

На правах рукописи

МЕЛЕСЕ СОЛОМОН МЕЛАКУ

Функционально-экологическая оценка дерново-подзолистых почв лесных экосистем с разным уровнем рекреационной нагрузки в условиях южнотаежной зоны Центральной России

Специальность: 1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на базе кафедры экологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Васенев Иван Иванович**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии ФГБОУ ВО «Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Ананьева Надежда Дмитриевна**, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азотов и углеродов Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН ФИЦ ПНЦБ РАН

Разгулин Сергей Михайлович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории лесной геоботаники и лесного почвоведения ФГБУН Института лесоведения РАН

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Защита состоится «23» августа 2023 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.06 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8(499)976-21-84.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Отдел диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета: <http://www.timacad.ru>.
Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.06,
кандидат биологических наук

Морев Д. В

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В настоящее время особенно высокую актуальность приобретают экологические проблемы рекреационного природопользования, связанные с последствиями ускоренной урбанизации в России и во всем мире. Многочисленные исследования посвящены изучению экологических функций и особенностей функционирования лесных почв в условиях биogeоценозов с различным уровнем антропогенной и, в частности, рекреационной нагрузки (Карпачевский, 1977; Полякова и др., 1981, Беднова, 2003; Мосина, 2003; Голубева, Жаринов, 2011; Rusterholz *et al.*, 2011; Vasenev *et al.*, 2019).

В результате происходят серьезные изменения в экологических функциях и экосистемных сервисах городских почв, количественная диагностика которых серьезно затруднена на фоне их повышенной пространственно-временной изменчивости и требует проведения системных мониторинговых наблюдений, учитывающих как исходное пространственное разнообразие почв, так и их изменения в результате рекреационной нагрузки (Карпачевский *et al.*, 1996; Мозолевская и др., 1997; Васенев и др., 2007; Макаров, 2013; Рагимов и др., 2014; Vasenev *et al.*, 2017; 2018; Савич и др., 2018).

Особое место в природоохранной лесной инфраструктуре Москвы по праву занимает Лесная Опытная Дача РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с преобладанием на её территориях, в целом, хорошо сохранившихся дерново-подзолистых суглинистых почв, очень близких по морфогенетическому строению профиля, литологии и свойствам дерново-палево-подзолистым почвам признанного региональным фоном южнотаежной зоны Европейской части России Центрально-лесного природного биосферного заповедника (Мосина, 2003; Васенев и др., 2007; Васенев, 2008; Наумов, 2009; Яшин и др., 2018).

Целью работы является проведение комплексных мониторинговых почвенно-экологических исследований с функционально-экологической оценкой регионально-типологических особенностей пространственного варьирования и сезонной динамики свойств дерново-подзолистых почв с разным уровнем рекреационной нагрузки в условиях представительных для южнотаежной зоны Центральной России экосистем Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**.

1. Экологическая оценка влияния склонового рельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику физических свойств дерново-подзолистых почв представительных для северной части Москвы лесных экосистем Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

2. Экологическая оценка влияния склонного рельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику физико-химических и химических свойств исследуемых дерново-подзолистых почв.

3. Экологическая оценка влияния склонового рельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику содержания гумуса и запасов органического углерода исследуемых дерново-подзолистых почв.

4. Экологическая оценка влияния склонового рельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику почвенных потоков CO_2 исследуемых дерново-подзолистых почв.

5. Сравнительная оценка условий функционирования лесных дерново-подзолистых почв и выполняемых ими экологических функций в условиях различного мезорельефа и разного уровня рекреационной нагрузки в представительных для северной части Москвы лесных экосистемах Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Научная новизна. На основе проведённых в течение двух полевых сезонов 2021-2022 гг. мониторинговых почвенно-экологических исследований в условиях представительных для северной части Москвы и южнотаежной зоны Центральной России рекреационно используемых лесных экосистем Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева установлены регионально-типологические закономерности пространственной изменчивости, сезонной и межсезонной динамики основных диагностических параметров функционально-экологического состояния характерных для южнотаежных экосистем дерново-подзолистых почв при разном уровне рекреационной нагрузки.

Даже в условиях сглаженного моренного мезорельефа ярко выражена четкая пространственная дифференциация влажности характерных для южнотаежных экосистем дерново-подзолистых почв: в почвах у подножия склонов она устойчиво в 1,1–1,7 раза выше влажности верхних горизонтов почв на вершине моренного холма. Летние значения влажности верхних горизонтов

A1, A1A2 и A2 в 2,3–2,8 раза ниже весенних. В течение вегетационного периода наблюдается общая тенденция значительного снижения содержания подвижного фосфора: в среднем – на 20%.

Для содержания гумуса в верхних горизонтах (A1–A1A2–A2) общей анализируемой мощности 15 см характерен выраженный апрельский максимум, и затем оно значительно снижается: в большинстве случаев – на 0,5–0,7% (до 20–30 относительных %) до сезонного минимума в августе. Максимальные почвенные потоки CO₂ достигаются летом (35–42 г/м² в сутки), при варьировании по формам мезорельефа и разным уровням рекреационной нагрузки до 1,7 раз. К концу октября они падают в 2,9–5,5 раза.

В условиях относительно засушливого по осадкам летнего сезона 2022 года (с близкой к среднемноголетним значениям годовой суммой осадков) пространственные различия по формам мезорельефа и вариантам с разным уровнем рекреационной нагрузки выражены слабее, чем в условиях 2021 года с суммой осадков за летний период и год, соответственно на 10% и 20% выше их среднемноголетних значений.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют оценить влияние склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на пространственную дифференциацию и сезонную динамику целого ряда основных диагностических параметров лесных дерново-подзолистых почв и выполняемых ими экологических функций. Это повышает детализацию и точность их анализа при проведении и прикладной интерпретации результатов фоновых, локальных мониторинговых почвенно-экологических исследований, проектов по оценке воздействия на окружающую среду, инвентаризационных обследований, верификации их заключений и валидации углеродных (климатических) проектов.

Методология и методы исследования. Исследования проводились на 15 элементарных площадках ключевых участков мониторинга (КУМ размером 50x50 м²), расположенных на 5 элементах рельефа. На данных площадках оценивали состояние напочвенной растительности и исследовали сезонную динамику диагностических показателей мониторинга верхних горизонтов почв A1 – A1A2 – A2 с отбором образцов по глубинам 0–5 см, 5–10 см, 10–15 см. Почвенная эмиссия CO₂ (в г/м² в сутки) рассчитывалась с использованием

уравнения идеального газа на основе данных по скорости увеличения концентрации CO_2 в камере с учетом температуры и давления внутри нее.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Дерново-подзолистые почвы рекреационно используемых лесных экосистем южнотаежной зоны Центральной России даже в условиях пологих форм моренного мезорельефа (в пределах 3°) характеризуются повышенной пространственной неоднородностью влажности и запаса влаги, подвижных форм азота, фосфора, калия, содержания гумуса и интенсивности почвенных потоков CO_2 – с выраженной дифференциацией по формам склонового мезорельефа и участкам с различной рекреационной нагрузкой.

2. Дерново-подзолистые почвы лесных экосистем южнотаежной зоны Центральной России характеризуются выраженной сезонной динамикой влажности и запаса влаги, минерального азота, подвижных форм фосфора и калия, содержания гумуса и интенсивности почвенных потоков CO_2 , которая в значительной мере дифференцирована по формам склонового мезорельефа и участкам с разным уровнем рекреационной нагрузки.

3. Отмеченные регионально-типологические особенности повышенной пространственной дифференциации и сезонной динамики диагностических параметров функционирования лесных дерново-подзолистых почв в условиях северной части Москвы необходимо принимать во внимание при анализе, планировании и интерпретации результатов экологического мониторинга почв фоновых и основных объектов мониторинга.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается данными статистической обработки первичных данных мониторинга, полученных с использованием стандартизированных методов полевых исследований и лабораторных анализов. Результаты исследования докладывались на “Международной научно-практической конференции в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева” (2020), “Генеральной Ассамблее EGU” (2020), “Конференции по передовым технологиям для устойчивого развития городской зеленой инфраструктуры” (SSC, 2020), “Всероссийской, с международным участием, научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова” (2021), “Международной научной конференции: Умные и устойчивые города” (SSC, 2022,

“Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова” (2022), заседаниях кафедры экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (2019-2023).

Публикация результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в т.ч. 2 работы в журналах, рекомендуемых ВАК по специальности «Экология», и 1 статья – в материалах международной конференции, цитируемых в Scopus. Ещё 1 статья принята к опубликованию в материалах международной конференции, цитируемых в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, включающих обзор литературы, описание объектов и методов исследований, анализ результатов проведенных исследований, заключения и списка использованной литературы. Диссертационная работа изложена на 174 страницах, включая 27 таблиц и 59 рисунков. Список литературы состоит из 210 источников, в том числе 73 англоязычных.

Благодарности. Прежде всего, автор Благодарен Богу за Его безусловную и бесконечную любовь, милосердие и благодать. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доктору биологических наук, профессору И.И. Васеневу за его помощь в проведении этой работы и за ценные советы и рекомендации. Автор выражает глубокую благодарность всем сотрудникам, аспирантам и студентам кафедры экологии и лаборатории агроэкологического мониторинга, моделирования и прогнозирования экосистем РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, которые помогли в проведении полевых и лабораторных исследований по теме диссертационной работы.

Глава I. Функционально-экологическая оценка почв лесных экосистем с разным уровнем рекреационной нагрузки

Экологические функции и экосистемные сервисы почв отражают способность почвы удовлетворять потребность растений в элементах питания, влаге и воздухе, обеспечивая нормальные условия для устойчивого функционирования продуцентов (Дорст, 1968; Добровольский и др., 1991; 2012; Artiola *et al.*, 2004; Девятова и Крамарева, 2014; Савич и др., 2018; Столярова и др., 2021).

Уникальные экологические функции почв обеспечивают циклическое развитие растений и микроорганизмов лесных экосистем (Karpachevskii и др.,

1996; Околелова и др., 2016; Downey, 2021). Они играют решающую роль в круговороте их элементов питания, связывании углерода и поддержке роста растений (Arnold, 1994; 2002; Горячкин, 1998; Широких, Широких, 2004; Добровольский, Соколова, 2007; Куликова и др., 2007; Юницкий и др., 2020).

Почвы вносят решающий вклад в широкий спектр экосистемных услуг лесных экосистем, которые в свою очередь необходимы для устойчивого функционирования вмещающих их естественных и в разной степени управляемых экосистем (Карпачевский и др., 2007; Васенев, Раскатова, 2009; Добровольский, 2013; Yimer, 2015). Из предложенных в обобщающих работах Г.В. Добровольского (2004; 2012) и А.А. Поповой (2021) экологических функций почв особый интерес для устойчивого функционирования городских экосистем представляют их почвозащитная, рекреационная, водо- и климато-регулирующая, химические и физико-химические, атмосферные функции.

Рекреационная нагрузка является одним из основных антропогенных факторов, значительно влияющих на растительность и почву и приводящих к их изменению (Führer, 2000, Vasenev et al., 2017; Мелесе, Васенев, 2022).

Глава 2. Объекты и методы исследования

Исследования проводились на представительных для природоохранного каркаса северной части Москвы объектах Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Для исследований были выбраны представительные ключевые участки экологического мониторинга (КУМ), характеризующие принципиальное фоновое разнообразие лесных экосистем Лесной Опытной Дачи (ЛОД) с минимальной, средней и сильной рекреационной нагрузкой, занимающих контрастные позиции в мезорельефе ЛОД с доминированием пологого моренного холма (рис. 2.1, табл. 2.1).

Ключевые исследования расположены на катене, простирающейся с северо-востока на юго-запад ЛОД поперек вытянутого в перпендикулярном направлении пологого моренного холма. Исследования проводились на 15 элементарных площадках ключевых участков мониторинга (КУМ) размером 50х

50 м²), расположенных на 5 зеркальных элементах рельефа: нижняя часть (Подошва) склона Северо-Восточной экспозиции (ПСВ) – средняя часть Склона Северо-Восточной экспозиции (ССВ) – Вершина Моренного Холма (ВМХ) – средняя часть Склона Юго-Западной экспозиции (СЮЗ) и нижняя часть (Подошва) склона Юго-Западной экспозиции (ПЮЗ). Комплексные экологические исследования выполнялись с использованием принятых полевых, лабораторных и информационно-аналитических методов, включая анализ почвенных потоков CO₂ in situ.

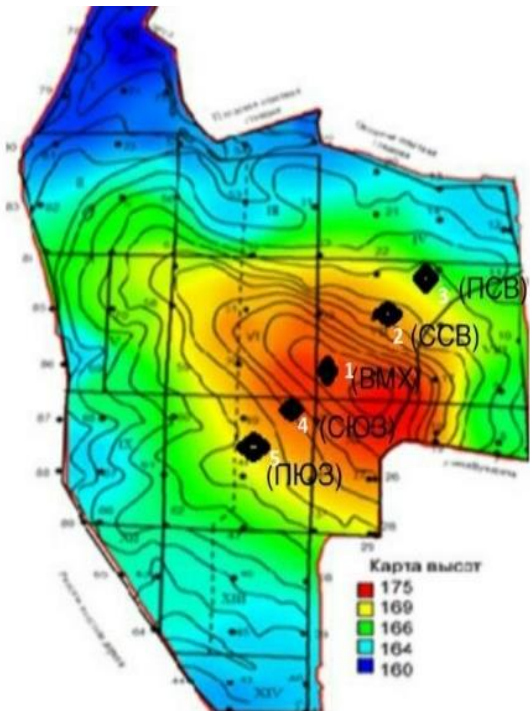


Рисунок 2.1. Картограмма ЛОД с ключевыми участками мониторинга

Таблица 2.1. Процент тропиной сети на элементарных площадках с разным уровнем рекреационной нагрузки ключевых участков мониторинга ЛОД.

| Положение в мезорельефе | Рекреационная нагрузка | Площадь тропиной сети на площадке, % |
|--|------------------------|--------------------------------------|
| Вершина пологого моренного холма (ВМХ) | Минимальная | 0.36 |
| | Средняя | 0.92 |
| | Сильная | 1.44 |
| Средняя часть склона северо-восточной экспозиции (ССВ) | Минимальная | 1.40 |
| | Средняя | 2.98 |
| | Сильная | 3.36 |
| Подошва склона северо-восточной экспозиции (ПСВ) | Минимальная | 1.12 |
| | Средняя | 2.85 |
| | Сильная | 3.16 |
| Средняя часть склона юго-западной экспозиции (СЮЗ) | Минимальная | 1.76 |
| | Средняя | 3.14 |
| | Сильная | 3.76 |
| Подошва склона юго-западной экспозиции (ПЮЗ) | Минимальная | 1.96 |
| | Средняя | 3.34 |
| | Сильная | 3.92 |

ГЛАВА 3. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на значения и динамику физических свойств исследуемых почв

Связанные с разным уровнем рекреационной нагрузки изменения влажности почв максимально выражены в дерново-подзолистых глееватых почвах на подошве склона (рис. 3.1), изменения плотности сложения – в дерново-подзолистых почвах на вершине холма (табл. 3.1). Склоновые почвы и почвы подошвы склона, при более низких значениях плотности сложения верхних горизонтов при минимальной рекреационной нагрузке, как правило, сильнее уплотняются (на 0,25–0,3 г/см³) при возрастании рекреационной нагрузки.

Таблица 3.1. - Пространственная дифференциация по элементам мезорельефа с разным уровнем рекреационной нагрузки влажности и плотности сложения дерново-подзолистых почв, усредненных по сезону для верхнего слоя 0–15 см.

| Уровень рекреационной нагрузки | Влажность почвы, % | | | Плотность сложения, г/см ³ | | |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
| | ВМХ | ССВ | ПСВ | ВМХ | ССВ | ПСВ |
| Минимальный | 21,3±2,0 | 26,1±2,2 ^a | 31,1±2,7 ^a | 1,28±0,03 | 1,21±0,02 ^a | 1,20±0,03 ^a |
| Средний | 19,6±2,1* | 23,5±2,1** | 27,7±2,7** | 1,44±0,01** | 1,36±0,01** | 1,31±0,02** |
| Сильный | 17,8±2,2* | 22,0±2,8** | 25,5±2,3** | 1,57±0,03** | 1,51±0,03** | 1,40±0,02** |

Примечание: ^a – значимость различий по сравнению с почвой на вершине моренного холма при P≤0,01; значимость различий по сравнению с почвой при минимальном уровне нагрузки: * – значимы при P≤0,05; ** – значимы при P≤0,01.

Статистически достоверное снижение майского запаса почвенной влаги в почве на подошве склона с сильным уровнем рекреационной нагрузки и сентябрьского запаса почвенной влаги в почвах со средним и сильным уровнем нагрузки позволяют уточнить роль разных элементов ландшафта городских лесных экосистем в регулировании водного баланса территории и пониженную способность уплотненных за лето в условиях повышенной рекреационной нагрузки почв к накоплению влаги сентябрьских осадков.

Установленные зависимости сезонной динамики влажности, плотности почвы и запаса влаги в верхних почвенных горизонтах от крутизны склона и рекреационной нагрузки будут полезны для планирования и экологически безо-

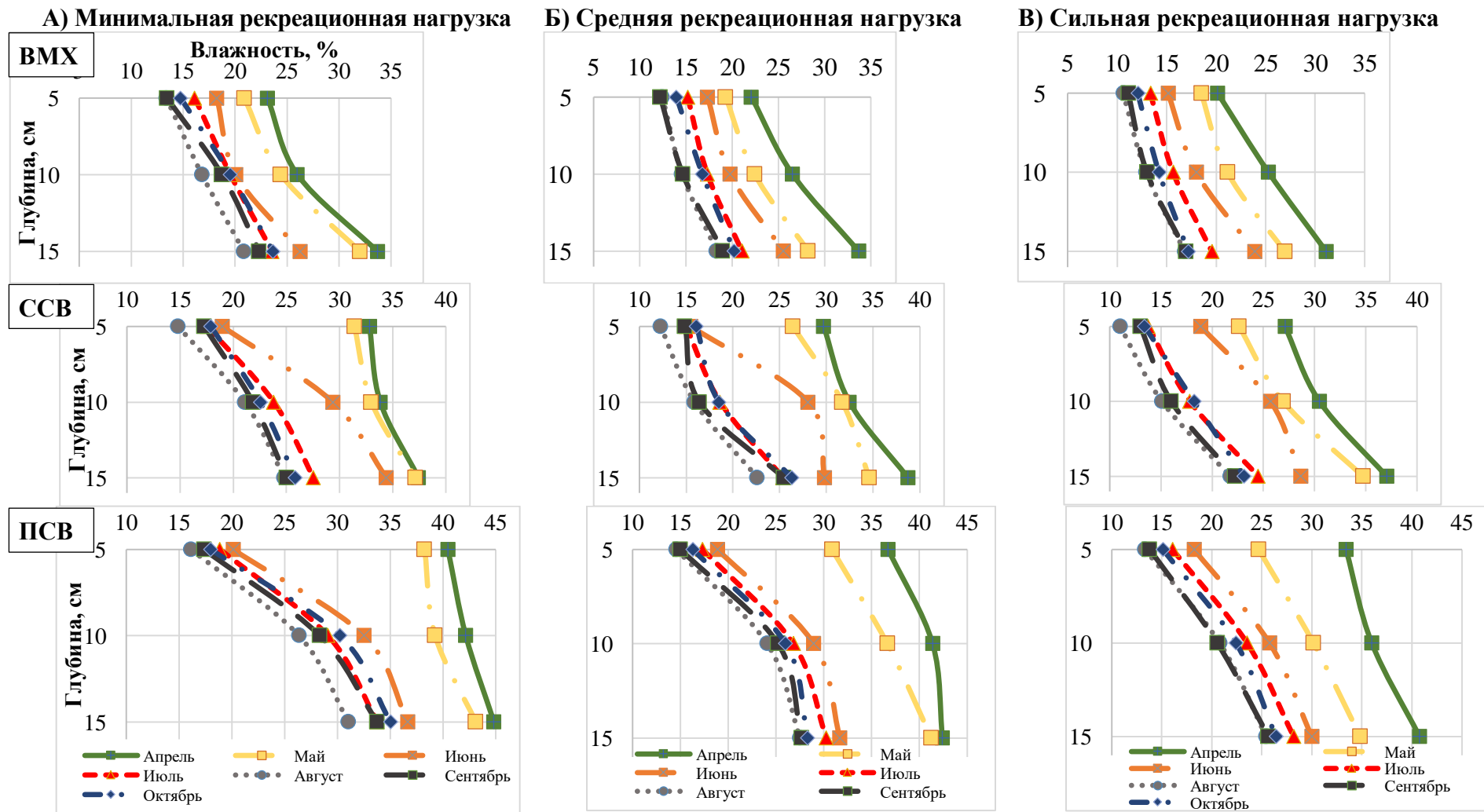


Рисунок 3.1. Сезонная динамика влажности верхней части профиля дерново-подзолистых почв на ключевых участках мониторинга Лесной опытной дачи в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на северо-восточном склоне.

пасной регламентации пространственно дифференцированной рекреационной нагрузки в условиях различных частей городского склонового ландшафта даже при незначительной крутизне склонов (до 3-4°) и наличии близкого к природным условиям растительного покрова.

ГЛАВА 4. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на физико-химические и химические свойства исследуемых почв

Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются максимальным по сезону уровнем актуальной и обменной кислотности (минимальными значениями pH_{H_2O} и pH_{KCL}). Последующий тренд частичной нейтрализации сильно кислой реакции среды, как правило, продолжается до августа или сентября, с последующим осенним подкислением (табл. 4.1). Изменения обменной кислотности почв в рамках ее сезонной динамики могут составлять 0,6–0,7 единицы рН.

Почвы склонов характеризуются устойчиво более низким содержанием обменного аммония, по сравнению с почвами пологого моренного холма (рис. 4.1). Содержание аммония в почвах на склоне юго-западной экспозиции устойчиво и, как правило, статистически достоверно выше их аналогов на склоне северо-восточной экспозиции. Различия максимально выражены в почвах на подошве исследуемых склонов. Почвы на всех исследованных элементах мезорельефа характеризуются общим трендом значительного (от 1,4- до 4-кратного), но не всегда статистически достоверного снижения содержания как аммония, так и нитратов при возрастании рекреационной нагрузки.

Распределение нитратов четко дифференцировано по экспозиции склона. На склоне северо-восточной экспозиции их содержание в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв, в большинстве случаев, устойчиво снижается вниз по склону до 2-кратного сокращения на подошве. В мае-июле 2021 года с повышенным на 20% количеством осадков содержание нитратов в верхних горизонтах почв всех исследуемых участков устойчиво на 15–20% ниже его содержания в 2022 году с близким к среднегодовому количеством осадков. В августе-сентябре наблюдается обратный тренд – с более высоким содержанием нитратов в 2021 году при очень низком количестве осадков в августе–первой декаде сентября 2022 года.

Таблица 4.1. Статистический анализ ($\mu \pm \sigma$) сезонной динамики обменной кислотности почв (pH_{KCL}) верхней части профиля (0–15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне северо-восточной экспозиции.

| Год | Нагрузка | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь |
|--|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| На вершине пологого моренного холма | | | | | | | | |
| 2021 | Минимальная | 4.05±0.23 | 4.30±0.25 | 4.42±0.26 | 4.70±0.29 | 4.74±0.07 | 4.44±0.18 | 4.44±0.14 |
| | Средняя | 4.35±0.34 | 4.56±0.38 | 4.65±0.33 | 4.81±0.22 | 4.98±0.16 | 4.83±0.20 | 4.61±0.29 |
| | Сильная | 4.64±0.26 | 4.91±0.25 | 4.93±0.14 | 5.05±0.15 | 5.00±0.10 | 4.97±0.11 | 4.83±0.27 |
| 2022 | Минимальная | | 3.85±0.26 | 4.38±0.25 | 4.28±0.52 | 4.27±0.34 | 4.05±0.18 | 4.08±0.11 |
| | Средняя | | 4.13±0.52 | 4.64±0.34 | 4.53±0.22 | 4.54±0.28 | 4.34±0.06 | 4.19±0.19 |
| | Сильная | | 4.26±0.44 | 4.70±0.22 | 4.91±0.40 | 4.59±0.13 | 4.46±0.19 | 4.49±0.11 |
| На средней части склона | | | | | | | | |
| 2021 | Минимальная | 3.60±0.21 | 3.89±0.34 | 4.00±0.34 | 4.24±0.22 | 4.16±0.27 | 3.96±0.03 | 3.95±0.15 |
| | Средняя | 3.94±0.10 | 4.08±0.10 | 4.22±0.18 | 4.25±0.41 | 4.50±0.28 | 4.08±0.06 | 4.14±0.09 |
| | Сильная | 4.27±0.01 | 4.42±0.17 | 4.62±0.13 | 4.47±0.32 | 4.68±0.39 | 4.30±0.05 | 4.29±0.18 |
| 2022 | Минимальная | | 3.80±0.33 | 3.97±0.33 | 4.21±0.43 | 4.36±0.39 | 4.42±0.10 | 3.98±0.15 |
| | Средняя | | 3.96±0.12 | 4.02±0.21 | 4.25±0.34 | 4.56±0.32 | 4.72±0.39 | 4.22±0.12 |
| | Сильная | | 4.39±0.17 | 4.58±0.13 | 4.22±0.22 | 4.74±0.24 | 4.81±0.32 | 4.44±0.16 |
| На подошве склона | | | | | | | | |
| 2021 | Минимальная | 3.13±0.08 | 3.51±0.12 | 3.61±0.09 | 3.74±0.09 | 3.64±0.03 | 3.60±0.06 | 3.40±0.06 |
| | Средняя | 3.26±0.14 | 3.90±0.17 | 3.91±0.10 | 4.00±0.11 | 3.80±0.01 | 3.78±0.03 | 3.43±0.12 |
| | Сильная | 3.44±0.16 | 3.93±0.41 | 3.93±0.40 | 4.11±0.31 | 4.03±0.09 | 4.00±0.03 | 3.62±0.21 |
| 2022 | Минимальная | | 3.50±0.39 | 3.51±0.46 | 3.66±0.43 | 3.77±0.11 | 3.61±0.05 | 3.44±0.06 |
| | Средняя | | 3.77±0.19 | 3.88±0.10 | 4.03±0.47 | 3.84±0.01 | 3.82±0.03 | 3.51±0.16 |
| | Сильная | | 3.89±0.42 | 3.91±0.40 | 4.08±0.31 | 4.11±0.07 | 4.03±0.04 | 3.71±0.25 |

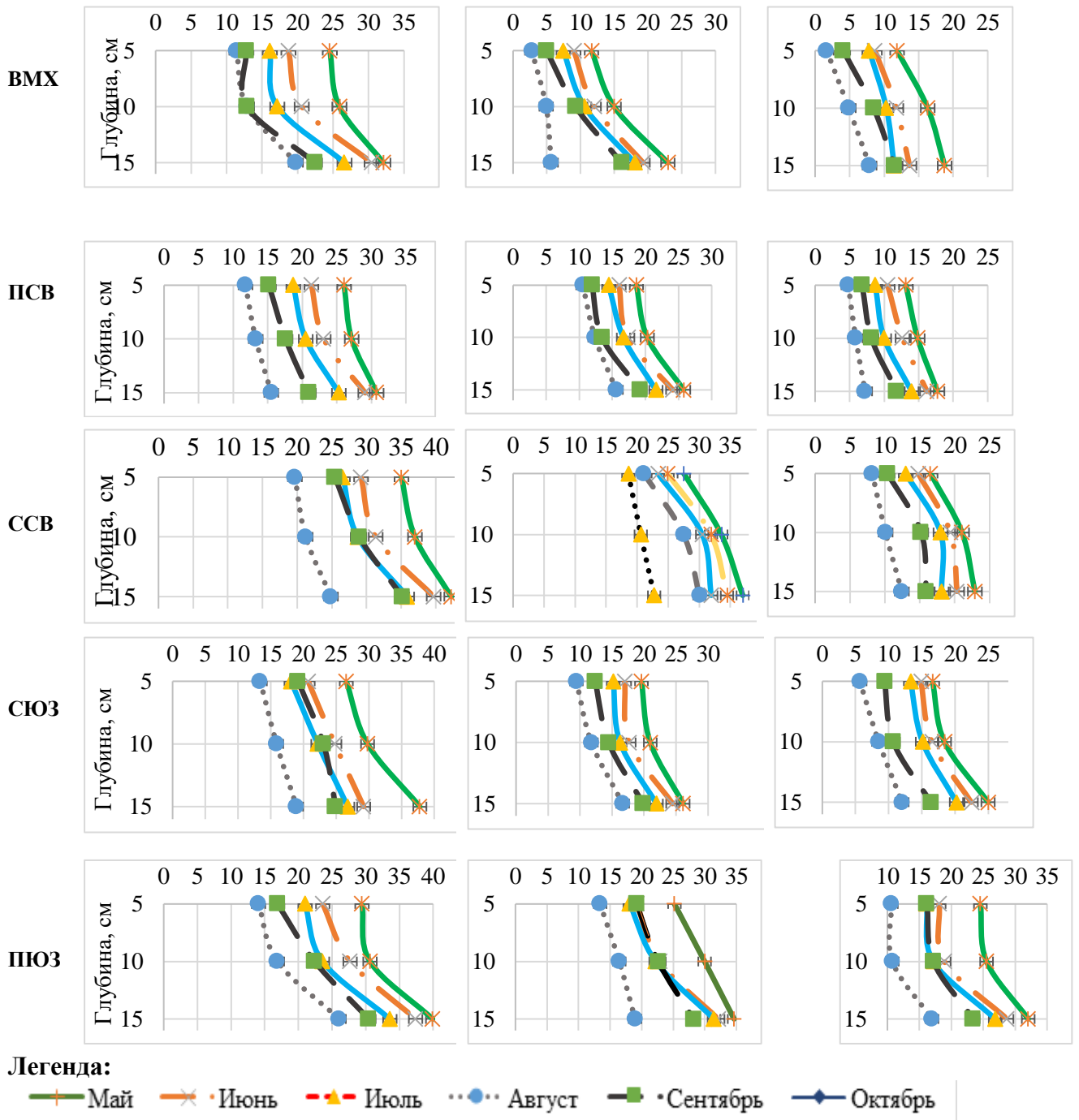


Рисунок 4.1. Изменение содержания аммония (мг/кг) в верхних горизонтах почв с увеличением рекреационной нагрузки

Четко выражена пространственная дифференциация сезонной динамики запасов подвижного фосфора в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв по их позиции на склоне, экспозиции (и формы склона) и уровню рекреационной нагрузки (табл. 4.2). Весенние месяцы (апрель – май)

характеризуются и максимальным по сезону содержанием подвижных форм фосфора и калия в верхних горизонтах всех исследуемых почв. В большинстве случаев статистически достоверно их значительное снижение при возрастании рекреационной нагрузки. Летний тренд обеднения почв подвижным фосфором продолжается до октября. В мае-июле 2021 года с повышенным количеством осадков содержание подвижного фосфора в верхних горизонтах почв четырех из пяти исследуемых участков незначительно, но устойчиво на 1–6 мг/кг выше его содержания в более засушливом летом 2022 году.

Таблица 4.2. Функционально-экологическая оценка запасов подвижного фосфора (P_2O_5 (г/м²) в верхней части (0–15 см) дерново-подзолистых почв в условиях склонного мезорельефа и разной рекреационной нагрузки на ЛОД

| КУМ | Сезонная динамика по месяцам запасов P_2O_5 , г м ⁻² | | | | | | Сезонное изменение ΔP_2O_5 (г м ⁻²) |
|---|---|------|------|------|------|------|---|
| | IV | V | VI | VII | VIII | IX | |
| Минимальный уровень рекреационной нагрузки | | | | | | | |
| ВМХ | 32 | 30.9 | 30.7 | 29.2 | 28.3 | 26.7 | 5.24 |
| ССВ | 35.1 | 34.4 | 34.1 | 32.3 | 31.7 | 32.2 | 2.86 |
| ПСВ | 44.9 | 44.9 | 43.4 | 39 | 41.5 | 37 | 7.94 |
| СЮЗ | 40 | 38.2 | 36.9 | 32.3 | 30.1 | 30 | 9.99 |
| ПЮЗ | 38.4 | 37.1 | 34.2 | 29.8 | 29.5 | 22.4 | 15.99 |
| Средний уровень рекреационной нагрузки | | | | | | | |
| ВМХ | 30.5 | 30.2 | 29.3 | 28.5 | 25.4 | 23.3 | 7.2 |
| ССВ | 31.3 | 33.1 | 32.2 | 29.5 | 29.1 | 26.8 | 4.56 |
| ПСВ | 42.2 | 40.5 | 39 | 42.9 | 37.7 | 34 | 8.19 |
| СЮЗ | 37.6 | 34.6 | 32.9 | 31.5 | 30.3 | 29.5 | 8.14 |
| ПЮЗ | 36.3 | 35.5 | 30.6 | 28.4 | 27.7 | 21.4 | 14.87 |
| Сильный уровень рекреационной нагрузки | | | | | | | |
| ВМХ | 20.5 | 21.3 | 20.4 | 19.6 | 17.8 | 16.4 | 4.11 |
| ССВ | 29.1 | 31.7 | 29.6 | 26.9 | 25.8 | 22 | 7.08 |
| ПСВ | 32.4 | 27.2 | 28.9 | 32.8 | 34 | 21.8 | 10.59 |
| СЮЗ | 32.6 | 22.9 | 21.6 | 20.5 | 18.9 | 18.1 | 14.45 |
| ПЮЗ | 2.61 | 2.45 | 2.45 | 2.43 | 2.42 | 2.49 | 10.39 |

ГЛАВА 5. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику содержания гумуса и почвенных потоков CO₂

Ярко выражена пространственно-временная изменчивость содержания гумуса исследуемых дерново-подзолистых почв ЛОД по склону, с увеличением рекреационной нагрузки в ходе основного сезона вегетации (рис. 5.1).

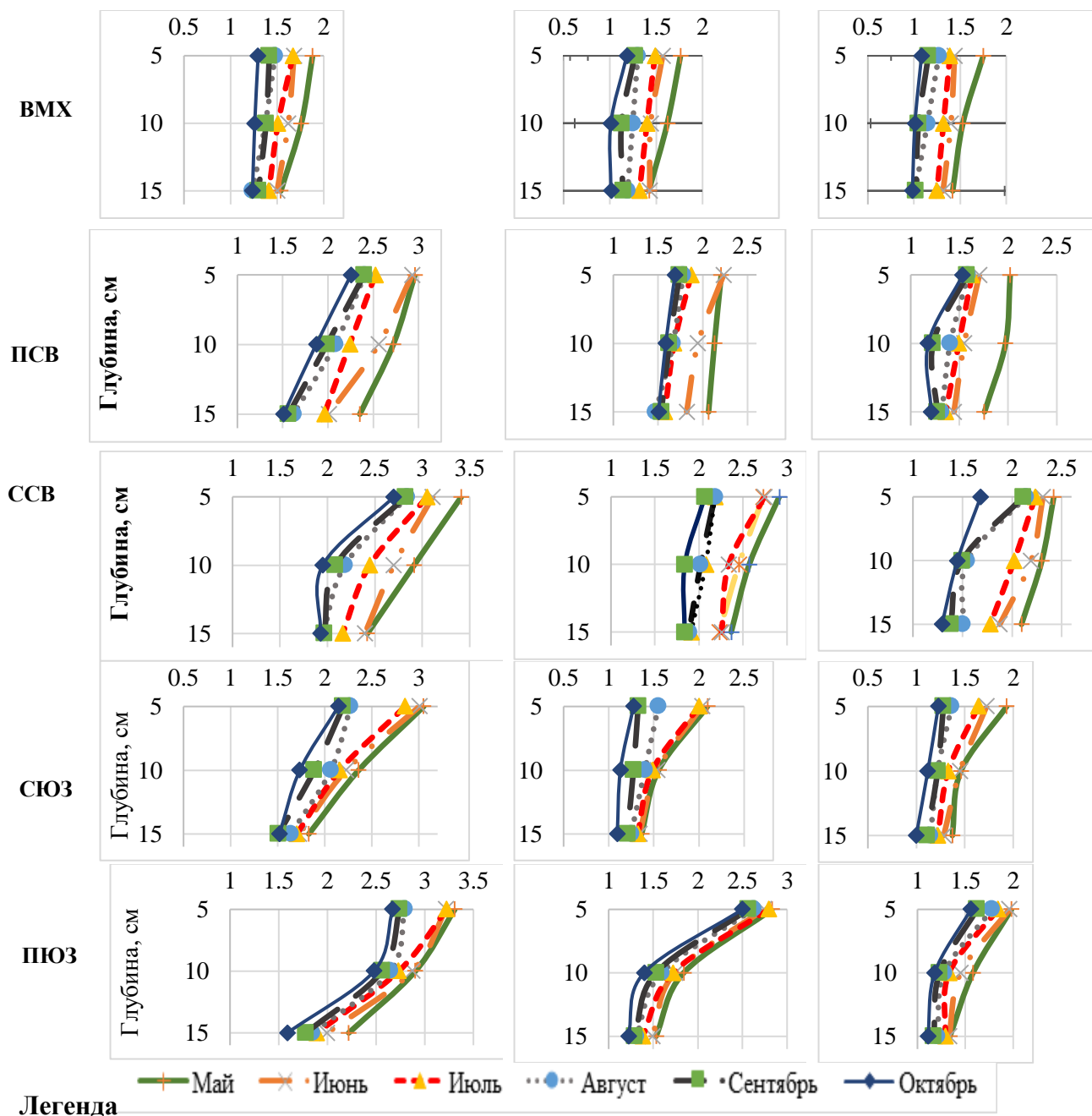


Рисунок 5.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв с увлечением рекреационной нагрузки

Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются максимальными по сезону запасами органического углерода в верхних горизонтах минерального профиля исследуемых дерново-подзолистых почв (табл. 5.1). Последующий тренд постепенной некомпенсируемой минерализации, как правило, продолжается до августа или сентября, и затем сменяется, в различной степени выраженным, осенним накоплением в них органического углерода.

Таблица 5.1. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на запасы органического углерода (C_{org}, кг м⁻²) в верхней части (0–15 см) профиля дерново-подзолистых почв ЛОД

| КУМ | Сезонная динамика по месяцам запасов C _{org} , кг м ⁻² | | | | | | | Сезонное изменение ΔC _{org} (кг м ⁻²) |
|---|--|------|------|------|------|------|------|--|
| | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | |
| Минимальный уровень рекреационной нагрузки | | | | | | | | |
| ВМХ | 2.07 | 1.88 | 1.77 | 1.71 | 1.67 | 1.57 | 1.59 | 0.50 |
| ССВ | 2.73 | 2.73 | 2.55 | 2.35 | 2.16 | 2.43 | 2.78 | 0.38 |
| ПСВ | 2.91 | 2.83 | 2.67 | 2.55 | 2.39 | 2.45 | 3.11 | 0.46 |
| СЮЗ | 3.29 | 3.27 | 3.25 | 3.17 | 2.99 | 3 | 2.98 | 0.30 |
| ПЮЗ | 3.52 | 3.5 | 3.49 | 3.42 | 3.27 | 3.15 | 3.17 | 0.37 |
| Средний уровень рекреационной нагрузки | | | | | | | | |
| ВМХ | 2.01 | 1.83 | 1.75 | 1.69 | 1.65 | 1.36 | 1.41 | 0.65 |
| ССВ | 2.45 | 2.45 | 2.22 | 2.01 | 2 | 2 | 2.22 | 0.45 |
| ПСВ | 2.77 | 2.73 | 2.52 | 2.49 | 2.37 | 2.41 | 2.4 | 0.36 |
| СЮЗ | 2.68 | 2.65 | 2.54 | 2.45 | 2.31 | 1.82 | 1.84 | 0.86 |
| ПЮЗ | 3.11 | 2.71 | 2.66 | 2.65 | 2.64 | 2.69 | 2.72 | 0.42 |
| Сильный уровень рекреационной нагрузки | | | | | | | | |
| ВМХ | 2 | 1.75 | 1.71 | 1.63 | 1.57 | 1.25 | 1.33 | 0.75 |
| ССВ | 2.42 | 2.42 | 2.01 | 1.93 | 1.95 | 1.84 | 1.85 | 0.58 |
| ПСВ | 2.57 | 2.53 | 2.47 | 2.36 | 2.05 | 2.16 | 2.18 | 0.21 |
| СЮЗ | 2.46 | 2.44 | 2.42 | 2.41 | 2.23 | 1.62 | 1.64 | 0.84 |
| ПЮЗ | 2.61 | 2.45 | 2.45 | 2.43 | 2.42 | 2.49 | 2.51 | 0.19 |

Максимальными запасами органического углерода отличаются почвы с минимальным уровнем рекреационной нагрузки на более длинном слабо-вогнутом склоне юго-западной экспозиции (табл. 5.1) с устойчивым по сезону уровнем повышенного увлажнения. Для них же характерны наименьшие диапазоны сезонной динамики запасов углерода среди почв с минимальным уровнем нагрузки. Сезонная динамика запасов углерода сильнее выражена на вершине

моренного холма с минимальным запасом органического углерода и наиболее аэробными автоморфными условиями (табл. 5.1).

Среди сезонно изменяющихся лимитирующих экологических факторов почвенной эмиссии CO₂ наибольшую значимость показали влажность, температура верхних горизонтов почвы, запасы в них органического углерода и температура воздуха (рис. 5.2).

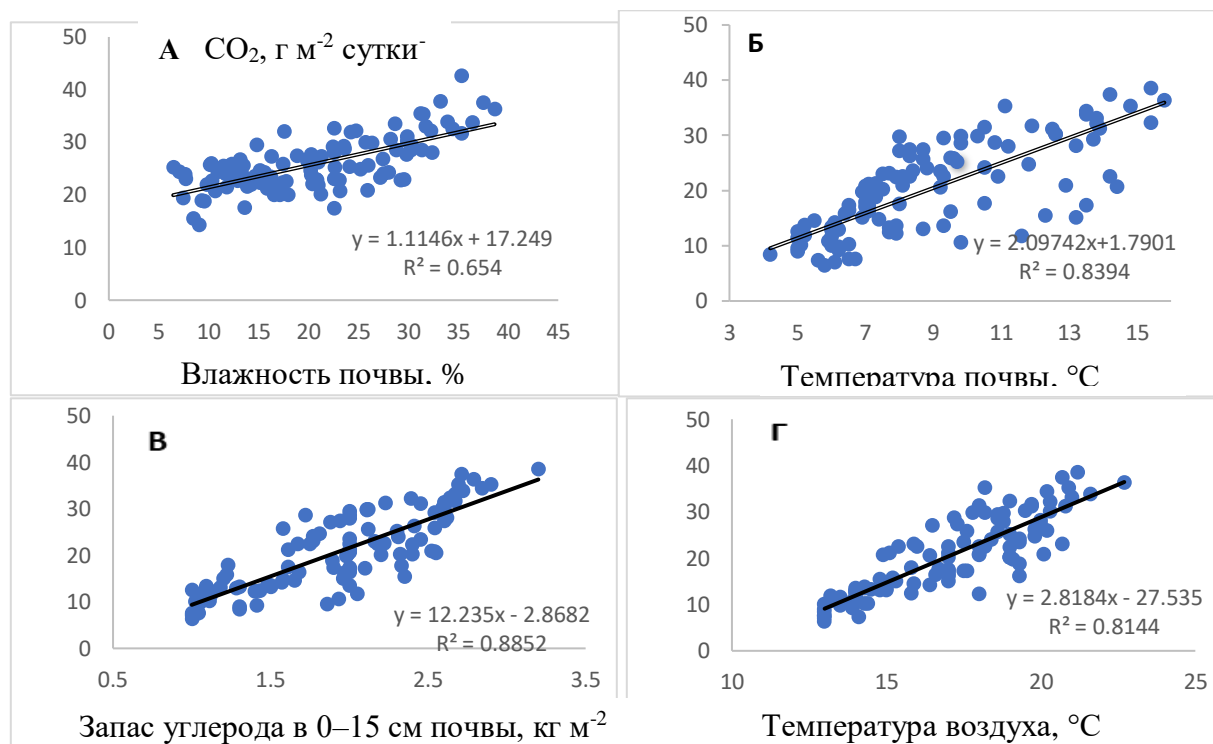


Рис. 5.2. Оценка влияния экологических факторов на почвенную эмиссию CO₂.

Статистическая достоверность влияния микроклиматических факторов на почвенную эмиссию CO₂ существенно возрастает при их дифференцированном анализе по положению почв в мезорельефе и сезонам года: коэффициенты корреляции почвенной эмиссии CO₂ с влажностью почвы при этом варьируют от 0,911 до 0,999 (табл. 5.2). Корреляционные зависимости почвенной эмиссии CO₂ от температуры почвы и воздуха значительно менее значимы и однородны, варьируя от 0,616 до 0,999 в первом случае и от 0,661 до 0,998 – во втором, с минимально достоверными зависимостями в осенний период с более контрастной динамикой погодных условий. Влияние почвенных запасов органического углерода также характеризуется устойчиво повышенной значимостью: с пространственно-временным варьированием сезонных коэффициентами корреляции от 0,746 до 0,969.

Таблица 5.2. Коэффициенты корреляции интенсивности почвенной эмиссии CO₂ на склоне северо-восточной экспозиции с лимитирующими экологическими факторами в сезоне 2021 года.

| Ключевой участок | Сезон | Влажность почвы | Температура почвы | Запас углерода в 0–15 см почвы | Температура воздуха |
|--|-------|-----------------|-------------------|--------------------------------|---------------------|
| Вершина моренного холма | Весна | 0.970** | 0.997** | 0.812* | 0.870** |
| | Лето | 0.983** | 0.924** | 0.942* | 0.970** |
| | Осень | 0.963** | 0.685* | 0.842* | 0.818** |
| Средняя часть северо-восточного склона | Весна | 0.952** | 0.791** | 0.746* | 0.977* |
| | Лето | 0.911** | 0.768* | 0.865* | 0.998** |
| | Осень | 0.997** | 0.616* | 0.969* | 0.925** |
| Подшва северо-восточного склона | Весна | 0.999** | 0.998** | 0.865* | 0.924** |
| | Лето | 0.999** | 0.999** | 0.865* | 0.951** |
| | Осень | 0.963** | 0.742* | 0.760* | 0.661* |

Примечание: * Корреляция значима (на уровне 0,05), ** Корреляция очень значима (на уровне 0,01).

Влияние уровня рекреационной нагрузки на качество исследуемых почв наиболее достоверно ($p < 0,01$) для подвижных форм элементов питания (P_2O_5 , K_2O , NH_4^+) и плотности сложения почв, которые определяют экологические функции среды обитания продуцентов, и для содержания гумуса и потоков CO₂, которые на прямую определяют регулирующую функцию почв по составу атмосферы (табл. 5.3).

Таблица 5.3. Влияние рекреационной нагрузки на диагностические параметры функционально экологического состояния дерново-подзолистых почв ЛОД

| Нагрузка | K ₂ O, мг/кг | P ₂ O ₅ , мг/кг | Гумус, % | pH (H ₂ O) | pH (KCl) | Влажность, % | NH ₄ ⁺ , мг/кг | NO ₃ ⁻ , мг/кг | CO ₂ , г м ⁻² в день | d, г/см ³ |
|-------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------|
| Минимальная | 81.2± 2.6 | 177,4± 2.9 | 2.24± 0.06 | 4,30± 0,05 | 3,77± 0,05 | 27,6± 0,2 | 25,6± 0,7 | 5,02± 0,28 | 28,4± 0,6 | 1,42± 0,03 |
| Средняя | 64.6± 1.9 | 145,2 ±4,0 | 1.82± 0.50 | 4,50± 0,05 | 4,00± 0,04 | 25,2± 0,1 | 20,3± 0,8 | 4,10± 0,22 | 24,3± 0,7 | 1,51± 0,04 |
| Сильная | 51.7± 1.9 | 104,2± 2.6 | 1.57± 0,37 | 4,80± 0,05 | 4,19± 0,04 | 24,9± 0,1 | 15,4± 0,6 | 3,2± 0,21 | 16,0± 0,5 | 1,66± 0,03 |
| Значение P | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,01 | <0,05 | <0,01 | <0,05 |
| Значимость | * | * | * | ** | ** | ** | * | ** | * | ** |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в весенне-летне-осенних сезонах 2021 и 2022 годов на зеркальных элементах двух представительных склоновых катен с различным уровнем рекреационной нагрузки в Северном округе Москвы мониторинговые наблюдения за сезонной динамикой ряда основных физических, физико-химических и химических диагностических показателей верхних горизонтов зональных для южнотаежных экосистем дерново-подзолистых почв показали их повышенную пространственно-временную изменчивость, в значительной мере определяемую склоновым мезорельефом (экспозиция и форма склона), уровнем рекреационной нагрузки (по выраженности неорганизованной тропинойной сети) и погодными условиями текущего сезона (годовой суммой осадков):

1. В условиях минимальной рекреационной нагрузки весной влажность гумусово-аккумулятивного горизонта в почве на подошве северо-восточного склона устойчиво в 1,8 раза выше, чем в почве на вершине моренного холма. Наблюдаемое летом качественное снижение влажности гумусово-аккумулятивного горизонта сопровождается минимизацией различий его влажности по склону: до 2% от почвы холма. Нижележащие горизонты более устойчивы к высыханию, при возрастании дифференциации по влажности верхних горизонтов дерново-подзолистой глееватой почвы на подошве склона до 1,8–2 раз. Сезонная динамика влажности почв с выраженной рекреационной нагрузкой близка фоновой, при их устойчиво более низкой влажности, с ее выраженным снижением уже в мае и заметным осенним увеличением только в октябре.

2. Плотность сложения большинства верхних горизонтов почв при среднем уровне рекреационной нагрузки на 0,1–0,2 г/см³ выше их плотности при минимальной нагрузке. При максимальной плотности в наиболее сухой почве вершины холма наблюдается ее «пошаговое» снижение примерно на 0,05 г/см³ на средней части склона и его подошве. Возможно, это связано с более активным разуплотнением верхних горизонтов в циклах увлажнения-набухания, промерзания-оттаивания в условиях их повышенной влажности. При этом почвы на склоне, как правило, сильнее рекреационно уплотняются (на 0,25–0,3 г/см³) – на фоне максимальной сезонной динамики влажности.

3. Статистически достоверное снижение майского запаса почвенной влаги при сильном уровне рекреационной нагрузки на подошве склона и ее сентябрьского запаса уже при среднем уровне нагрузки позволяют уточнить роль разных элементов лесных урбоэкосистем в регулировании водного баланса территории с учетом пониженной способности уплотненных за лето почв к накоплению влаги осенних осадков.

4. Весенние месяцы отличаются максимальным по сезону уровнем актуальной кислотности почв. Летний тренд частичной нейтрализации сильно кислой реакции среды в конце августа или сентябре сменяется ее осенним подкислением. Сезонные изменения обменной кислотности могут составлять 0,6–0,7 рН. Преобладающие по площади почвы склонов характеризуются устойчиво более кислой реакцией среды, с максимальной кислотностью на подошве склонов. Реакция среды почв на северо-восточном склоне устойчиво кислее их аналогов на юго-западном склоне. Различия максимально выражены на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой и частично сглаживаются при возрастании нагрузки. Различия обменной кислотности почв по элементам рельефа могут достигать 0,8–0,9 рН, по уровню нагрузки – 0,6–0,7 рН. При повышенном годовом количестве осадков почвы на вершине холма отличаются общим понижением актуальной кислотности, на северо-восточном склоне – подкислением.

5. Весной наблюдается максимальное по сезону содержание обменного аммония и нитратов. Летний тренд постепенного обеднения ими верхних горизонтов почв в августе/сентябре сменяется их обогащением, максимально выраженным в почвах с минимальной нагрузкой. При возрастании рекреационной нагрузки наблюдается общий тренд очень значительного (от 1,4- до 4-кратного), но не всегда статистически достоверного снижения содержания аммония и нитратов. Содержание обменного аммония устойчиво ниже в почвах склонов. При этом в почвах слабоогнутого юго-западного склона оно устойчиво и, как правило, статистически достоверно выше их аналогов на более коротком и прямом северо-восточном склоне, с максимальными различиями на их подошве.

6. Пространственное распределение нитратов четко дифференцировано по экспозиции склона. На северо-восточном склоне их содержание, в большинстве случаев, устойчиво снижается вниз по склону: вплоть до 2-кратного сокращения

на подошве. В почвах юго-западного склона наблюдается обратный тренд повышения содержания нитратов по склону. В мае-июле 2021 года с повышенным количеством осадков содержание нитратов устойчиво на 15–20% ниже их содержания в 2022 году с близким к среднемноголетнему количеством осадков. В августе-сентябре, наоборот, наблюдается более низкое содержание нитратов в 2022 году – при очень низком количестве осадков в августе–начале сентября.

7. Весной наблюдается максимальное по сезону содержание подвижных форм фосфора и калия. Летний тренд постепенного обеднения ими почв продолжается до октября. В большинстве случаев статистически достоверно значительное снижение содержания подвижных форм фосфора и калия при возрастании рекреационной нагрузки. Различия в содержании подвижного фосфора по элементам рельефа статистически не всегда достоверны – при общем устойчивом тренде обогащения им почв на склоне и максимальном содержании в почвах на подошве склонов с минимальной нагрузкой. Почвы прямого северо-восточного склона, как правило, богаче подвижными формами фосфора и калия их аналогов на слабовогнутом юго-западном склоне с повышенной влажностью.

8. Летние максимумы почвенных потоков CO_2 достигают 35–40 г/м² в сутки, а к концу октября падают до 3–5 раз. Средняя интенсивность почвенной эмиссии CO_2 увеличивается вниз по склону на 5–7 г/м² в сутки и снижается с возрастанием рекреационной нагрузки, в среднем, на 5–10 г/м² в сутки, а на участках с сильной рекреационной нагрузкой – на 5–17 г/м² в сутки. Максимальные различия с фоном отмечаются для почв подошвы склона и летнего периода наблюдений. Среди сезонно изменяющихся лимитирующих экологических факторов почвенной эмиссии CO_2 наибольшую значимость показали влажность, температура верхних горизонтов почвы, запасы в них органического углерода и температура воздуха. Статистическая достоверность влияния климатических факторов на почвенную эмиссию CO_2 существенно возрастает при их дифференцированном анализе по положению почв в рельефе и сезонам года: коэффициенты корреляции почвенной эмиссии CO_2 с влажностью почвы при этом варьируют от 0,911 до 0,999.

9. Содержание гумуса в почвах склоновых катен постепенно увеличивается от вершины пологого холма к подошве склона – до 1,5-кратного. По сезону оно постепенно снижается на 0,5–0,7% от апрельского максимума к минимуму в

августе. При возрастании рекреационной нагрузки наблюдается поэтапное снижение содержания гумуса на 10–20 относительных процентов. Последовательное увеличение диапазона сезонной динамики содержания гумуса верхних горизонтов почв при возрастании рекреационной нагрузки хорошо согласуется с сезонной динамикой почвенных потоков CO₂ в атмосферу и свидетельствует о значительном снижении при этом устойчивости их функционирования. Максимальное сезонное снижение почвенных запасов органического углерода отмечается в наименее увлажненных и лучше прогреваемых почвах моренного холма: от 0,5 кг м⁻² на участке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки до 0,75 кг м⁻² – при сильном уровне нагрузки (соответственно, от 25% до 37,5% относительно их апрельского запаса органического углерода).

10. Установленные зависимости сезонной динамики основных диагностических показателей функционально-экологического состояния дерново-подзолистых почв от их положения на склоне и рекреационной нагрузки будут полезны для планирования и экологической регламентации пространственно дифференцированной рекреационной нагрузки в условиях различных частей городского склонового ландшафта даже при незначительной крутизне склонов (до 3-4°) и наличии близкого к природным условиям растительного покрова. Повышенная чувствительность к рекреационной нагрузке сезонной динамики влажности и плотности сложения верхних горизонтов дерново-подзолистых глееватых почв на подошве склона обуславливает необходимость более четкой экологической регламентации допустимого для таких почв уровня рекреационной нагрузки – особенно в наиболее влажные весенние месяцы.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Журналы из списка, рекомендованных ВАК:

1. Мелесе Соломон Мелаку. Сезонная динамика влажности и плотности дерново-подзолистых почв на склоновой катене ЛОД РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева при различных уровнях рекреационной нагрузки / Мелесе Соломон Мелаку, И.И. Васенев // АгроЭкоИнфо. – 2022. – Т 50, №2. – С. 14.

2. Васенев, И.И. Экологическая оценка сезонной динамики почвенных потоков CO₂ и содержания гумуса дерново-подзолистых почв на склоновой катене лесопарка при разных уровнях рекреационной нагрузки / И.И. Васенев, Мелесе

Соломон Мелаку, А.О. Малахов // АгроЭкоИнфо. – 2022. – №4. – С. 10

Публикации, цитируемые в базе Scopus:

3. Melese, S. M. Impact of overgrown plant deposit on physicochemical properties: sodpodzolic soils during the last 60 years in the Central State Biosphere Forest Reserve, Western European part of Russia / S.M. Melese, I.I. Vasenev // *Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure: Proceedings of Smart and Sustainable Cities 2020*. – Cham: Springer. – 2021. – P. 132-149.

Статьи в сборниках и тезисы:

4. Melaku, M.S. Modern concepts of ecosystem services in forest soils / M.S. Melaku, I.I. Vasenev // *Аграрная наука – 2022: материалы Всероссийской конференции молодых исследователей, Москва, 22–24 ноября 2022 года*. – Москва: РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022.

5. Melese, S.M. Assessment of reviewing forestry extension approach: its challenges and opportunities / S.M. Melese // *Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова, Москва, 06–08 июня 2022 года*. – Москва: РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. – Том 1. – С. 153–154.

6. Melese, S.M. Restoration of Biodiversity for degraded ecosystem / S.M. Melese, I.I. Vasenev // *Инновационный вектор развития аграрной науки*. – Москва: ООО "Русайнс", 2022. – С. 314–316.

7. Melese, S.M. The role of soil seed banks for rehabilitation of degraded land in a forest ecosystem / S.M. Melese, I.I. Vasenev // *Инновационный вектор развития аграрной науки*. – Москва: ООО "Русайнс", 2022. – С. 308-309.

8. Melese, S.M. Role of soil as a basic component of forest ecosystems / S.M. Melese // *Материалы Всероссийской научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова, Москва, 07–09 июня 2021 года*. – Москва: РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – Том 1. – С. 336–337.

9. Solomon, M.M. Influence of anthropogenic load on ecological functions and ecosystem services in the forest ecosystem / M.M. Solomon // *Материалы Всероссийской научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова, Москва, 07–09 июня 2021 года*. – Москва: РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – Том 1. – С. 439–441.

10. Vasenev I. Natural reforestation effect on soil organic carbon and CO₂ flux dynamics in southern taiga ecosystems with Albeluvisols / I. Vasenev, T. Komarova, S. Melese // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2020. – p. 13507.