982. 203 с.
47. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех, 2018. Т. 1. № 2. С. 80-92
48. Чертов О.Г. Типы гумусового профиля лесных почв Ленинградской области: автореферат дис. на соискание ученой степени кан. с-х наук. - Л.: Лесотехническая академия им. С.М. Кирова, 1965. 142 с.
49. Чертов О.Г. Экология лесных земель // Л.: Наука, 1981. 192 с.
50. Чертов О.Г., Надпорожская М.А. Формы гумуса лесных почв: концепции и классификации // Почвоведение, 2018. № 10. С. 1202–1214
51. Чимитдоржиева Э.О., Корсунова Ц.Д-Ц., Чимитдоржиева Г.Д. Биологическая активность мерзлотных почв // Успехи современного естествознания, 2022. № 12. С. 206-211.
52. Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение, 1987. № 1. С. 127-133.
53. Шатских К.Н., Пятина Е.В. Макрофауна почв разной степени увлажнения на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза // Биота, генезис и продуктивность

- почв: материалы XIX Всероссийского совещания по почвенной зоологии. - Улан-Удэ, 2022. С. 194-195.
54. Ясулбутаева И.В., Магомедов М.М.-Р. Биологическая активность почв экотонных сообществ тамарисковых зарослей Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие, 2011. № 2. С. 109-114
 55. Djukic I., Kepfer-Rojas S., Schmidt I.K., Larsen K.S., Beier C., Berg B., Verheyen K., Caliman, A., Paquette, A., Guti'errezz-Giron, A., et al., Early stage litter decomposition across biomes // *Science of the Total Environment*, 2018. P. 1369–1394.
 56. Gongalsky K.B., Pokarzhevskii A.D., Filimonova Z.V., Savin F.A. Stratification and dynamics of bait-lamina perforation in three forest soils along a north–south gradient in Russia // *Applied Soil Ecology*, 2004. Vol. 25. №. 2. P. 111–122.
 57. ISO 16072. Soil quality – laboratory methods for determination of microbial soil respiration // Geneva: International Standards Organization, 2002.
 58. Ivashchenko K., Gavrichkova O., Korneykova M., Vasenev V. et al., Extension of the soil monitoring network via tea bag initiatives: A 3000 km latitudinal gradient in European Russia // *Science of the Total Environment*, 2024. № 927. P. 1-9.
 59. Keuskamp J.A., Dingemans B.J.J., Lehtinen T., Sarneel J.M., Hefting M.M. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems // *Methods Ecol. Evol.*, 2013. Vol. 4. P. 1070–1075/
 60. Kratz W. The bait-lamina test // *Environmental Science and Pollution Research*, 1998. Vol. 5. №. 2. P. 94–96.
 61. Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods // *Soil Biol. Biochem*, 2006. Vol. 38. P. 425–448.
 62. Scheunemann N., Russell D.J. Hydrological regime and forest development have indirect effects on soil fauna feeding activity in Central European hardwood floodplain forests // *Nature Conservation*, 2023. Vol. 53. P. 257-278.
 63. von Törne E. Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests // *Pedobiologia*, 1990. Vol. 34. №. 2. P. 89–101.
 64. Zanella A., Jabiol B., Ponge J.F. et al. European morpho-functional classification of humus forms // *Geoderma*, 2011. Vol. 164. P. 138–145.

Приложения

Приложение А. Опорные разрезы 1 и 3

Приложение А1. Опорный разрез 1 - дерново-элювиально-метаморфическая потечно-гумусовая глееватая почв (Отчет..., 2023).



Приложение А2. Опорный разрез 3 - торфяно-элювиально-метаморфическая потечно-гумусовая глееватая почв (Отчет..., 2023).

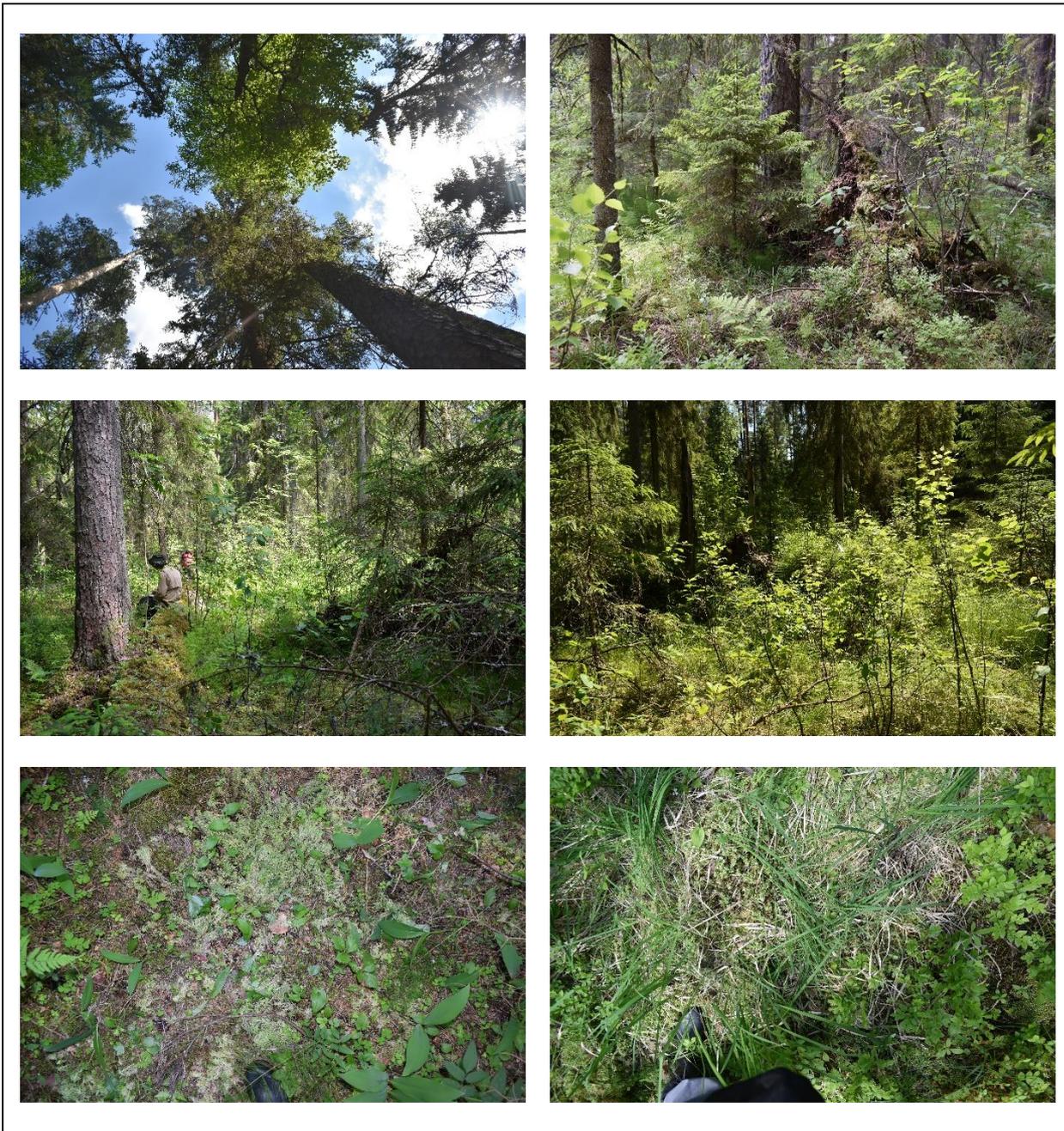


Приложение Б. Фитоценозы участков 1-3

Приложение Б1. Фитоценоз участка 1 (Отчет..., 2023).



Приложение Б2. Фитоценоз участка 2 (Отчет...2023).



Приложение Б3. Фитоценоз участка 3 (Отчет..., 2023).

