

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ -  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»**

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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук, профессор  
Васенев Иван Иванович

Москва – 2023

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	5
<b>ГЛАВА 1. Обзор литературы: Функционально-экологическая оценка почв лесных экосистем с разным уровнем рекреационной нагрузки</b>	12
1.1. Роль почв как базового компонента лесных экосистем	12
1.2. Основные экологические функции лесных почв	15
1.3. Функционально-экологические особенности лесных почв в условиях южной тайги и Московского мегаполиса	19
1.4. Влияние рекреационной нагрузки на экологические функции и экосистемные сервисы лесных почв	22
1.5. Основные методы мониторинговых исследований лесных почв	27
1.6. Актуальные задачи исследования лесных почв с различным уровнем рекреационной нагрузки в условиях южнотаежной зоны и Московского мегаполиса	30
<b>ГЛАВА 2. Объекты и методы исследования</b>	34
2.1. Краткая характеристика района исследования	34
2.2. Основные объекты исследований	41
2.3. Методы исследований	45
<b>ГЛАВА 3. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на значения и динамику физических свойств исследуемых почв</b>	48
3.1. Изменение физических свойств почв на вершине выположенного моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки	48
3.2. Изменение физических свойств почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	50
3.3. Изменение физических свойств почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	52
3.4. Изменение физических свойств почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	55

3.5. Изменение физических свойств почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	57
3.6. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику влажности и плотности сложения исследуемых почв	59
<b>ГЛАВА 4. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на физико-химические и химические свойства исследуемых почв</b>	<b>72</b>
4.1. Изменение физико-химических и химических свойств почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки	72
4.2. Изменение физико-химических и химических свойств почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	78
4.3. Изменение физико-химических и химических свойств почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	83
4.4. Изменение физико-химических и химических свойств почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	89
4.5. Изменение физико-химических и химических свойств почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки	94
4.6. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику физико-химических и химических свойств исследуемых почв	100
<b>ГЛАВА 5. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику содержания гумуса и почвенных потоков CO<sub>2</sub></b>	<b>124</b>
5.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO <sub>2</sub> на вершине выположенного моренного холма с увлечением рекреационной нагрузки	124

5.2. Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO <sub>2</sub> на средней части склона северо-восточной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки	127
5.3. Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO <sub>2</sub> на подошве склона северо-восточной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки	130
5.4. Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO <sub>2</sub> на средней части склона юго-западной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки	131
5.5. Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO <sub>2</sub> на подошве склона юго-западной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки	135
5.6. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику запасов органического углерода и эмиссионных потоков CO <sub>2</sub> исследуемых почв	138
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	146
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	151

## 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; Голубева, Жаринов, 2011; Rusterholz et al., 2011; Vasenev et al., 2019).

В той или иной степени измененные и контролируемые человеком лесные экосистемы, как правило, формируют природоподобный каркас городов высоких и средних широт, а уровень их текущего функционирования, в значительной мере, определяется экологическим состоянием почвенного покрова и выполняемыми им экологическими функциями (Abera, Wolde-Meskel, 2013; Yimer, 2015; Vasenev I.I., 2015; Кудреватых и др., 2021). Под экологическими функциями почв понимается совокупность биологических, химических и физических процессов, которые поддерживают целостность и функционирование природных и антропогенно измененных наземных экосистем (Добровольский, Никитин, 1990; Arnold, 1994; Arnold, Eswaran, 2002; Добровольский и др., 2003; 2011; Хазиев, 2011; Trautvain et al., 2020).

Почвы лесных экосистем выполняют широкий спектр экосистемных сервисов и экологических функций (Добровольский, Никитин, 1990; Заварзин, 2001; Добровольский, 2007; Васенев, 2008; Ведрова, Мухортова, 2014; Vasenev, 2015; Vasenev et al., 2018; Vasenev et al., 2019), среди которых наиболее значимы функции регулирования водного режима и состава атмосферного воздуха, депонирования углерода и элементов питания, иммобилизации загрязнителей и устойчивости к рекреационной нагрузке, что особенно актуально для лесных экосистем природоохранного каркаса Москвы. Одной из главных задач современной экологии стало поддержание

благоприятных условий окружающей среды и стабильного функционирования почв при наличии повышенной антропогенной и рекреационной нагрузки на городские экосистемы (Строганова и др., 1997; 1998; Добровольский и др., 2003; 2012; Савич и др., 2003; Васенев и др., 2018; Vasenev et al., 2020).

Серьезной экологической проблемой мегаполисов и крупных городов России остается высокий уровень рекреационной нагрузки на их природную среду, включая почвенный покров лесного каркаса городов (Мишвелов и др., 2015; Яшин и др., 2018; Неведров и др., 2021). 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 (Karpachevskii и др., 1996; Мозолевская и др., 1997; Мозолевская, 1998; Васенев и др., 2007; Рагимов и др., 2014; Vasenev et al., 2017; 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 исследования 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  $\text{CO}_2$  исследуемых дерново-подзолистых почв.

5. Сравнительная оценка условиях 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 исследований.** 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 А1, А1А2 и А2 в 2,3–2,8 раза ниже весенних. Запасы влаги в верхних горизонтах почв значительно уменьшаются с увеличением рекреационной нагрузки и связанной с этим плотности сложения почв.

В течение вегетационного периода наблюдается общая тенденция значительного снижения содержания подвижного фосфора: в среднем – на 20%. По мере увеличения рекреационной нагрузки примерно на 30% снижается содержание подвижного калия.

Для содержания гумуса в верхних горизонтах (А1–А1А2–А2) 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 CO<sub>2</sub> достигаются летом (35–42 г/м<sup>2</sup> 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 среднегодовым 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 среднегодовых значений.

**Практическая значимость.** Исследования проводились в рамках реализации комплексной программы фоновый мониторинг окружающей среды на Лесной Опытной Даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 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 и локальных мониторинговых почвенно-экологических исследований, 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 м<sup>2</sup>), расположенных на 5 элементах рельефа. На данных площадках оценивали состояние напочвенной растительности и исследовали сезонную динамику диагностических показателей мониторинга верхних горизонтов почв А1 – А1А2 – А2 с отбором образцов по глубинам 0–5 см, 5–10 см, 10–15 см. Почвенная эмиссия СО<sub>2</sub> (в г/м<sup>2</sup> в сутки) рассчитывалась с использованием уравнения идеального газа на основе данных по скорости увеличения концентрации СО<sub>2</sub> 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 сглаженных 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 СО<sub>2</sub> – 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 СО<sub>2</sub>, 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.

**Апробация работы.** 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).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в т.ч. 2 работы в журналах, рекомендуемых ВАК по специальности «экология», и 1 – в материалах конференции, цитируемых в Scopus. Ещё 1 статья принята к опубликованию в материалах 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. Основной материал изложен на 149 страницах машинописного текста, включая 27 таблиц и 59 рисунков. Список литературы состоит из 210 источников, в том числе 73 англоязычный.

**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 также всем сотрудникам, аспирантам и студентам кафедры экологии и лаборатории агроэкологического мониторинга, моделирования и прогнозирования экосистем Российского государственного аграрного университета – Московской государственной сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева, которые помогали в проведении полевых и лабораторных исследований.

# ГЛАВА 1. Обзор литературы: Функционально-экологическая оценка почв лесных экосистем с разным уровнем рекреационной нагрузки

## 1.1 Роль почв как базового компонента лесных экосистем

Почва является центральным звеном во взаимодействии геологических и биологических циклов вещества в биосфере, служит средой обитания для живых организмов, обеспечивает трансформацию и утилизацию продуктов жизнедеятельности растений и других живых организмов (Rastogi, 2002; Куликова и др., 2007; Гольдберг и др., 2008; Околелова и др., 2016; Зинковская, 2016). В целом, биоразнообразие и устойчивость функционирования наземных экосистем суши во многом определяется разнообразием почв, их экологическими функциями (рис. 1.1.1) и экосистемными сервисами (Васенев, Торгульян, 1895; Владимиров, 1999; Rozhkov, Karpachevskii, 2006; Вернадский, 2007; Matveyeva, Chernov, 2019; Хайриддинов, 2019; Walkiewicz et al., 2021).

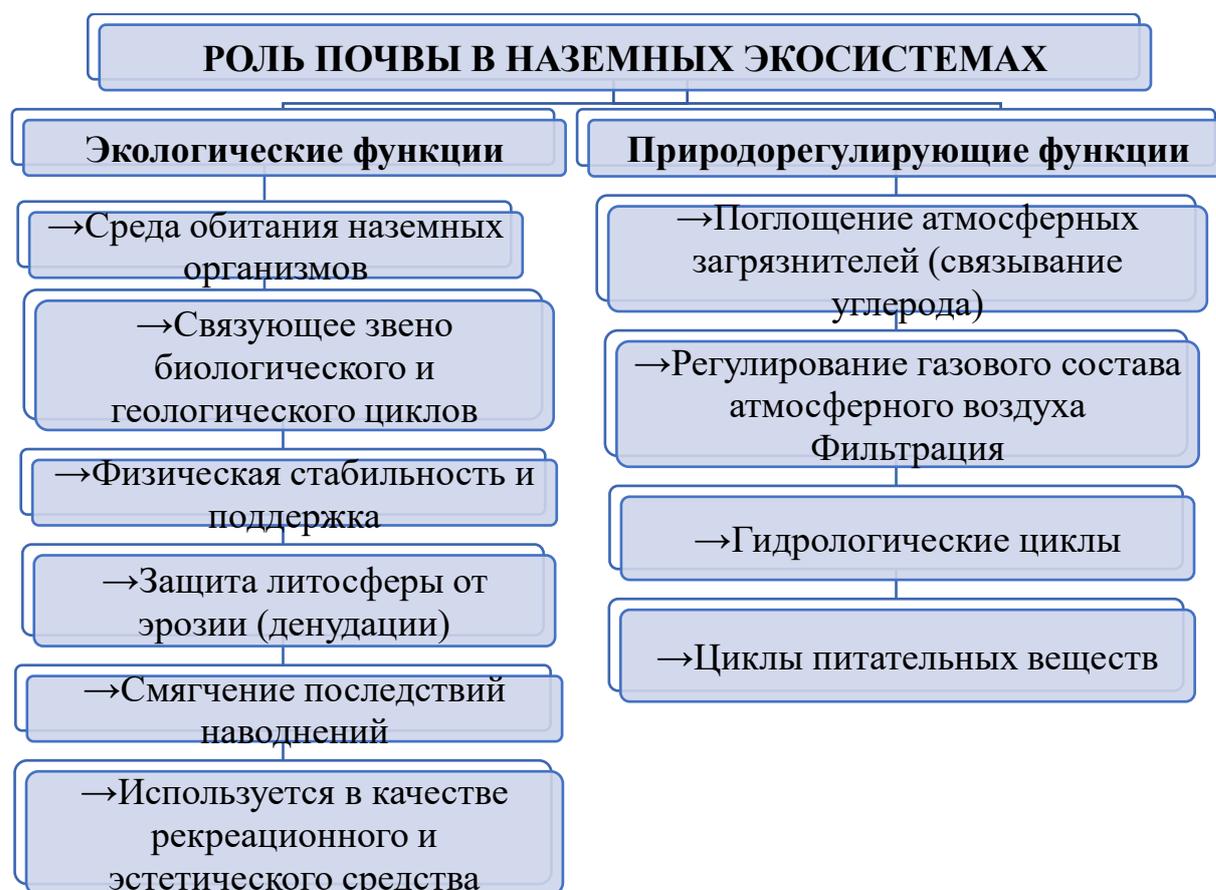


Рисунок 1.1.1. Роль почвы как базового компонента наземных экосистем (по материалам Г.В. Добровольского и Е.Д. Никитина (1986, 1990)).

Экологические функции и экосистемные сервисы почв отражают способность почвы удовлетворять потребность растений в питательных веществах, 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; 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; Führer, 2000; Васенев, Раскатова, 2009; Добровольский, 2013; Рахимов и др., 2014; Yimer, 2015).

Почва являются одной из самых биологически разнообразных сред обитания, охватывающей около 25% глобального биоразнообразия с точки зрения видов (Rozhkov & Karpachevskii, 2006; Хомяков, 2020). Почвенная биота играет важную роль в определении физико-химических свойств почвы. В экологически благоприятных условиях лесных экосистем она формирует зернистую структуру почвы с прочной агрегацией почвенных частиц, предотвращая быстрое вымывание водорастворимых элементов питания для растений, улучшает микробиологическую активность почвы и способствует лучшему развитию корневой системы следующих поколений растений в верхних горизонтах почвы (Васенев, Таргульян, 1995; Li et al., 2004; Куликова и др., 2007; Девятова, Крамарева, 2014; Бахмет, 2015; Брындина и др., 2022).

Важность сохранения надлежащего выполнения лесными почвами своих экологических функций и экосистемных «услуг» определяется сложной и многогранной ролью, которую они играют в поддержании устойчивого

экологического состояния и функционирования лесных экосистем и биосферы в целом (Arnold, 1994; Kimmins et al., 2004; Blum, 2005; Добровольский, 2004; Денисов и др., 2008; Мишвелов, Гранкина, 2015; Melese et al., 2021).

Один грамм почвы может содержать до 6000 различных бактериальных геномов, несколько метров грибковых гифов и широкий спектр протистов, нематод, энхитреид или клещей в лесной экосистеме (Юницкий и др., 2020). Благодаря своей деятельности почвенные организмы обеспечивают ключевые функции почвы и вносят вклад во многие экосистемные услуги. В среднем за 1 час почва потребляет 1000–4000 л/га кислорода и выделяет примерно такое же количество углекислого газа (Хазиев, 2011; Osman, Osman, 2013). По мнению В.Н. Кудеярова и И.Н. Кургановой (2005), сбалансированная почвенная эмиссия углекислого газа обеспечивает нормальное протекание фотосинтеза в биосфере, поскольку более половины  $\text{CO}_2$ , используемого растениями в этом процессе, поступает в приземный слой воздуха из почвы.

В почве содержится примерно в два раза больше углерода, чем в атмосфере. Многие ученые полагают, что около 90% атмосферного углерода имеет почвенное происхождение. Таким образом, благодаря живым организмам в почве и фотосинтезу поддерживается относительно постоянный состав приземный слоя воздуха, а через него и всей атмосферы (Добровольский, 2012; Ведрова, Мухортова и др., 2014; Кароль, Киселев, 2013; Овсянников, 2022).

Глобальные изменения климата актуализируют мониторинговые исследования экологических функций лесных почв в условиях различной антропогенной нагрузки с целенаправленным вниманием на регионально-типологические закономерности пространственного варьирования и сезонной динамики почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в условиях быстро растущих по площади урбоэкосистем таежной зоны России, традиционно рассматриваемой в качестве одного из основных продуцентов кислорода для земной атмосферы и регуляторов устойчивого функционирования биосферы (Апарин, 2006; Добровольский и др., 2007; Базилевич, Титлянова, 2008; Букварева, Алещенко, 2010; Лукина и др., 2010; 2020; Столбовой, 2022; Васенев и др., 2022).

## 1.2 Основные экологические функции лесных почв

Лесные экосистемы являются важными регулируемыми компонентами биосферы, которые поддерживают качество окружающей среды локальных, региональных и глобальной экологической системы (Карпачевский, 1977; Мишвелов и Гранкина, 2015; Васенев и др., 2020). В здоровом природном состоянии они успешно регулируют многие геохимические, биологические и гидрологические циклы почвы и предоставляемые ими услуги (Рамазанова и Жумабек, 2016; Попова, 2021).

Они стабилизируют интенсивность таяния снега и уровень грунтовых вод, приземный состав атмосферы и скорость ветра, сохраняют почвенную биоту и богатый напочвенный растительный покров под пологом неморального южнотаежного древостоя (Карпачевский, 1977; Скворцова и др., 1983; Васенев, 2008; Трофимов и др., 2010; Даденко и др., 2022). Согласно «Стратегии защиты почв Европейской комиссии» (2012), основная роль почвы заключается в контроле естественных циклов воды, воздуха, органических и минеральных веществ и в поддержании их таким образом, чтобы они способствовали экологическому функционированию.

Почва как базовый компонент биогеоценоза играет решающую роль в функционировании лесных экосистем, регулируя водный баланс и такие важные экосистемные процессы, как накопление и сезонную динамику органических веществ и элементов питания, разложение растительного опада и отпада, корневых остатков. Ненарушенные природные почвы дают деревьям возможность укореняться, своевременно получать влагу и питательные вещества, играют важную роль в регулировании водного режима и, в целом, микроклимата лесных ценозов (Карпачевский, 1977; Карпачевский и др., 2007; Зубкова и др., 2013; Коломыц, Шарая, 2015;).

Ненарушенные лесные почвы со зрелым профилем и устойчивым набором генетических горизонтов обладают способностью длительно поддерживать сбалансированное функционирование сформированных лесных

экосистем в условиях умеренной антропогенной нагрузки, учитывающей зональные и ландшафтно-геоморфологические особенности конкретных лесных участков (Башкин и др., 1993; Бахмет, 2015; Bossio et al., 2020; Столбовой, 2022) и их потенциал в сохранении основных экологических функций.

Из предложенных в обобщающих работах Г.В. Добровольского (2004; 2012) и А.А. Поповой (2021) экологических функций леса (рис. 1.2.1) и почв (рис. 1.2.2) особый интерес для устойчивого функционирования городских экосистем представляют их почвозащитная, рекреационная, водо- и климато-регулирующая, химические- физико-химические, атмосферные функции.



Рисунок 1.2.1. Экологические функции лесной экосистемы (по материалам Г.В. Добровольского (2004) и А.А. Поповой (2021)).

Современное состояние лесных почв является результатом как их естественных изменений в течение длительных периодов времени, так и антропогенных воздействий (Васенев, 2008; Трофимов, 2010; Умарова, 2021). В составе их органических веществ аккумулируются большие запасы элементов питания, которые при поэтапной минерализации в сукцессиях насекомых, грибов и микроорганизмами постепенно переходят в почвенный раствор и попадают в корневую систему растений.



Рисунок 1.2.2 Взаимосвязи между экологическими функциями почв (по материалам Добровольский и др., 1986, 2003, 2012)

Важнейшей экологической функцией почв является их роль связующего звена между биологическим и геологическим круговоротом веществ на земной поверхности. Аккумулируя в своем составе биофильные химические

элементы (азот, фосфор, калий, мезо- и микроэлементы), почвенный и растительный покров лесных экосистем используют эти элементы в биологическом круговороте в системе почва-растение и удерживают их.

Не менее существенное значение имеет глобальная функция взаимодействия почвенного покрова лесных экосистем с атмосферой (Карпачевский и др., 2007; Лукина и др., 2020). В глобальных изменениях природной среды и климата ведущая роль принадлежит циклу углерода, с которым связаны биогеохимические циклы остальных элементов, а через парниковый эффект и состояние атмосферы, обуславливающее изменение климата и продуктивности природных и искусственных экосистем (Заварзин и др., 2001). Цикл углерода в наземных системах определяется балансом между поглощением  $\text{CO}_2$  наземной растительностью (с формированием органического вещества) и выделением углекислого газа при дыхании почв.

По запасам органического углерода лесных почв можно прогнозировать потенциально возможную эмиссию  $\text{CO}_2$  из почв в атмосферу за счет изменения скоростей процессов гумификации и минерализации органических веществ под влиянием локального и регионального проявления глобальных изменений климата, с учетом других природных и антропогенных факторов (Карпачевский и др., 2007; Васенев и др., 2022). Физические характеристики лесных почв, регионально-типологические особенности их водного, температурного режима и латеральных процессов перераспределения энергии и веществ по склоновому рельефу определяет развитие и динамику этих потоков.

К наиболее важным экологическим функциям лесных почв таежных и производных от них городских лесных экосистем относятся регулирование гидрологического режима территории, минерального питания растений, углеродного баланса и состава приземного слоя атмосферы, водно-воздушного, кислотно-щелочного режима ризосферы и условий развития корневой системы доминирующего яруса древостоя, процессов разложения растительных остатков и сезонной динамики гумуса и почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  (Базилевич, Титлянова, 2008; Трофимов, 2010; Васенев и др., 2022).

### 1.3 Функционально-экологические особенности лесных почв в условиях южной тайги и Московского мегаполиса

К основным функционально-экологическим особенностям лесных почв в условиях южной тайги и Московского мегаполиса относится их повышенное меж- и внутри-биогеоценотическое разнообразие, выраженная сукцессионная и сезонная динамика основных диагностических показателей и режимов (Васенев, Таргульян, 1995; Stroganova, Prokofieva, 2001; Васенев, 2008; Трофимов, 2010; Vasenev et al., 2020).

В природных условиях это обеспечивает экологическую стабильность функционирования таежных ландшафтов и регионов в многолетнем масштабе (Беднова, 2003; Добровольский и др., 2003; Bremner et al., 2006; Васенев и др., 2007; Яшин и др., 2000; 2014; 2018). В городских условиях – требует повышенного внимания к анализу экологической буферности антропогенно измененных почв с учетом местных особенностей ландшафта, характера и интенсивности антропогенной нагрузки.

Даже равнинные районы таежной зоны отличаются значительным разнообразием климатических особенностей, растительных сообществ, почв и их биоты (Уланова, 2007; Yorkina et al., 2018; 2019; Toivio et al., 2017; Lednev et al., 2021; Nogovitsyn et al., 2023). Гумусово-аккумулятивный горизонт большинства дерново-подзолистых почв южно-таежных экосистем сильно варьирует по мощности, но, как правило, хорошо выражен под подстилкой типа муть или модер, имеет комковато-зернистую структуру и повышенное содержание доступных растениям форм элементов питания (Васенев и др., 2007; Kholodov et al., 2019).

Переходные аккумулятивно-элювиальные и подзолистые горизонты лесных почв часто сильно варьируют по своему гранулометрическому составу, структуре, плотности, цвету, влажности, содержанию гумуса и элементов питания (Васенев, Таргульян, 1995; Васенев, Раскатова, 2009; Яшин и др., 2014; Vasenev et al., 2020).

Подзолистые горизонты характеризуются низким, но варьирующим содержанием микроорганизмов, разрушающих целлюлозу, и микоризных грибов, поддерживающих структуру почвы (Allison et al., 2007; Брындина, 2022). Причем, неоднократно было показано, что с усилением подзолистого процесса количество микроорганизмов и их физиологическая активность существенно снижаются (Клевенская и др., 1970; Гаджиев, 1982; Никитина, Антоненко, 1982;).

Сильно варьирующие в лесных почвах южной тайги микробные сообщества влияют на внутрибиогеоценотическое варьирование содержания в их верхних горизонтах подвижных форм элементов питания и активность гидролаз, регулируя процессы микробного разложения растительного опада, деградации и минерализации органического вещества почв, их эмиссию CO<sub>2</sub> и рост растений (Широких, 2004; Bronson, et al., 2004; Renella et al., 2004; Ros et al., 2006; Krishnan, 2011; Бахмет, 2015; Liu et al., 2019; Qin et al., 2019).

С другой стороны, микробные сообщества лесных почв, в значительной мере, регулируются их химическими, физическими и физико-химическими свойствами, такими как содержание питательных веществ в почве, уровень влажности и pH (Kapusta et al., 2003). Увеличение содержания фосфора в дерново-подзолистой почве, как правило, существенно повышает общую биомассу почвенных микроорганизмов и их дыхание (Ilstedt, Singh, 2005; Liu, 2012; Turner et al., 2014). Возрастание содержания органического углерода и азота оказывает значительное влияние на структуру микробного сообщества лесных почв южной тайги (Allison et al., 2007).

Для большинства крупных городов умеренного пояса, в особенности – мегаполисов, лесные экосистемы являются основным природным каркасом, который помогает поддерживать экологически устойчивое функционирование городских территорий (Vasenev et al., 2017; 2018). Городские лесные массивы в наибольшей степени подвергаются влиянию «парникового эффекта» и «теплового острова» (Vasenev et al., 2019). Еще более важное значение имеет обратное влияние городского леса на локальный и региональный климат,

тесно связанное с физическими параметрами (плотность сложения, влажность и запасы влаги, температура) текущего экологического состояния лесных почв в условиях городских экосистем с различным положением в рельефе (Лукина и др., 2020; Vasenev et al., 2020) и разным уровнем антропогенной и, в частности, рекреационной, нагрузки (Мелесе и др., 2022).

Экологические особенности функционирования почв городских экосистем ярко выражены в крупнейшем в Европе Московском мегаполисе, с численностью населения более 12 млн человек и хорошо развитым лесным природоохранным каркасом, который занимает примерно пятую часть городской территории (Качан и др., 2007, Кульбачевский, 2012; Vasenev et al., 2017).

Лесные экосистемы играют большую роль в регулировании качества атмосферного воздуха Московского мегаполиса. Посредством формирования нисходящих потоков воздуха они способствуют очищению его от пыли. В процессе фотосинтеза здоровые растения различных ярусов лесных систем Москвы активно поглощают углекислый газ, выделяя за один ясный день до 200 кг кислорода на гектар (Касимов и др., 2004; Лесные экосистемы..., 2008; Мозолевская и др., 1997; Vasenev, Kuzyakov, 2018).

Лесные насаждения в городе не только насыщают воздух кислородом, но и играют большую роль в стабилизации температуры и влажности воздуха. Средняя температура воздуха в городских округах Москвы обычно выше температуры соседних районов Подмосковья на 1-2°C (ночью различия могут достигать 6-8°C), температура воздуха большинства городских лесных экосистем, как правило, на 1,5-2°C ниже температуры окружающей территории летом, и выше – зимой. Причем, радиус их действия составляет около 100 м.

Влажность воздуха в зоне влияния городских лесных экосистем зависит как от состава самих зеленых насаждений, так и экологического состояния их почвенного покрова: прежде всего – верхних почвенных горизонтов, которые определяют фильтрационную способность почв, их активный влагозапас и обеспечение ризосферы доступными растениям формами элементов питания, которые характеризуются повышенным варьированием в условиях природных

и антропогенно измененных лесных экосистем (Карпачевский, 1977; Васенев, Таргульян, 1995; Карпачевский и др., 2007; Денисов и др., 2008; Васенев, 2008; Яшин и др., 2018; Vasenev et al., 2020).

В случае удовлетворительного состояния почвенного покрова городских лесных экосистем влажность воздуха в зоне их влияния увеличивают на 5–7%, и значительно сглаживаются сезонные и суточные колебания влажности воздуха (Строганова и др., 1998; Добровольский, 1999) – за счет постепенной эвапотранспирации сохраняемого почвенным покровом активного влагозапаса (до 3 тыс. т влаги за вегетационный период).

Другая важнейшая функция городских лесных особо охраняемых природных территорий – поддержание биологического разнообразия и сохранение почвенного покрова уникальных природных ландшафтов, объектов природного и культурного наследия, фоновых участков для мониторинга и определения нарушенности городских экосистем в зонах интенсивного антропогенного воздействия (Арустамов, 2002; Тырлышкин, 2002; Яшин и др., 2014; Vasenev et al., 2020; Schoenholtz et al., 2020; Даденко и др., 2022).

#### **1.4 Влияние рекреационной нагрузки на экологические функции и экосистемные сервисы лесных почв**

Рекреационная нагрузка является одним из основных антропогенных факторов, значительно влияющих на растительность и почву и приводящих к ее изменению (Führer, 2000; Vasenev et al., 2017; Мелесе, Васенев, 2022). С развитием урбанизации рекреация, как наиболее активная и эффективная форма отдыха городского населения вне дома с целью восстановления здоровья и трудоспособности и, в то же время, очень перспективное направление экономики и инвестиций, сопровождается быстро растущим рекреационным воздействием человека на базовые компоненты окружающей среды – прежде всего, растения и почвы (Turner et al., 2014; Sujetovienė, Baranauskienė, 2016; Мишвелов, Гранкина, 2015; Vasenev et al., 2012; 2020).

Интенсивные рекреационные воздействия становятся одной из наиболее важных экологических проблем, в значительной мере связанных с облигатной необходимостью сохранения экологических функций почвенного покрова городских лесных экосистем – для обеспечения их устойчивого развития и функционирования (Казанская и др., 1977; Kimmins, 2004; Зубкова и др., 2013).

Урбанизация качественно трансформирует растительный и почвенный покров на территории города, что, в свою очередь, приводит к существенным изменениям основных параметров углеродного цикла (Kutiel et al., 1999; Svirejeva-Hopkins et al., 2004). Рекреационная нагрузка приводит к сокращению биологического разнообразия и ареалов сплошного растительного покрова (Kutiel et al., 1999; Sujetovienė, Baranauskienė, 2016; Yorkina et al., 2018). Результатом является повышенная пространственная неоднородность растительности и почвенного покрова, с очень сложным наложением различных видов неоднородности в городских лесных экосистемах и их разновневной изменчивостью во времени и в пространстве (Мосина, 2003; Pickett et al., 2008; Vasenev et al., 2014; 2020; Яшин и др., 2014; Vasenev et al., 2017).

Подстилка почв городских лиственных типов лесов, как правило, очень маломощная, поскольку лиственный опад разрушается быстрее и в большей степени в случае преобладания его над хвойным, повышении температуры, повышенном содержании минеральных элементов и выраженного рекреационного воздействия. Изменения в подстилке, которая является одним из важнейших компонентов лесного биогеоценоза, серьезно влияют на состояние и сохранность переходного органоминерального горизонта и, как правило, маломощных горизонтов гумусово-аккумулятивного субпрофиля большинства городских лесных почв умеренного пояса (Мосина, 2003; Васенев и др., 2007; Shanin et al., 2011; Osman, Osman, 2013; Vasenev et al., 2020).

К наиболее важным факторам, негативно влияющим на экологические функции и экосистемные сервисы почв в сохранившихся интенсивно урбанизированных районах городских лесных объектов, относятся выбросы промышленных предприятий и многочисленных транспортных средств,

активное использование противогололедных реагентов и интенсивная рекреационная нагрузка (Dovletyarova et al., 2016; Sujetovienė, Baranauskienė, 2016; Liu et al., 2019; 2022; Папельбу, 2020; Pata et al., 2023).

Из-за растущего рекреационного воздействия городские почвы и растительность сильно отличаются от естественных (Макаров, 2003; Chiesura, 2004; Лысиков, Судницына, 2008; Scalenghe, Marsan, 2009; Balzan, Debono, 2018; Yorkina et al., 2019). Почвенный покров городских лесных экосистем является определяющим компонентом их устойчивого функционирования, обеспечивая наземное биоразнообразие и являясь естественной средой обитания для большого числа мезо- и микроорганизмов.

В то же время почвы городских лесов и лесопарковых зон испытывают сильнейшее воздействие рекреации и урбанизации в целом из-за нарушения структуры и уплотнения их верхних горизонтов, накопления в них различных химических соединений и тяжелых металлов, изменения содержания гумуса, реакции среды и т.д. (Мосина, 2003; Авилова, 2015; Vasenev et al., 2020).

Это неизбежно сказывается на уровне выполняемых ими экосистемных сервисов обеспечения и регулирования среды обитания растений, животных и микроорганизмов (Dovletyarova et al., 2016), предотвращения эрозии почвы (Kunah et al., 2019), накопления углерода и азота (Raciti et al., 2011), ограничения эмиссии их соединений в атмосферу (Vasenev et al., 2017).

Процессы трансформации углерода и азота в городских лесных почвах различны по своей природе и зависят от их функционального использования и уровня рекреационной нагрузки (Downey et al., 2021; Васенев и др., 2022). Антропогенные изменения физических и химических свойств лесных почв городских экосистем оказывают выраженное влияние на их биологическую активность, и, следовательно, почвенную эмиссию CO<sub>2</sub>. Последствия урбанизации определяются не только объемом аэрогенного поступления техногенных выбросов от промышленности и транспортных средств, но и специфическими природными условиями антропогенно измененных городских ландшафтов (изменения бокового стока и локального уровня

грунтовых вод, повышенные температуры, их выраженные изменения по формам мезорельефа и т.д. – Курбатова, 2004; Лесные экосистемы... , 2008; Авилова и др., 2015; Yorkina et al., 2018; 2019; Vasenev et al., 2020).

Ведущую роль в рекреационном воздействии на почвы городских лесов играет организованно создаваемая и/или стихийно возникающая сеть дорог и тропинок, которая является основной причиной растущей фрагментации среды обитания (Trautvain et al., 2020; Liu et al., 2022). В условиях даже небольшого уклона дорожная сеть превращается в систему быстрого отвода ливневых вод, препятствуя их постепенному впитыванию в почву и провоцируя развитие эрозионных процессов.

Рекреационное уплотнение почвы приводит к ухудшению условий аэрации корневого слоя, резкому уменьшению пористости почвы, увеличению поверхностного стока и развитию эрозии под пологом леса, значимым некомпенсированным потерям органических соединений и минеральных элементов из верхних горизонтов почвы. Лишенные лесной подстилки и сильно уплотненные почвы в несколько раз глубже промерзают зимой, а летом – сильнее прогреваются, что существенно повышает сезонную динамику влажности и температуры их верхних горизонтов, создавая неблагоприятные условия для устойчивого функционирования корневых систем растений, почвенной мезофауны и микробиоты (Lull, Axley, 1958; Лысиков, Судницына, 2008; Катаров и др., 2012; Захаров, Кулик, 2017; Yorkina et al., 2018; 2019; Лукина и др., 2020).

Вытаптывание почвы на дорожках, аллеях и соседних с ними участках леса часто приводит к увеличению плотности сложения почвы до значений, критичных для развития и нормального функционирования корневой системы растений, и может привести к качественным изменениям в составе сообществ и качестве почвы (Мозолевская и др., 1998; Schoenholtz et al., 2000; Мосина, 2003; Мосина, Грачёва, 2007; Fornal-Pieniak et al., 2019).

Интенсивная рекреационная нагрузка, как правило, сопровождается качественными изменениями морфогенетических, физических, химических,

физико-химических и биологических свойств почв, что нередко приводит к необратимым процессам трансформации природной среды городских лесных экосистем, с частичной потерей жизненно важных экосистемных сервисов их почвенного покрова (Строганова и др., 1996; 1998; Vasenev et al., 2020; Неведров и др., 2021), что часто недооценивается в процессе экологического аудита и экспертизы градостроительных проектов и проектов организации территории (Gerasimov, 1977; 1979; Никитин, 2005; Нерешенные..., 2012; Huang, Hartemink, 2020; Ignatyeva et al., 2022).

Приоритеты поддержания экосистемных сервисов почв определяют необходимость сохранения оставшихся ненарушенных (без тропинок) или слабо нарушенных (почти без тропинок) участков лесных экосистем и восстановления некоторых из сильно нарушенных (Lugo, Gucinski, 2000; Васенев и др., 2022).

Масштабная урбанизация Москвы за последнее три десятка лет не могла не отразиться на состоянии древесных насаждений и городских лесов как Москвы, так и ближнего Подмосковья. Вследствие летнего перегрева и техногенных воздействий урбанизированной среды наблюдается массовое усыхание деревьев вдоль наиболее проблемных автомагистралей. Заметно ухудшилось состояние зонально типичных лесных пород региона – ели и береза, существенно ухудшилась их способность к самовозобновлению (Владимиров, 1999; Качан, 2007).

Под воздействием сложных сочетаний неблагоприятных антропогенных факторов микроклимат целых районов Москвы становится менее пригодным для нормального развития зональных пород деревьев, даже относительно более устойчивых к техногенным факторам. На фоне повышенной сезонной контрастности влажности почв небольших участков городских лесов в условиях повышенной рекреационной нагрузки с выраженной тропиночной сетью в засушливые сезоны листопад начинается уже в середине лета (Качан, 2007).

Сложные сочетания, высокое пространственное разнообразие и временная динамика всех рассмотренных экологических факторов определяет

повышенный интерес к системной организации и проведению разноплановых экологических исследований почвенного покрова лесных экосистем природоохранного каркаса Москвы, который является фоновым объектом для производственного экологического контроля и мониторинга при оценке воздействия на окружающую среду новых градостроительных проектов.

В этих условиях особое значение приобретает проведение комплексных мониторинговых исследований городских лесных экосистем, нацеленных на получение исчерпывающей качественной и количественной информации о функционально-экологическом состоянии их почвенного покрова при различных рекреационных нагрузках (Ryisin et al., 2004; Vasenev et al., 2020).

### **1.5 Основные методы мониторинговых исследований лесных почв**

Экологический мониторинг представляет собой систему специально организованных в пространстве и времени наблюдений за состоянием базовых компонентов окружающей природной среды, с оценкой их экологического состояния и функционального качества – с целью выработки рекомендаций по оптимизации их использования, охраны и, в случае необходимости, восстановления (Васенев и др., 2001; 2010; Гогмачадзе, 2010; Околелова, 2016).

Целью информационно-методического обеспечения экологического мониторинга является сбор, систематизация и оперативная интерпретация организованной во времени и пространстве информации об экологическом состоянии компонентов окружающей среды – с целью оценки на ее основе текущего состояния и прогнозирования тенденций изменений, имеющих прямое или косвенное значение для жизни, здоровья человека, развития и функционирования экосистем (Gerasimov, 1977; 1979; Israel, Tsiban, 1981; Никитина, 1982; Орлов, Василевская, 1994; Artiola et al., 2004; Васенев, Раскатова, 2009; Wong et al., 2009; Васенев и др., 2015; Ullo, Sinha, 2020).

При организации и проведении экологического мониторинга городских лесных экосистем особое внимание уделяется наблюдениям за экологическим состоянием почв как основы структурно-функциональной организации их

биогеохимических систем и наиболее стабильным компонентом лесных экосистем в целом. Информация об изменениях, происходящих в почвах, позволяет обоснованно оценить причины, степень и потенциал деградации лесных экосистем (Мозолевская и др., 1997; 1998; Полякова, 2000; Почечун, 2014; Шентерова, Рожкова, 2015; Vasenev et al., 2020; Попова, 2021).

При экологической оценке качества почв отдельно рассматриваются их продукционная способность почв и экологические функции (Doran & Parkin, 1997; Schoenholtz et al., 2000; Vasenev, 2015). Основные диагностические параметры функционально-экологического качества лесных почв оцениваются в соответствии с результатами предварительного анализа наиболее актуальных экологических рисков неблагоприятного развития проблемных экологических ситуаций с почвами конкретной городской экосистемы: загрязнения, подкисления, дегумификации, уплотнения, эрозии и т.д. (Carter, 2007; Balzan, Debono, 2018; Vasenev et al., 2020; Умарова, 2021).

Мониторинг лесных почв требует многократного повторного отбора и анализа почвенных проб в течение определенного периода времени. Более короткие временные интервалы отбора сокращают время, необходимое для обнаружения статистически достоверных изменений, но более длительные интервалы предоставляют больше потенциальных возможностей для анализа изменения почвы. В мониторинге почв часто рекомендуется использовать интервал повторной выборки в 5 лет, чтобы сбалансировать эти два фактора, но если мониторинг проводится для оценки конкретного драйвера, интервал следует устанавливать на основе ожидаемых характера или темпов изменений в этом драйвере (Скворцова и др., 1983; Кудеяров, Курганова, 2005; Mäkipää et al., 2008; Синькевич и др., 2009; Чекмарев и др., 2011; Васенев и др., 2022).

Для получения необходимой для статистического анализа повторности образцов отбор проб лесных почв часто проводится в случайно установленных точках на территории объекта исследования или по сетке – в достаточном количестве точек для характеристики пространственной изменчивости почв условно однородного участка исследования. Участок, расположенный в

пределах одного типа ландшафта по характеристикам уклона, положения на склоне холма, его формы, растительности, почвообразующих пород и условий увлажнения, как правило, имеет меньшую пространственную изменчивость, чем участок исследования, охватывающий более одного типа ландшафта, что упрощают задачу выявления статистически достоверных изменений почв во времени (Девятова, Крамарева, 2014; Vasenev et al., 2020; Дмитриев, 2023).

По мере увеличения размера исследуемых объектов, их внутренняя пространственная изменчивость также может увеличиваться из-за таких факторов, как варьирование растительности или изменения характеристик склона. Следовательно, размер исследуемых объектов должен зависеть от изменчивости рассматриваемой территории и ресурсов проекта, доступных для отбора проб и повторной выборки (Стольберг, 2000; Яшин и др., 2000; Смагин и др., 2006; Уланова, 2007; Федорец и др., 2009; Мамась и др., 2017).

Повторный отбор проб почв должен обеспечивать согласованность с фенологией растений, которая, вероятно, влияет на химический состав почвы. Стандартно рекомендуется избегать отбора проб во время или сразу после сильных дождей или когда почвы чрезвычайно влажные. Считается, что это лучше делать во второй половине вегетационного периода, когда почвы, как правило, бывают более сухими. Для мониторинга изменений почвы решающее значение имеет полное соблюдение принятой процедуры отбора их проб при проведении повторных и последующих исследований, с детальной фиксацией всех возможных отклонений (Rooney, Lowery, 2000; Селивановская, Медянская, 2011; Тембо и др., 2014; Dazzi, Pava, 2015; Экологический ..., 2015).

Отбор почвенных проб может проводиться по горизонтам – в том случае, если: (1) границы горизонтов могут быть четко определены в полевых условиях; и (2) горизонты достаточно мощные, чтобы быть отобранными без загрязнения материалом из выше или ниже лежащих горизонтов (Федорец и др., 2009; Селивановская, Медянская, 2011). Там, где эти критерии не выполняются, или, если отбор проб осуществляется не по всей мощности горизонта, может проводиться повторный отбор почвенных проб с

фиксированным интервалом глубины отбора (Carter, Gregorich, 2007; Почечун, 2014; Яшин и др., 2014; 2018). При любом отборе проб необходимо соблюдать особую осторожность, чтобы избежать смешивания почвы из поверхностного горизонта, богатого органикой, с самым верхним минеральным горизонтом (Теория и практика, 2006; 2007).

В связи с тем, что одной из основных проблем современной экологии является глобальное изменение климата из-за увеличения парниковых газов, среди которых доминирует углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), важным элементом экологического мониторинга городских лесных почв стало исследование почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  *in situ*.

К числу основных задач методического обеспечения экологического мониторинга почвенных потоков парниковых газов относятся: наблюдение за факторами антропогенной трансформации почв; наблюдение за состоянием природной среды и происходящими в ней процессами под влиянием факторов антропогенного воздействия; оценка фактического состояния природной среды; прогноз изменения состояния природной среды под влиянием факторов антропогенного и естественного воздействия; структура почвенного покрова (Визирская и др., 2012; IPCC, 2013). Методическое и приборное обеспечение для мониторинга парниковых газов активно развивается. Для измерения почвенных потоков  $\text{CO}_2$  активно используются напочвенные экспозиционные камеры и инфракрасный газоанализатор Li-Cor (Визирская и др., 2012; Tembo, Sarjanov, 2013; Тембо и др., 2014; Sarjanov et al., 2017; Vasenev et al., 2020).

### **1.5 Актуальные задачи исследования лесных почв с различным уровнем рекреационной нагрузки в условиях южнотаежной зоны и Московского мегаполиса**

Неравномерное освоение территории, обусловленное относительно суровым климатом, способствовало локальному сохранению почвенного покрова и экосистем в относительно слабо нарушенном состоянии на большей части территории России, включая отдельные районы южнотаежной зоны ее

европейской части (Тимофеев, 1965; Васенев, Таргульян, 1995; Горячкин, 1998; Трофимов, 2010; Рамазанова & Жумабек, 2016; Trautvain et al., 2020). За последние годы накоплен и систематизирован положительный опыт выработки и реализации стратегии сохранения биоразнообразия и экосистемных сервисов базовых компонентов лесных экосистем (Рамазанова & Жумабек, 2016; Bastian et al., 2015; Vukvareva et al., 2015).

На почвы лесных экосистем южнотаежной зоны Центральной России негативно влияет быстро растущая рекреационная нагрузка (Kondrashov, 2004; Куликова, 2007; Ведрова & Мухортова, 2014; Васенев и др., 2022). Массовый доступ населения к лесным зонам отдыха в пригородах и, особенно, городах на фоне выраженного дефицита повседневной экологической культуры нередко вызывает целый комплекс негативных воздействий на лесные биоценозы и почвы, что препятствует их нормальному функционированию с выполнением экологических функций и экосистемных сервисов (Rysin, 1987; Karpachevsky et al., 1996; Строганова и др., 1998; Stroganova, Prokofieva, 2001; Rysin et al., 2004; Мосина, Грачева, 2007).

Понимание долгосрочных экологических последствий современной, рекреационно измененной, сезонной динамики и функционирования почв южнотаежных городских лесов и лесопарковых зон имеет важное значение для оценки и предупреждения возможных негативных реакций и обратных связей лесных экосистем на рекреационную нагрузку (Рамазанова & Жумабек, 2016; Nogovitsyn et al., 2023).

Почвы южнотаежных лесов очень динамичны, даже при относительно стабильных климатических условиях. Сукцессионные стадия лесных почв и сообществ варьируют в широких пределах: от относительно стабильного динамического равновесия до ускоренных изменений после природных или антропогенных нарушений верхних горизонтов почв и/или сложившихся растительных сообществ и групп мезофауны (Скворцова и др., 1983; Васенев, Таргульян, 1995; Карпачевский, 1996; Васенев, 2008; Визирская и др., 2014; Гераськина и др., 2019).

Повышенная уязвимость южнотаежных лесных почв к рекреационным нагрузкам в городских экосистемах обуславливает необходимость их целевого экологического мониторинга и функционально-экологической оценки (Norra, Stuben, 2003; Васенев и др., 2007; Лойко, 2008; Rysin et al., 2010; Dovletyarova et al., 2016; Vasenev et al., 2020).

Лесные почвы в урбоэкосистемах с ярко выраженным рекреационным воздействием характеризуются чрезмерным уплотнением верхних горизонтов, неблагоприятными изменениями теплового и водно-воздушного режимов, физико-химических и химических свойств, корневой системы растений и интенсивность микробиологических процессов (Мосина, 2003; Liu et al., 2012; Bašić, 2013; Мишвелов, Гранкина, 2015; Dovletyarova et al., 2016).

Формирование густой сети рекреационно формируемых тропинок в лесных экосистемах Москвы сопровождается резким сокращением удельной площади проективного покров травянистых растений (до 5-6 раз), сильным и устойчивым увеличением плотности сложения поверхностного минерального горизонта (Мосина, 2003), что неизбежно оказывают негативное влияние на рост и архитектуру корневых систем деревьев и почвы в целом (Строганова и др., 1998), нарушает естественное функционирование корней, является причиной резкого угнетения или гибели растений.

В городских лесных почвах южнотаежной зоны при повышенных рекреационных нагрузках часто наблюдается нехарактерное для зональных дерново-подзолистых почв южной тайги формирование органо-минеральных горизонтов с большим количеством детрита, накопление грубого гумуса в маломощном гумусово-аккумулятивном горизонте, сезонное формирование «гумусовой занавески» и выраженное оглеение элювиального горизонта с образованием дополнительного количества железистых конкреций (Яшин и др., 2014). Вызванное нерегулируемой рекреацией устойчивое переуплотнение городских лесных почв южнотаежной зоны оказывает сильное негативное воздействие на лесные экосистемы в рекреационных ландшафтах (Мосина, 2003; Рамазанова & Жумабек, 2016; Мелесе, Васенев, 2022).

Старейшим ООПТ и лесным объектом многолетнего экологического мониторинга в северной части Москвы является Лесная Опытная Дача РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, созданная в 1865 году на территории Петровской земледельческой и лесной академии по проекту Варгаса де Бедермана (Тимофеев, 1965; Наумов и др., 2001; Наумов, 2009).

По результатам ранее проведенных наблюдений (Мосина, 2003; Васенев и др., 2007; Мосина, Грачёва, 2007; Васенев, Раскатова, 2009; Васенев и др., 2015; Vasenev et al., 2020) было установлено значимое влияние мезорельефа на базовые характеристики почв, их температурный режим и влажность, почвенную эмиссию CO<sub>2</sub>. В настоящий момент особый интерес представляет проведение комплексных почвенно-экологических исследований с анализом регионально-типологических закономерностей влияния малоконтрастных элементов мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику основных диагностических показателей почвенных режимов и функционально-экологического состояния верхних горизонтов почв.

## ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований

### 2.1 Краткая характеристика района исследования

Исследования проводились на представительных для природоохранного каркаса северной части Москвы объектах Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 2.1.1).

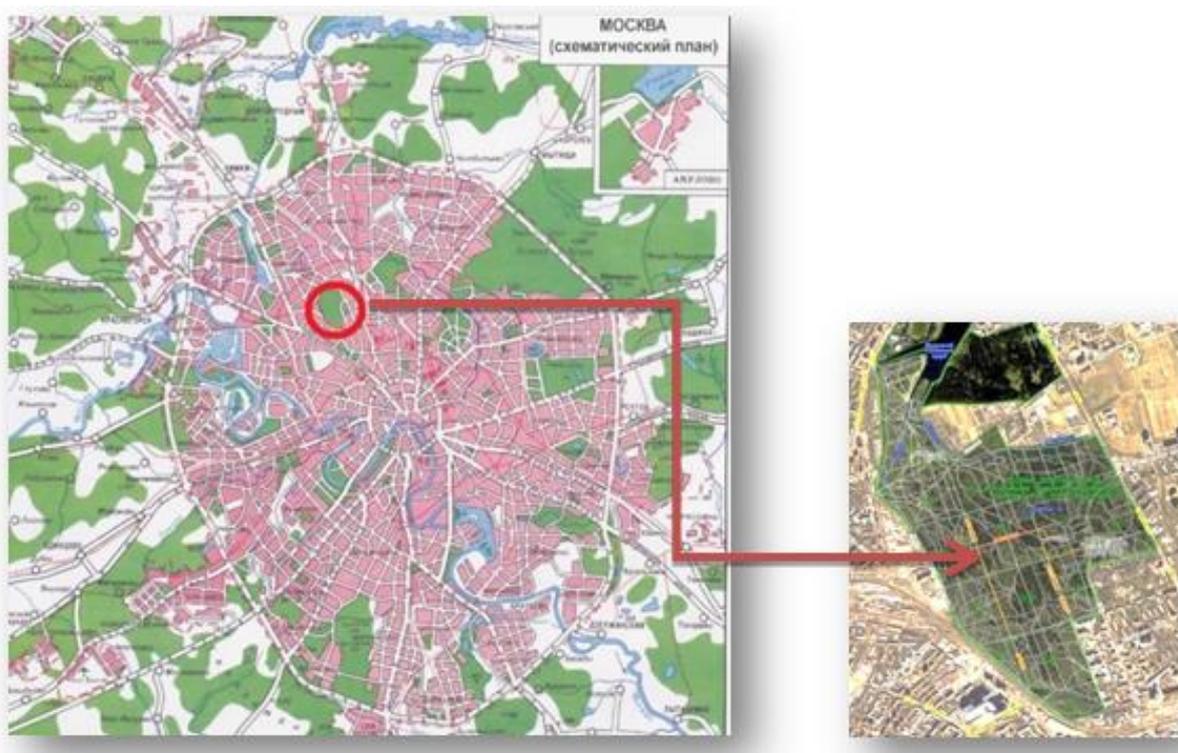


Рисунок 2.1.1. Расположение Лесной Опытной Дачи на территории Москвы

Лесная Опытная Дача (ЛОД) является одним из основных компонентов экологической инфраструктуры самого «зеленого» Тимирязевского района в Северном административном округе (САО) Москвы. САО характеризуется повышенной плотностью населения (30 тыс. чел./км<sup>2</sup> – пятое место среди административных округов Москвы) и относительно небольшой общей площадью зеленых насаждений (6,2 м<sup>2</sup> на одного жителя – один из самых низких показателей в Москве), что приводит к повышенному уровню рекреационной нагрузки на Лесную Опытную Дачу даже для общих условий Московского мегаполиса (Васенев и др., 2009; Наумов и др., 2009).

ЛОД – одна из старейших особо охраняемых природных территорий в Москве с древесными массивами естественного происхождения (Тимофеев, 1965; Наумов, 2009; Vasenev, 2018). Целостный лесной массив площадью около 230 га включает лесные насаждения как естественного, так и искусственного происхождения, представленные почти в равных пропорциях (52 : 48 площади лесов, соответственно); возраст древесной растительности составляет в среднем около 100 лет.

Лесная Опытная Дача входит в южнотаежную подзону смешанных хвойно-широколиственных лесов. Расположена на плоском водораздельном моренном холме (с максимальной высотой 175 м над уровнем моря) с пологим слабо вогнутым склоном на юго-запад и слегка пологим ровным коротким склоном на северо-восток. Разница абсолютных высот на территории ЛОД составляет около 15 м (Наумов, 2009). Общий рельеф района исследований представляет собой моренную равнину, которая является водоразделом между реками Москва и Яуза.

Территория Лесной Опытной Дачи сложена неоднородными четвертичными отложениями, под которыми залегают юрские глины. Типичной почвообразующей породой является красно-бурый моренный суглинок преимущественно тяжелосуглинистого состава, на подошве склонов к истокам реки Жабенки местами сменяемый супесчаными флювиогляциальными отложениями.

С поверхности они, как правило, перекрыты легкими пылевато-супесчаными суглинками мощностью до 40–50 см, что очень близко литологическому строению дерново-палево-подзолистых почв автоморфных еловых ландшафтов Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника (Васенев, Таргульян, 1995; Васенев, 2008; Яшин и др., 2017) – общепризнанного регионального фонового объекта для южнотаежных лесных экосистем Центрального региона России.

Лесная Опытная Дача относится к немногочисленным объектам природоохранной инфраструктуры Москвы, в которых во многом сохранился

естественный почвенный покров при преобладании ненарушенных или слабо рекреационно нарушенных дерново-подзолистых почв с различным уровнем развития органогенного (от муть до модер-мор), гумусово-аккумулятивного, подзолистого и переходных аккумулятивно-элювиальных и элювиально-иллювиальных горизонтов с разной степенью гидроморфизма и оглеения, которые в целом характерны для фоновых южно-таежных экосистем центра европейской части России (Васенев, Таргульян, 1995; Яшин и др., 2000; Савич и др., 2003, Мосина, 2003; Васенев, 2008; Наумов, 2009; Яшин и др., 2017).

Подобные почвы часто служат фоновыми объектами в системе экологического мониторинга городских почв Москвы, которые отличаются высокой пространственной неоднородностью (Строганова и др., 1997; 1998).

Значительная пространственная неоднородность почвенного покрова Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и преобладание в нем близких дерново-палево-подзолистым почвам Центрально-лесного биосферного заповедника ненарушенных дерново-подзолистых почв делают его интересным объектом фонового почвенно-экологического мониторинга Москвы и целенаправленных исследований регионально-типологических закономерностей пространственной изменчивости и сезонной динамики функционально-экологического состояния городских лесных почв в условиях различных форм склонового мезорельефа с разной рекреационной нагрузкой.

Важную роль в пространственной дифференциации функционирования почвенного покрова Лесной Опытной Дачи играет ее древесно-растительный покров (Наумов и др., 2001; Наумов, Бардачева, 2008; Васенев, Раскатова, 2009; Яшин и др., 2017). Преобладающей породой является сосна, которая доминирует на 34% лесопокрытой площади. Средний возраст древостоя составляет около 100 лет.

В сложных сосняках, травянистый покров которых преимущественно представлен зеленчуком (*Galeobdolon luteum*), земляникой (*Fragaria vesca*), снытью (*Aegopodium podagraria*) и малиной (*Rubus idaeus*) с общим

проективным покрытием в 20–30%, преобладают дерново-среднеподзолистых почв с различной мощностью дернового горизонта.

В вершинной части слабо выпуклого моренного холма и верхней части его склонов в древостое широко представлены широколиственные и мелколиственные породы с неморальным напочвенным покровом при преобладании слабодерново-палево-подзолистых почв с повышенной мощностью сложно организованной элювиальной части литологически двучленного профиля (Васенев и др., 2007).

Сильное влияние на качество напочвенного растительного покрова оказывает рекреационное воздействие. В зонах повышенной рекреационной нагрузки наблюдается значительная изреженность напочвенного покрова вследствие вытаптывания и большой ущерб территории наносит уплотнение почвы (по данным Л.В. Мосиной (2003) – вплоть до 1,5 г/см<sup>3</sup>), деградация почвенно-растительного покрова (Савич и др., 2003) и усиление глеевого процесса (Наумов и др., 2001).

По многолетним данным расположенной в непосредственной близости от ЛОД метеостанции имени В.А. Михельсона (табл.2.1.1), средняя минимальная за месяц температура воздуха приходится на январь и составляет в осреднении за последние 70 лет – 8,2°C, за 2011-2015 гг. – – 7,2°C, за 2012-2022 гг. – – 6,7°C; средняя максимальная за месяц температура воздуха приходится на июль и составляет в осреднении за последние 70 лет 18,7°C, за 2011-2015 гг. – 20,7°C, за 2012-2022 гг. – 19,7°C, что ярко иллюстрирует региональные особенности проявления глобальных изменений климата на территории Тимирязевского района Москвы с четко выраженным трендом потепления за последние 70 лет по динамике среднегодовой температуры: с 4,7°C за 1949-1981 гг. до 6,3°C за 2001-2010 гг., 6,4°C за 2011-2015 гг. и 7,0°C за 2012-2022 гг.

Среднегодовое количество осадков за последние 11 лет составило 746 мм, что на 99 мм выше среднего годового количества осадков за период с 1949 по 1981 год, что также подтверждает общий тренд на устойчивое повышение

годовой суммы осадков на основной территории России в результате глобальных изменений климата (Valentini, Vasenev, 2015). При этом не исключаются значительные колебания суммы осадков по годам, что и отражается в пониженном количестве осадков в период 2011–2015 гг. (табл. 2.1.1).

Таблица 2.1.1 – Многолетняя динамика средних климатических характеристик территории Лесной Опытной Дачи (по данным Метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона)

Период наблюдений	Средние значения по месяцам и за год												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Средняя температура воздуха, °С													
1949–2015	-8,2	-7,6	-2,1	6,1	12,8	16,9	18,7	16,7	11,1	5,1	-1,3	-5,7	5,2
1949–1981	-9,7	-8,5	-3,1	5,6	12,6	16,9	18,2	16,6	11,0	4,8	-1,4	-6,1	4,7
1981–1991	-7,9	-7,8	-2,1	5,9	13,3	17,2	18,4	16,4	10,9	5,3	-2,0	-5,5	5,2
1991–2001	-5,8	-5,6	-0,8	6,7	12,4	17,4	18,5	16,5	10,8	5,3	-2,4	-5,5	5,6
2001–2010	-6,4	-6,8	-0,7	7,3	13,3	16,5	20,4	17,8	12,0	5,9	0,4	-4,7	6,3
2011–2015	-7,2	-6,9	-0,5	7,6	12,7	17,2	20,7	19,4	11,5	5,5	0,3	-3,6	6,4
2012–2022	-6,7	-4,0	-0,3	7,0	14,3	18,1	19,7	18,9	12,3	6,5	0,7	-3,4	7,0
Сумма осадков, мм													
1949–2015	52	41	35	37	51	80	85	82	68	71	55	52	709
1949–1981	41	36	38	37	58	67	85	73	55	57	51	47	647
1981–1991	50	29	25	43	46	97	93	85	70	58	55	62	713
1991–2001	55	42	40	32	49	82	73	85	73	77	55	41	703
2001–2010	50	50	38	34	61	68	90	82	61	74	55	53	716
2011–2015	48	45	41	38	54	72	78	81	65	68	53	50	693
2012–2022	57	42	40	49	80	89	88	62	72	58	51	58	746

Максимальное количество осадков традиционно выпадало в летний период: в июле – августе. В последнее десятилетие усредненный период максимума сместился на май-июль, а в основные годы проводимых наблюдений (2021 и 2022 гг.) был дополнительно ярко выражен апрельский максимум осадков (табл. 2.1.2) при значительном варьировании сезонной динамики осадков (табл. 2.1.2) и температуры воздуха (табл. 2.1.3).

Таблица 2.1.2. Сезонная динамика суммы осадков (мм) по данным Метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона.

Месяц	Декада	Сумма осадков (мм)			
		2012–2022	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Январь	I	17,1	9,5	17,8	18,8
	II	20,9	9,8	28,3	24,3
	III	19,3	31,0	18,9	24,6
Февраль	I	16,8	17,3	13,2	17,3
	II	13,3	8,4	35,0	13,8
	III	11,7	15,2	19,8	8,6
Март	I	13,7	26,0	11,4	2,7
	II	11,3	15,0	13,1	0,3
	III	15,1	6,7	11,7	15,3
Апрель	I	16,2	2,2	29,3	38,4
	II	12,7	15,2	5,7	22,8
	III	19,6	7,1	61,5	16,1
Май	I	24,7	24,6	52,8	6,9
	II	18,8	15,7	6,4	25,7
	III	37,0	122,3	30,5	42,5
Июнь	I	24,4	83,1	29,5	20,5
	II	34,5	100,9	46,1	26,6
	III	30,5	16,8	66,5	1,8
Июль	I	26,5	65,3	2,4	43,9
	II	35,0	50,8	21,7	4,9
	III	26,7	64,5	9,0	41,9
Август	I	13,2	1,0	35,3	2,1
	II	25,3	10,2	48,0	0,1
	III	23,6	29,1	8,1	0,9
Сентябрь	I	27,6	18,2	21,6	8,2
	II	19,3	46,0	18,9	27,0
	III	24,9	2,7	34,2	43,8
Октябрь	I	22,9	10,0	0	40,1
	II	13,2	25,1	29,1	9,3
	III	21,6	17,4	9,3	9,6
Ноябрь	I	19,8	12,4	19,4	5,3
	II	14,5	8,5	25,6	21,2
	III	16,4	19,7	31,7	13,6
Декабрь	I	16,9	2,4	29,4	11,6
	II	22,1	10,4	29,1	80,9
	III	18,7	15,4	9,5	37,8
Сумма за год		745,6	935,9	879,8	729,2

Таблица 2.1.3. Сезонная динамика температуры воздуха (по данным Метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона).

Месяц	Декада	Средняя декадная температура воздуха (°С)			
		2012–2022 гг.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Январь	I	-4,8	0,0	-2,8	-4,9
	II	-6,1	1,0	-13,4	-6,1
	III	-7,3	-0,6	-1,3	-5,3
Февраль	I	-5,6	-3,2	-9,7	-3,0
	II	-3,8	1,5	-13,8	0,4
	III	-2,5	1,5	-6,5	0,3
Март	I	-1,6	5,0	-4,3	-2,9
	II	-0,1	3,9	-2,3	-0,8
	III	0,9	3,1	2,7	1,8
Апрель	I	4,1	4,6	4,7	3,4
	II	7,2	4,1	12,0	5,6
	III	9,6	6,1	6,2	8,6
Май	I	12,3	13,2	9,6	9,7
	II	14,7	10,4	18,2	11,3
	III	15,8	11,4	15,0	10,8
Июнь	I	16,6	16,6	16,1	17,8
	II	18,1	20,8	20,0	17,9
	III	19,5	19,5	24,6	20,6
Июль	I	19,7	20,2	22,0	21,7
	II	19,6	17,9	24,8	19,2
	III	19,9	17,6	19,7	21,0
Август	I	20,3	18,9	20,3	21,5
	II	18,9	15,7	20,8	21,8
	III	17,4	17,7	17,2	23,1
Сентябрь	I	13,9	16,7	11,6	9,4
	II	12,9	11,9	10,1	11,4
	III	10,1	13,3	7,9	9,5
Октябрь	I	8,4	13,3	6,3	10,8
	II	7,1	8,2	6,6	6,5
	III	4,0	7,2	6,5	4,5
Ноябрь	I	3,6	5,9	5,0	2,0
	II	0,7	-0,1	0,8	0,3
	III	-2,1	0,9	0,8	-4,6
Декабрь	I	-3,4	-5,4	-4,8	-7,8
	II	-3,3	-3,5	-4,2	-3,3
	III	-3,6	-3,4	-11,7	-1,4
Средние значения за год		7,0	8,1	6,5	7,0

Значительное количество осадков, обычно, выпадает в осенний период, минимальное – в январе – феврале. За основной вегетационный период (май – сентябрь) выпадает около 350–400 мм, что составляет примерно половину годового количества осадков. Средняя относительная влажность воздуха за год составляет 79%. Число дней со снежным покровом в лесу – около 176 дней. Высота снежного покрова – в среднем, 30–35 см.

Подекадное и помесечное распределение осадков и средних значений температуры воздуха характеризуется значительным варьированием по годам, что приходится принимать во внимание при планировании, проведении и интерпретации результатов экологического мониторинга.

## 2.2 Основные объекты исследований

Для исследований были выбраны представительные ключевые участки экологического мониторинга (КУМ), характеризующие принципиальное фоновое разнообразие лесных экосистем Лесной Опытной Дачи (ЛОД) с минимальной рекреационной нагрузкой, занимающих контрастные позиции в мезорельефе ЛОД с доминированием пологого моренного холма (рис. 2.2.1).

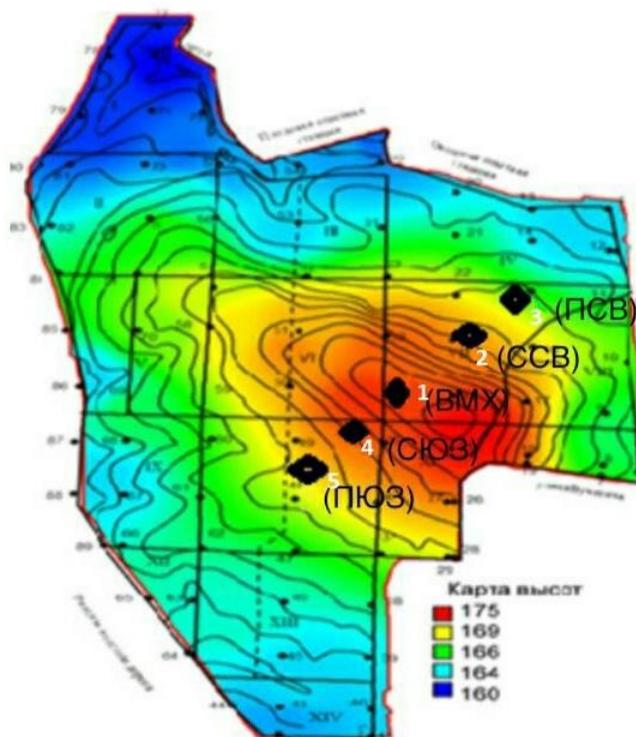


Рисунок 2.2.1. Картограмма ЛОД с ключевыми участками мониторинга

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 50x50 м<sup>2</sup>), расположенных на 5 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).

Ключевой участок мониторинга № 1 расположен на пологой вершине моренного холма (ВМХ) и является автоморфной системой с глубоким залеганием грунтовых вод и краткосрочной весенней верховодкой (табл. 2.2.1).

Исследуемые ключевые участки мониторинга №2 и №3 заложены на прямом слабопоклатом коротком склоне моренного холма северо-восточной экспозиции: на средней части склона – КУМ-2 (ССВ), на подошве – КУМ-3 (ПСВ). Участки №4 и №5 заложены на противоположном пологом склоне повышенной длины слабовогнутой формы юго-западной экспозиции: на средней части склона – КУМ-4 (СЮЗ), на подошве – КУМ-5 (ПЮЗ) (рис. 2.2.1).

Согласно «Классификации и диагностики почв СССР» (1977), почвы исследованных ключевых участков №№ 1–3 относятся к подтипу дерново-подзолистых почв типа подзолистых почв. Почвы участков №№ 4 и 5 – к подтипу дерново-подзолистых поверхностно-оглеенных почв типа болотно-подзолистых почв.

Таблица 2.2.1. Краткая характеристика ключевых участков мониторинга на Лесной Опытной Даче (с использованием материалов И.И. Васенева с соавторами (2007), И.И. Васенева, Т.В. Раскатовой (2009))

КУМ	Рельеф	Тип леса: состав древостоя	Почва	Профиль	Мощность снежного покрова
1 (ВМХ)	Вершина пологого моренного холма	Дубняк с липой сложный будро-копытениевый: 2Д+3К+2Лп+С+К+Вз Сомкнутость крон – 60%	Среднедерновая глубокоподзолистая легкосуглинистая почва (подтип дерново-подзолистых почв типа подзолистых почв) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	$O_{+2} - A_{14} - A1A_{10} -$ $A2'_{(f)30} - A2''_{(f)c44} -$ $IIA2'''_{(fg)51} -$ $IIA2B_{62} - II B1_{90} -$ $II B2_{(t)120\downarrow}$	29 см
2 (ССВ)	Средняя часть склона северо-восточной экспозиции	Сосняк с кленом сложный осоково-щитовниковый: 5С+2Кл+Д+Лп+Б Сомкнутость крон – 50–70%.	Среднедерновая глубокоподзолистая легкосуглинистая почва (подтип дерново-подзолистых почв типа подзолистых почв) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	$O_{+2} - A_{14} - A1A2_{15}$ $- A2'_{31} - A2''_{41} -$ $IIA2B_{50} - II B1_{(t)(g)86}$ $- II B2_{120\downarrow}$	32 см
3 (ПСВ)	Подошва склона северо-восточной экспозиции	Сосняк осоково-щитовниковый: 4С+3К+2Лп+Б+едЕ Сомкнутость крон – 40–45%.	Среднедерновая глубокоподзолистая поверхностно-слабоглееватая легкосуглинистая почва (подтип дерново-подзолистых почв типа подзолистых почв) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	$O_{+2} - A16 - A1A2_{15}$ $- A2'_{(g)25} - A2''_{(g)34} -$ $A2'''_{(g)42} - IIA2B_{55} -$ $II B_{80} - II B C_{120\downarrow}$	40 см

<p style="text-align: center;"><b>4</b> <b>(СЮЗ)</b></p>	<p style="text-align: center;">Средняя часть склона юго-западной экспозиции</p>	<p style="text-align: center;">Сосняк разнотравно- осоковый: 6С+3Кл+Лп+едЕ+ едД Сомкнутость крон – 75%</p>	<p style="text-align: center;">Слабодерновая глубокоподзолистая поверхностно- оглеенная легкосуглинистая почва (подтип дерново-подзолистых поверхностно-оглеенных почв типа болотно-подзолистых почв) на покровном суглинке, подстилаемым мореной</p>	<p style="text-align: center;"><math>O^T_{+4-5} - A1_6 -</math> <math>A1A2_{h(g)18} - A2''_{g41}</math> <math>- PA2''_{(g)50} -</math> <math>BA2_{(g)55} - A2B_{(g)58} -</math> <math>B1_{(t)g92} - B2_{(t)120\downarrow}</math></p>	<p style="text-align: center;">38 см</p>
<p style="text-align: center;"><b>5</b> <b>(ШЮЗ)</b></p>	<p style="text-align: center;">Подошва склона юго- западной экспозиции</p>	<p style="text-align: center;">Сосняк щитовниково- осоковый: 4С+5Кл+Лп+едЕ+едБ+ едЛ Сомкнутость крон – 80%</p>	<p style="text-align: center;">Слабодерновая глубокоподзолистая поверхностно- оглеенная легкосуглинистая почва (подтип дерново-подзолистых поверхностно-оглеенных почв типа болотно-подзолистых почв) на покровном суглинке, подстилаемым мореной</p>	<p style="text-align: center;"><math>O^T_{+3-4} - A1_4 -</math> <math>A1A2_{h10} - A2g_{27} -</math> <math>A2''_{g37} - PA2''_{(g)47}</math> <math>B1_{(t)g80} - B2_{(t)g120\downarrow}</math></p>	<p style="text-align: center;">47 см</p>

## 2.3 Методы исследований

Элементарные площадки ключевых участков мониторинга имеют форму квадрата площадью 10x10 метров. На данных площадках оценивали состояние почвенной растительности (см. табл. 2.3.1) 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.

Анализируются площадки с тремя уровнями рекреационной нагрузки: минимальным (фоновым), средним и сильным. Уровень нагрузки определялся степенью нарушения наземного растительного покрова, оцениваемой по относительной площади тропинойной сети на каждой площадке (табл. 2.3.1).

Таблица 2.3.1. Процент тропинойной сети на элементарных площадках с разным уровнем рекреационной нагрузки ключевых участков экологического мониторинга ЛОД.

№ КУМ	Положение в мезорельефе	Рекреационная нагрузки	Площадь тропинойной сети, %
1	Вершина пологого моренного холма (ВМХ)	Минимальная	0.36
		Средняя	0.92
		Сильная	1.44
2	Средняя часть склона северо-восточной экспозиции (ССВ)	Минимальная	1.40
		Средняя	2.98
		Сильная	3.36
3	Подопшва склона северо-восточной экспозиции (ПСВ)	Минимальная	1.12
		Средняя	2.85
		Сильная	3.16
4	Средняя часть склона юго-западной экспозиции (СЮЗ)	Минимальная	1.76
		Средняя	3.14
		Сильная	3.76
5	Подопшва склона юго-западной экспозиции (ПЮЗ)	Минимальная	1.96
		Средняя	3.34
		Сильная	3.92

Мониторинговые наблюдения за почвенными режимами проводились 2 раза в месяц весной (с апреля или мая), летом и осенью (по конец октября) 2021 и 2022 годов. Температуру почвы определяли электронным термометром (Checktemp), влажность почвы – термовесовым методом и с помощью электронного почвенного влагомера, почвенные потоки  $\text{CO}_2$  (с пересчетом в  $\text{г/м}^2$  в сутки) измеряли с помощью мобильного инфракрасного анализатора Li-820.

На каждой площадке были постоянно на сезон установлены основания напочвенных экспозиционных камер в пятикратной повторности с заглублением для предотвращения диффузии газов из внешней среды на 5 см в минеральные горизонты почвы. Для проведения замеров на них с помощью зажимов закреплялась экспозиционная камера, подключенная шлангом к газовому анализатору. Наблюдения в каждой точке проводились в течение примерно 5–15 минут, до достижения стабильного (прямолинейного на автоматически строящемся графике) увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в камере по меньшей мере на 100 ppm (рис. 2.3.1).



Рисунок 2.3.1. Измерение почвенных потоков  $\text{CO}_2$  на ключевых участках мониторинга с одновременным измерением температуры и влажности почвы

Почвенная эмиссия  $\text{CO}_2$  (в  $\text{г/м}^2$  в сутки) рассчитывалась затем с использованием уравнения идеального газа на основе данных по скорости увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в камере с учетом температуры и давления внутри нее. Определение температуры и влажности верхних почвенных горизонтов проводилось в непосредственной близости от напочвенных экспозиционных камер с 3-х сторон, для вычисления средних значений.

Дополнительно, раз в месяц отбирались и анализировались образцы верхних горизонтов минеральной части исследуемых почв (по глубинам 0-5 см, 5-10 см, 10-15 см) – с использованием традиционных методов химических исследований:

1. Определение плотности сложения почвы – по Н.А. Качинскому, с использованием врезных цилиндров объемом  $100 \text{ см}^3$  – в тройной повторности (Вадюнина, Корчагина, 1986, «Теория и методы...», 2007);

2. Определение влажности почвы – термостатно-весовым методом (Вадюнина, Корчагина, 1986, «Теория и методы...», 2007);

2. Определение актуальной и обменной кислотности почвы – в ее водной и солевой вытяжке потенциометрически (ГОСТ 27753.3-88 и ГОСТ 26423-85);

3. Содержание органического углерода – методом Тюрина в модификации Никитина с окончанием по ЦИНАО (ГОСТ 26213-91);

4. Определение содержания обменного К по Масловой (ГОСТ 26210-91);

5. Определение содержания подвижного Р (по Кирсанову ГОСТ Р 54650-2011);

6. Определение содержания аммонийного азота – по ГОСТ 277553.8-88;

7. Определение содержания нитратного азота – по ГОСТ 27753.7-88.

Статистическая обработка производилась с помощью Microsoft Excel 2010 и в пакете STATISTICA 8.0 (Мешалкина, Самсонова, 2008; Дмитриев, 2009). Результаты статистически обработаны с использованием ANOVA в соответствии с процедурой GLM (IBM SPSS) версии 25.

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

#### 3.1 Изменение физических свойств почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости плотности сложения исследуемых дерново-подзолистых почв на вершине пологого моренного холма в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал четкую дифференциацию плотности сложения почв в верхних слоях их минерального профиля 0-5, 5-10 и 10-15 см: устойчиво на 0,2-0,3 г/см<sup>3</sup> при переходе от гумусово-аккумулятивных к аккумулятивно-элювиальным и элювиальным горизонтам (рис. 3.1.1).

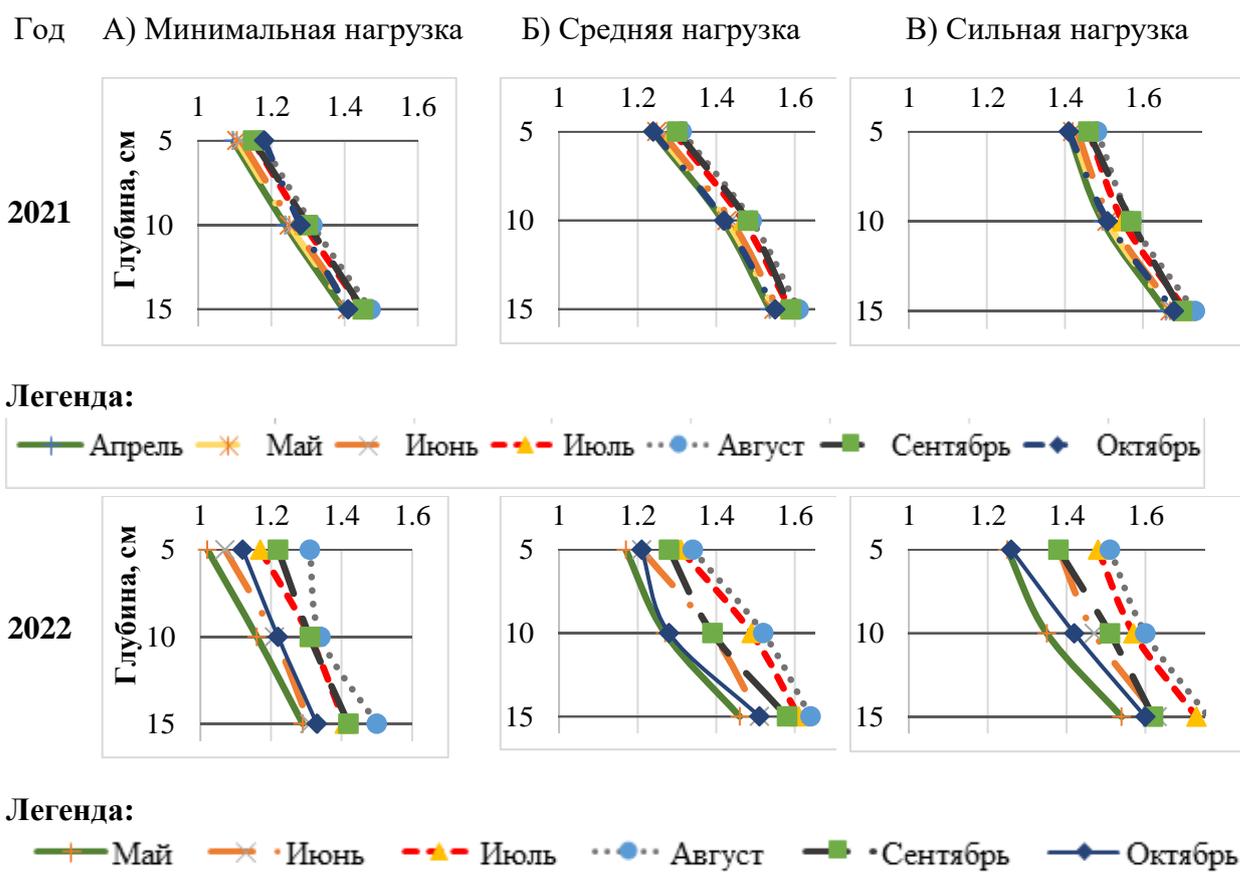


Рисунок 3.1.1. Изменение плотности сложения почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Ключевые участки характеризуются устойчивым по сезону увеличением плотности слоения верхних горизонтов почвы при увеличении уровня рекреационной нагрузки на 15–25% (при сильной рекреационной нагрузке) по сравнению с участками минимальной рекреационной нагрузки (рис. 3.1.1).

Сезонная динамика плотности слоения верхних почвенных горизонтов в условиях 2022 года с близким к среднегодовому количеству осадков соразмерна с диапазоном их уплотнения (на 15–25%) при увеличении уровня рекреационной нагрузки. В условиях 2021 года с повышенным количеством осадков (примерно на 20% выше их среднегодового значения) сезонное уплотнение выражено значительно слабее – по-видимому, в результате более выраженных циклов разуплотнения при периодическом увлажнении верхних горизонтов почв.

Исследуемые почвы характеризуются наибольшим содержанием влаги в весенний период – после таяния снега, и затем постепенным трендом к ее снижению в течение весенне-летнего периода (рис. 3.1.2). Максимальное значение влажности почвы (36,2%) было зафиксировано в конце апреля 2021 года, а минимальное (8,3%) - в конце августа 2022 года.

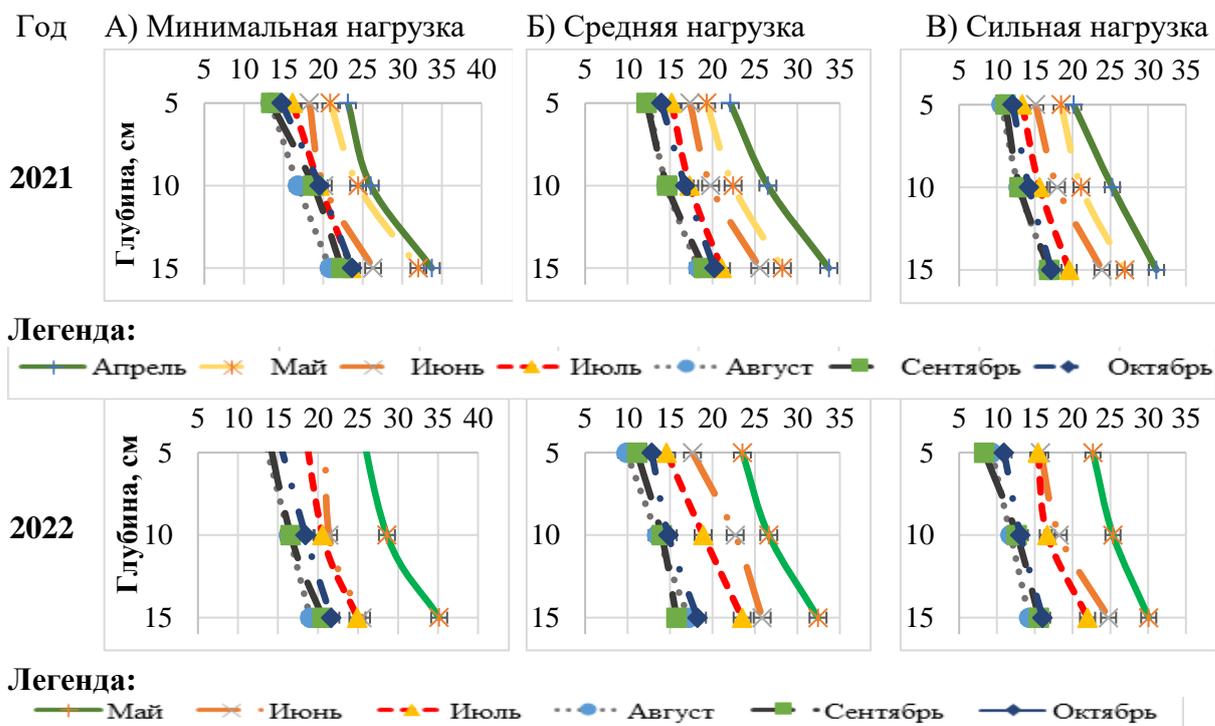


Рисунок 3.1.2. Изменение влажность почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Верхние горизонты фоновых почв на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой) были устойчиво более влажными, чем их аналоги на площадках с выраженной в виде тропинойной сети рекреационной нагрузкой: в среднем на 3–5% – при четкой дифференциации влажности по исследованным слоям субпрофиля почв (возрастание вниз по субпрофилю на 7-12%). Сезонная динамика влажности сильнее выражена в элювиальном горизонте почв и в условиях менее обеспеченного осадками 2022 года.

### **3.2 Изменение физических свойств почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки**

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости плотности сложения исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части склона северо-восточной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал четкую дифференциацию плотности сложения элювиальных горизонтов почв по сравнению с их выше лежащими гумусово-аккумулятивными и аккумулятивно-элювиальными горизонтами (рис. 3.2.1).

В отличие от почв на вершине моренного холма эти почвы на склоне характеризуется менее выраженной дифференциацией по плотности сложения гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтов (соответственно, в слоях 0–5 и 5–10 см) и резким возрастанием плотности при переходе к элювиальным горизонтам: на 0,2 г/см<sup>3</sup> в условиях более влажного 2022 года, и на 0,1-0,2 г/см<sup>3</sup> в условиях 2021 года с близким к среднемуго-летнему количеством осадков (рис. 3.2.1).

Диапазон сезонного уплотнения-разуплотнения верхнего горизонта почв, как и в предыдущем случае, хорошо выражен в условиях среднего уровня увлажнения 2022 года, где он на фоновой площадке составляет 0,3/0,2 г/см<sup>3</sup>, а при среднем уровне рекреационной нагрузки сокращается примерно в 1,5 раза. В условиях 2021 года с повышенным количеством осадков сезонное уплотнение-разуплотнение выражено незначительно.

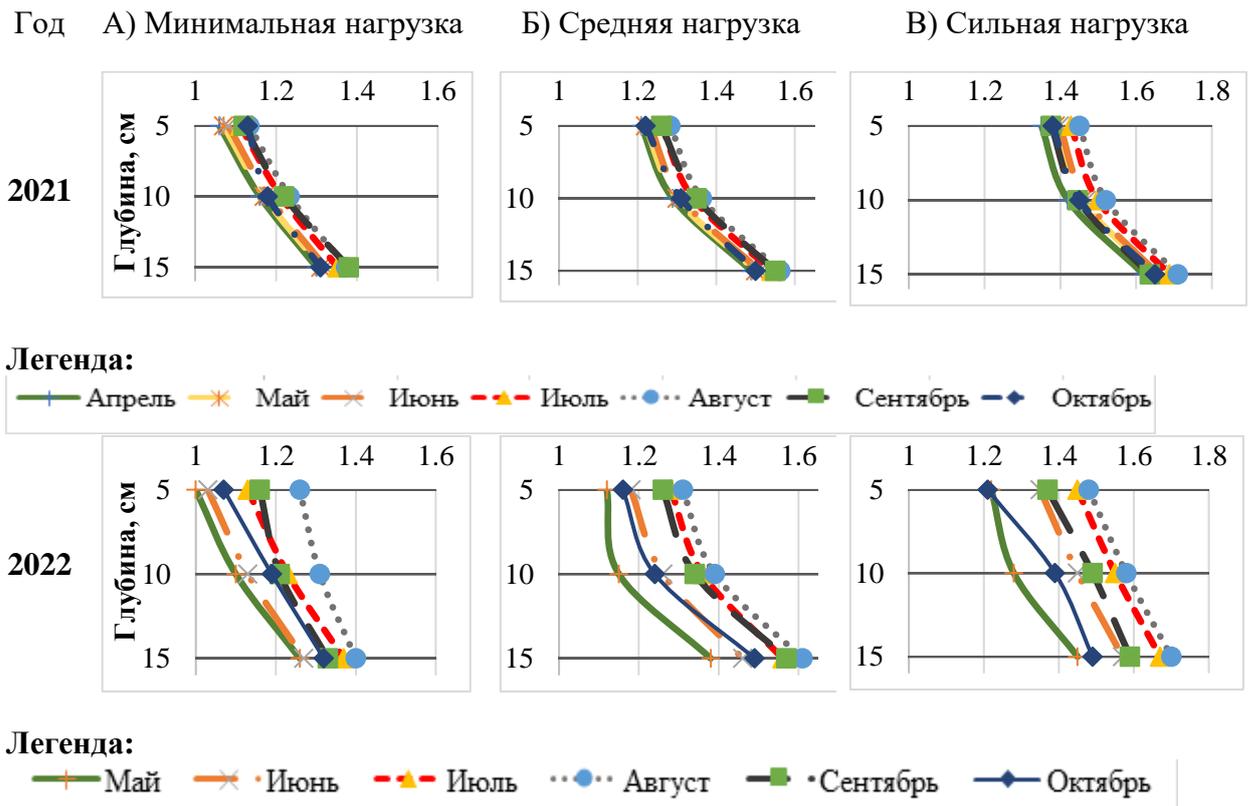


Рисунок 3.2.1. Изменение плотности сложения почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Исследуемые почвы характеризуются, в среднем, существенно более высокими значениями влажности, по сравнению с почвами на вершине моренного холма – при общих закономерностях наибольшего содержания влаги в весенний период (после таяния снега), и затем постепенным трендом к ее снижению в течение весенне-летнего периода (рис. 3.2.2). Максимальное значение влажности почвы (39,8%) было зафиксировано в конце апреля 2021 года, а минимальное (10,7%) - в конце августа 2022 года.

Верхние горизонты фоновых почв на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой были устойчиво более влажными, чем их аналоги на вершине моренного холма и на площадках с выраженной рекреационной нагрузкой: в среднем на 3–7% – при более четкой дифференциации влажности по исследованным слоям субпрофиля почв (возрастание вниз по субпрофилю преимущественно на 10-12%) и сезонной динамике влажности (на 17-23%), которая в отличие от почв на вершине моренного холма очень хорошо

выражена независимо от уровня обеспеченного осадками и в 2021 и в 2022 годах.

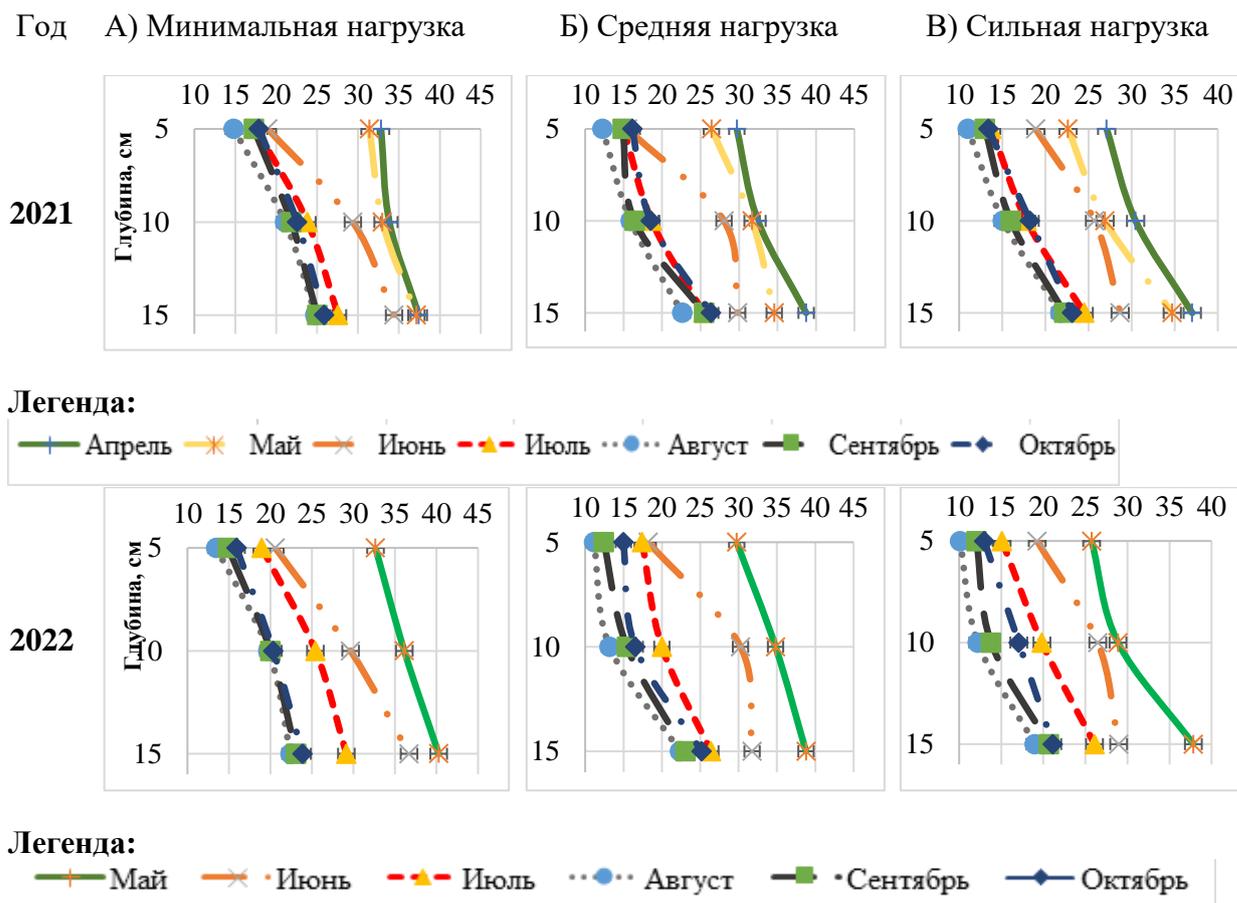


Рисунок 3.2.2. Изменение влажность почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

### 3.3 Изменение физических свойств почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости плотности сложения исследуемых дерново-подзолистых почв на подошве склона северо-восточной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал четкую дифференциацию плотности сложения элювиальных горизонтов почв по сравнению с их выше лежащими гумусово-аккумулятивными и аккумулятивно-элювиальными горизонтами (рис. 3.3.1) – на фоне, в среднем, более низких значениях плотности сложения верхних горизонтов почв, по сравнению с их аналогами в выше лежащих по склону почвах (на 0,1-0,2 г/см<sup>3</sup>).

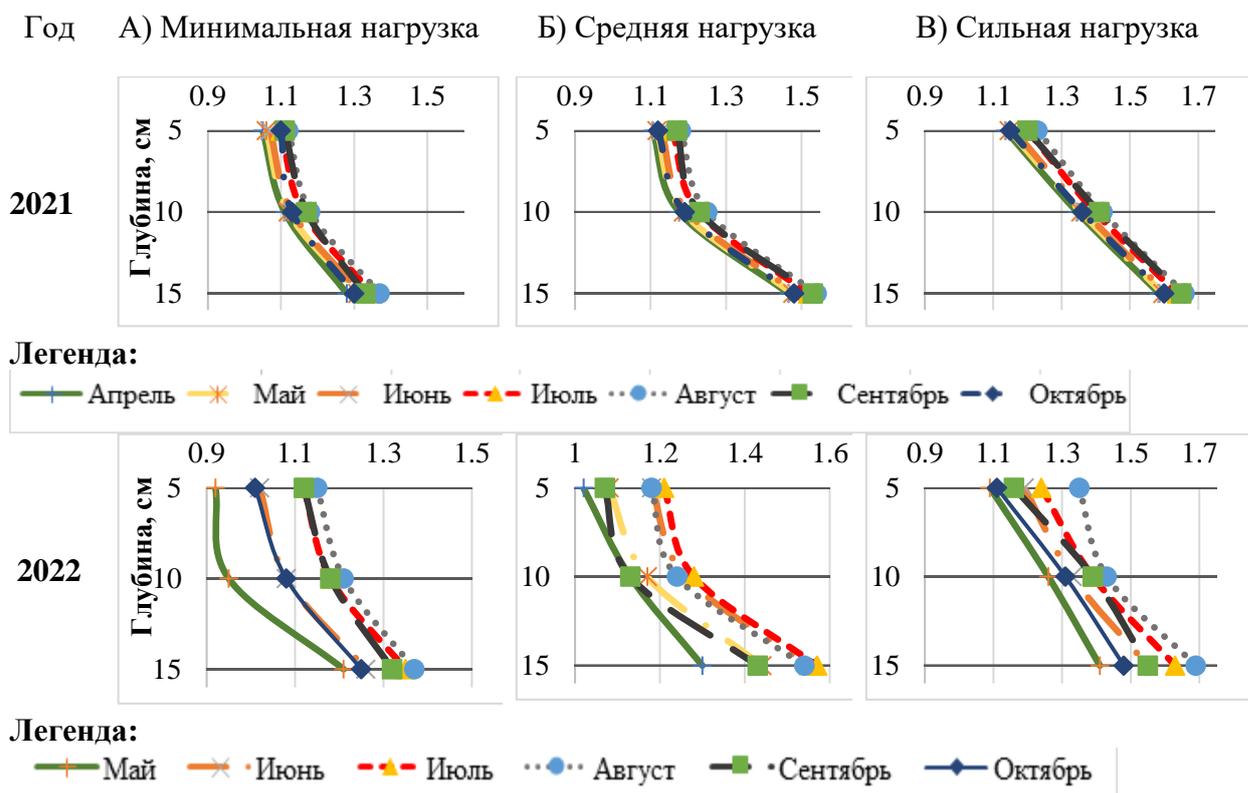


Рисунок 3.3.1. Изменение плотность сложения почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В отличие от почв на вершине моренного холма эти почвы на подошве склона при минимальном и среднем уровне рекреационной нагрузки характеризуются слабо выраженной дифференциацией по плотности сложения гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтов (соответственно, в слоях 0–5 и 5–10 см) и резким возрастанием плотности при переходе к элювиальным горизонтам: на 0,25-0,35 г/см<sup>3</sup> (рис. 3.3.1).

Диапазон сезонного уплотнения-разуплотнения верхнего горизонта почв в условиях среднего уровня увлажнения 2022 года выражен хорошо, но значительно слабее, чем в почвах выше лежащей части склона, составляя 0,23/0,12 г/см<sup>3</sup> на фоновой площадке и незначительно сокращаясь при среднем уровне рекреационной нагрузки (примерно в 1,2 раза). В условиях 2021 года с повышенным количеством осадков сезонное уплотнение-разуплотнение выражено незначительно (рис. 3.3.1).

Исследуемые почвы характеризуются существенно более высокими, чем в почвах на склоне и вершине моренного холма, значениями влажности в

весенний период (после таяния снега), и затем более быстрым трендом к ее снижению в мае-июне (рис. 3.3.2). Максимальное значение влажности почвы (42,5%) было зафиксировано весной 2021 года, а минимальное (11,4%) – в конце августа 2022 года.

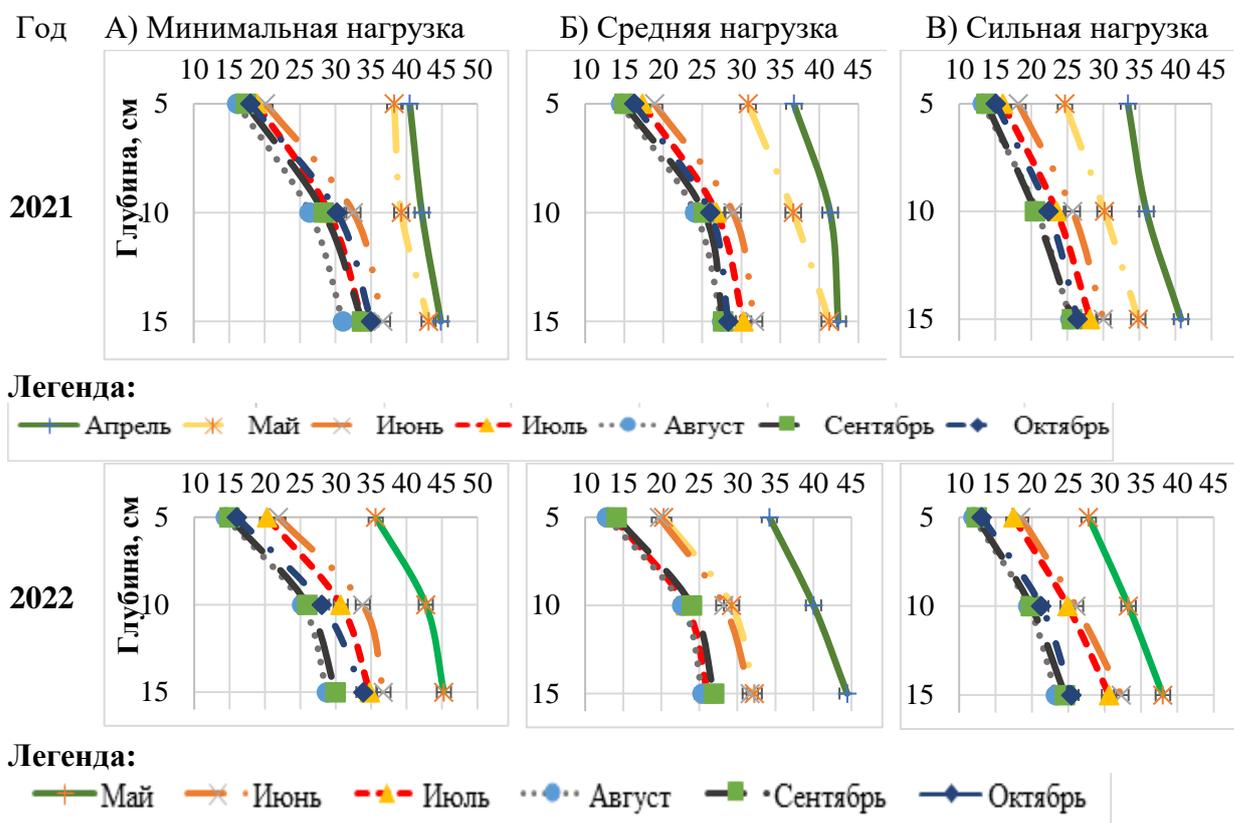


Рисунок 3.3.2. Изменение влажности почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Верхние горизонты фоновых почв на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой устойчиво более влажные, чем их аналоги на вершине и склоне моренного холма: в апреле-мае различия могут составлять 10–15% (рис. 3.3.2). На площадках с выраженной рекреационной нагрузкой эти различия сокращаются до 5–10%. Сезонная динамика влажности возрастает до 20–25%, постепенно сокращаясь вниз по исследуемым субпрофилям почв и по мере возрастания рекреационной нагрузки. В отличие от почв на вершине и склоне моренного холма она лучше выражена в условиях более обеспеченного осадками 2021 года.

### 3.4. Изменение физических свойств почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости плотности сложения исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части слабоогнутого склона юго-западной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал выраженное увеличение плотности сложения почв этого склона: в среднем, на 0,1-0,15 г/см<sup>3</sup> – по сравнению с их аналогами на противоположном, более коротком, склоне моренного холма слабовыпуклой формы (рис. 3.4.1).

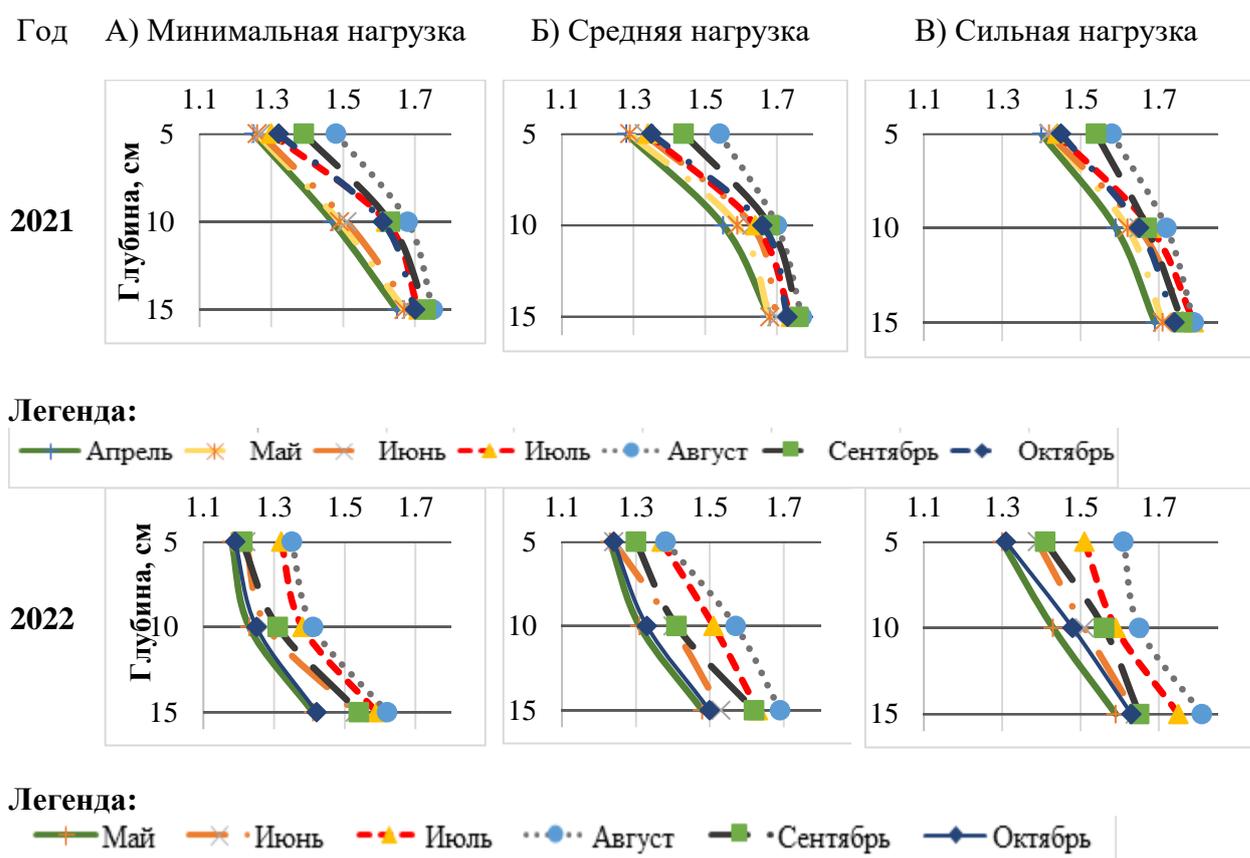


Рисунок 3.4.1. Изменение плотность сложения почв на средней части юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В отличие от почв противоположного склона холма эти почвы на склоне юго-западной экспозиции характеризуются преимущественно хорошо выраженной дифференциацией по плотности сложения гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтов (соответственно, в слоях 0–5 и 5–

10 см) и выраженной сезонной динамикой плотности сложения на 0,15-0,2 (до 0,3) г/см<sup>3</sup> – практически во всех вариантах рекреационной нагрузки и в условиях обоих лет исследования с существенно различным количеством осадков.

Исследуемые почвы юго-западного склона характеризуются, в среднем, несколько меньшим содержанием влаги (на 1–3%) в верхних горизонтах (рис. 3.4.2) – по сравнению с аналогичными горизонтами почв на противоположном склоне (см. рис. 3.2.2), но более высоким по сравнению с почвами вершины моренного холма – при общих закономерностях наибольшего содержания влаги в весенний период (после таяния снега), с постепенным трендом к ее снижению в течение весенне-летнего периода.

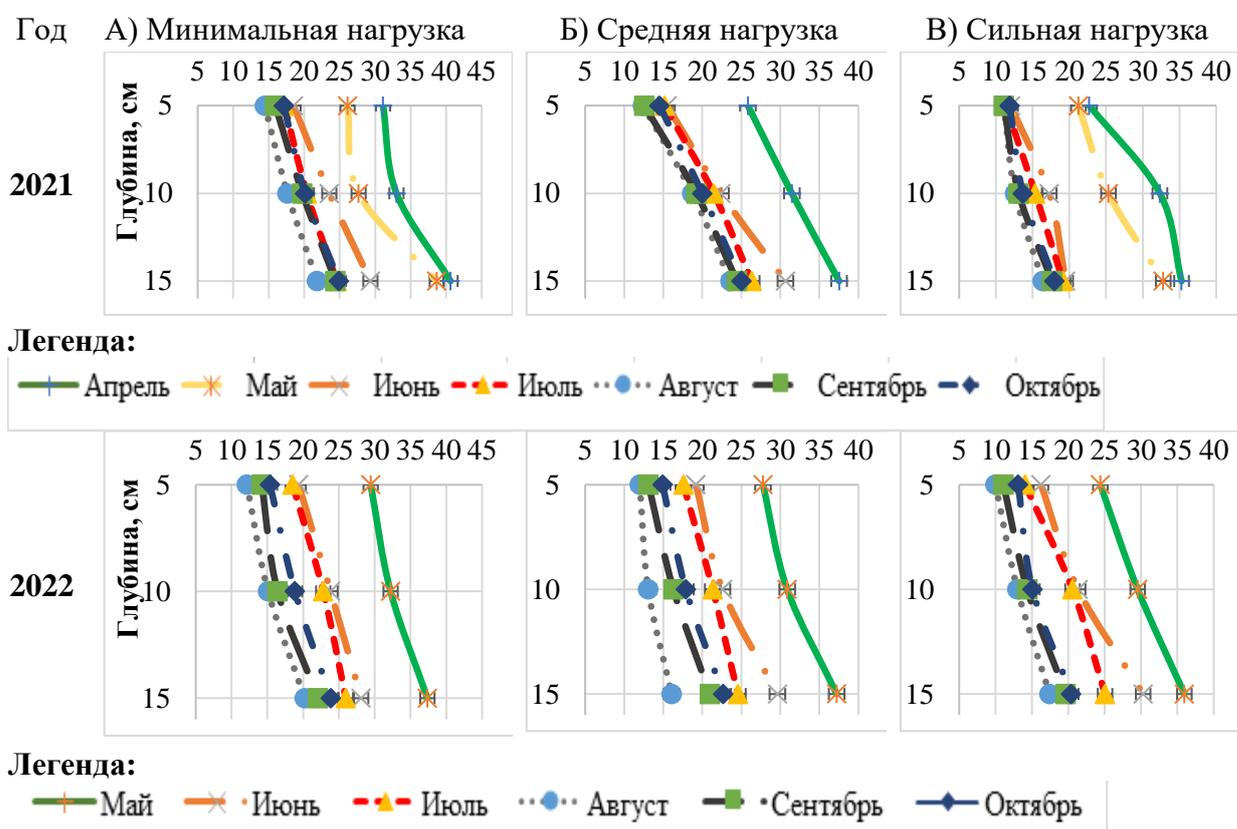


Рисунок 3.4.2. Изменение влажность почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Максимальное значение влажности почвы (38,2%) было зафиксировано в конце апреля 2021 года, а минимальное (10,1%) - в конце августа 2022 года. Верхние горизонты фоновых почв с минимальной рекреационной нагрузкой устойчиво более влажные, чем их аналоги на площадках с выраженной

рекреационной нагрузкой: в среднем на 3–5% – при менее четкой дифференциации влажности в элювиальных горизонтах (рис. 3.4.2). Они же характеризуются сильнее выраженным летним снижением увлажнения в 2022 году с более низким количеством осадков.

### 3.5. Изменение физических свойств почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости плотности сложения исследуемых дерново-подзолистых почв на подошве склона юго-западной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал четкую дифференциацию плотности сложения элювиальных горизонтов почв по сравнению с их выше лежащими гумусово-аккумулятивными и аккумулятивно-элювиальными горизонтами (рис. 3.5.1).

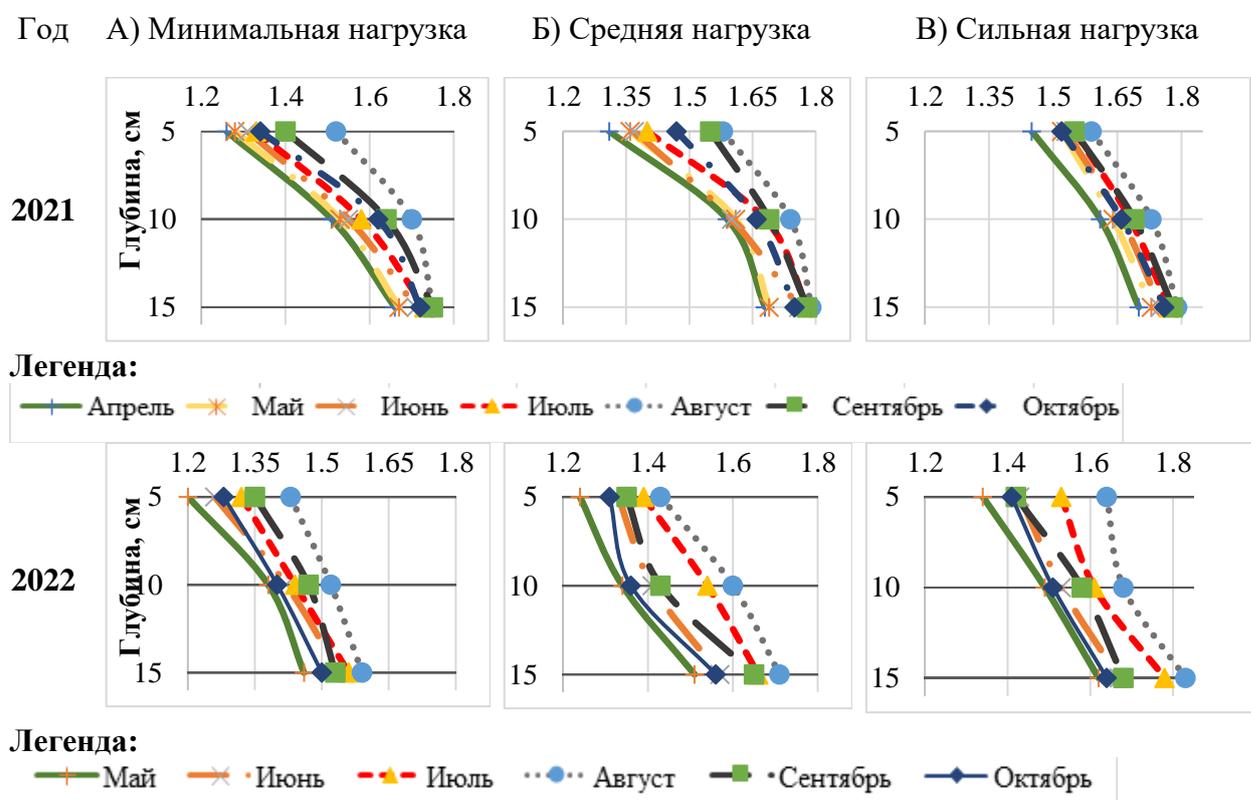


Рисунок 3.5.1. Изменение плотность сложения почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Почвы на подошве склона юго-западной экспозиции существенно отличаются от почв вершины моренного холма, исследуемых склонов и подошвы склона противоположной экспозиции: в среднем – более высокими значениями на 0,1–0,2 (при высоком уровне нагрузки – даже на 0,3–0,4) г/см<sup>3</sup>. В отличие от почв на подошве склона противоположной экспозиции эти почвы характеризуются более равномерным возрастанием плотности сложения вниз по профилю (рис. 3.5.1) и значительным диапазоном сезонного варьирования плотности сложения верхних горизонтов почв в условиях 2021 года с повышенным количеством осадков: 0,15–0,25 г/см<sup>3</sup>.

Исследуемые почвы на подошве склона юго-западной экспозиции характеризуются наиболее высокими среди изучаемых объектов значениями влажности в весенний период (после таяния снега), и выраженным трендом к ее максимальному снижению в почвах со средним и, особенно, сильным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 3.5.2).

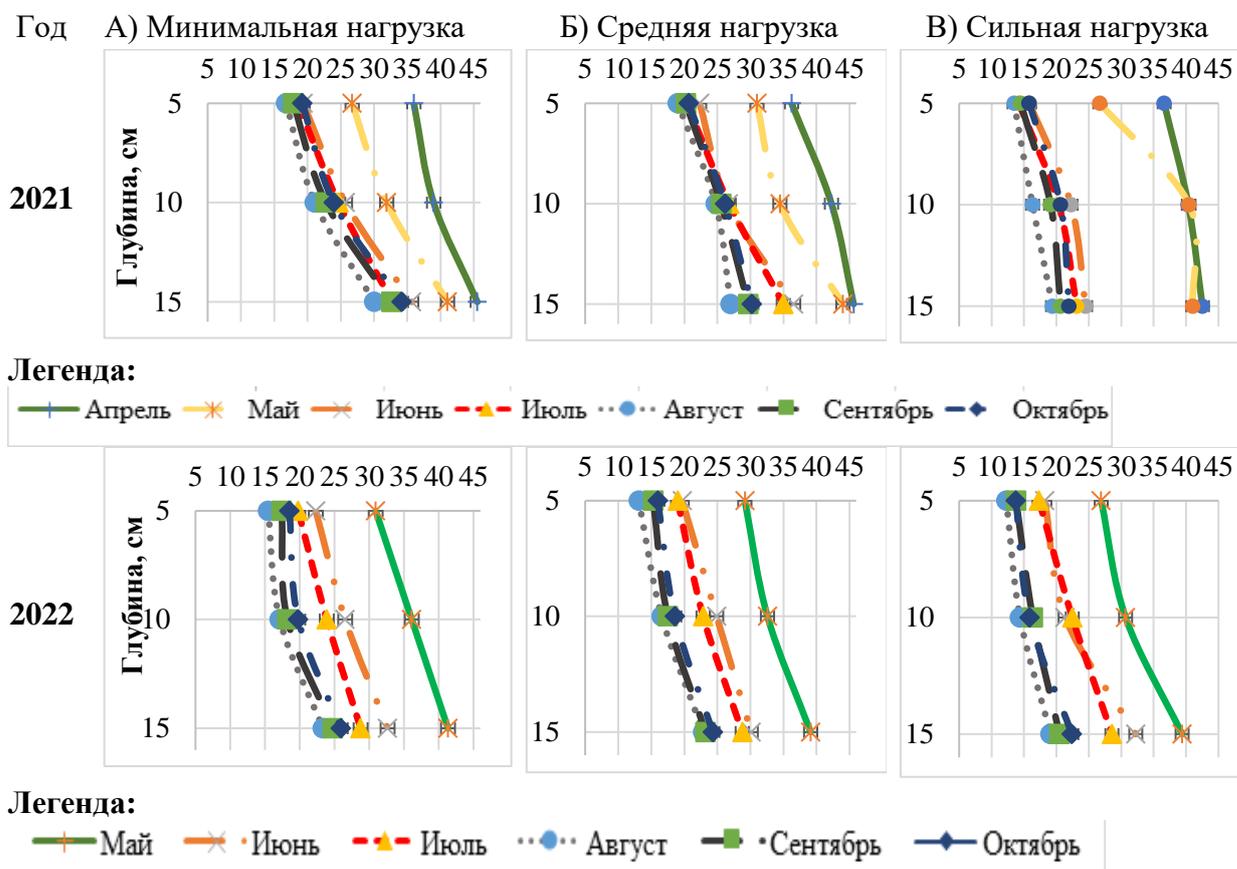


Рисунок 3.5.2. Изменение влажности почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Максимальное значение влажности почвы (46,3%) было зафиксировано весной 2021 года, а минимальное (13,3%) – в конце августа 2022 года. Верхние горизонты фоновых почв на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой устойчиво более влажные, чем их аналоги на вершине и склоне моренного холма: в апреле-мае различия могут составлять 5–15% (рис. 3.5.2). На площадках с выраженной рекреационной нагрузкой эти различия сокращаются до 5–10%. Сезонная динамика влажности составляет 15–25% и, в большинстве случаев, незначительно изменяется вниз по исследуемым субпрофилям почв и по мере возрастания рекреационной нагрузки, будучи несколько лучше выраженной в условиях более обеспеченного осадками 2021 года.

### **3.6. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику влажности и плотности сложения исследуемых почв**

Мониторинговые наблюдения, проведенные в условиях 2021 года с повышенным на 20% относительно среднеголетних значений количеством осадков, показали четко выраженную пространственную дифференциацию сезонной динамики влажности верхних горизонтов исследованных дерново-подзолистых почв по их позиции на склоне и уровню рекреационной нагрузки (рис. 3.6.1). В весенние месяцы (апрель – май) влажность гумусово-аккумулятивного горизонта в почве с минимальным уровнем рекреационной нагрузки на подошве склона северо-восточной экспозиции (ПСВ) была устойчиво в 1,8 раза выше, чем в аналогичной почве на вершине моренного холма (ВМХ).

Ниже по профилю различия постепенно сглаживались до 1,4 раза в слое 10–15 см – при минимальных различиях в 5% профильной дифференциации влажности почвы на подошве склона (рис. 3.6.1.А). Влажность верхних горизонтов почвы на склоне (ССВ) характеризовалась промежуточными значениями влажности и выраженности ее профильной дифференциации, которая максимально выражена в почве на вершине моренного холма – с резким увеличением влажности при переходе к подзолистому горизонту А2.

А) Минимальная рекреационная нагрузка

Б) Средняя рекреационная нагрузка

В) Сильная рекреационная нагрузка

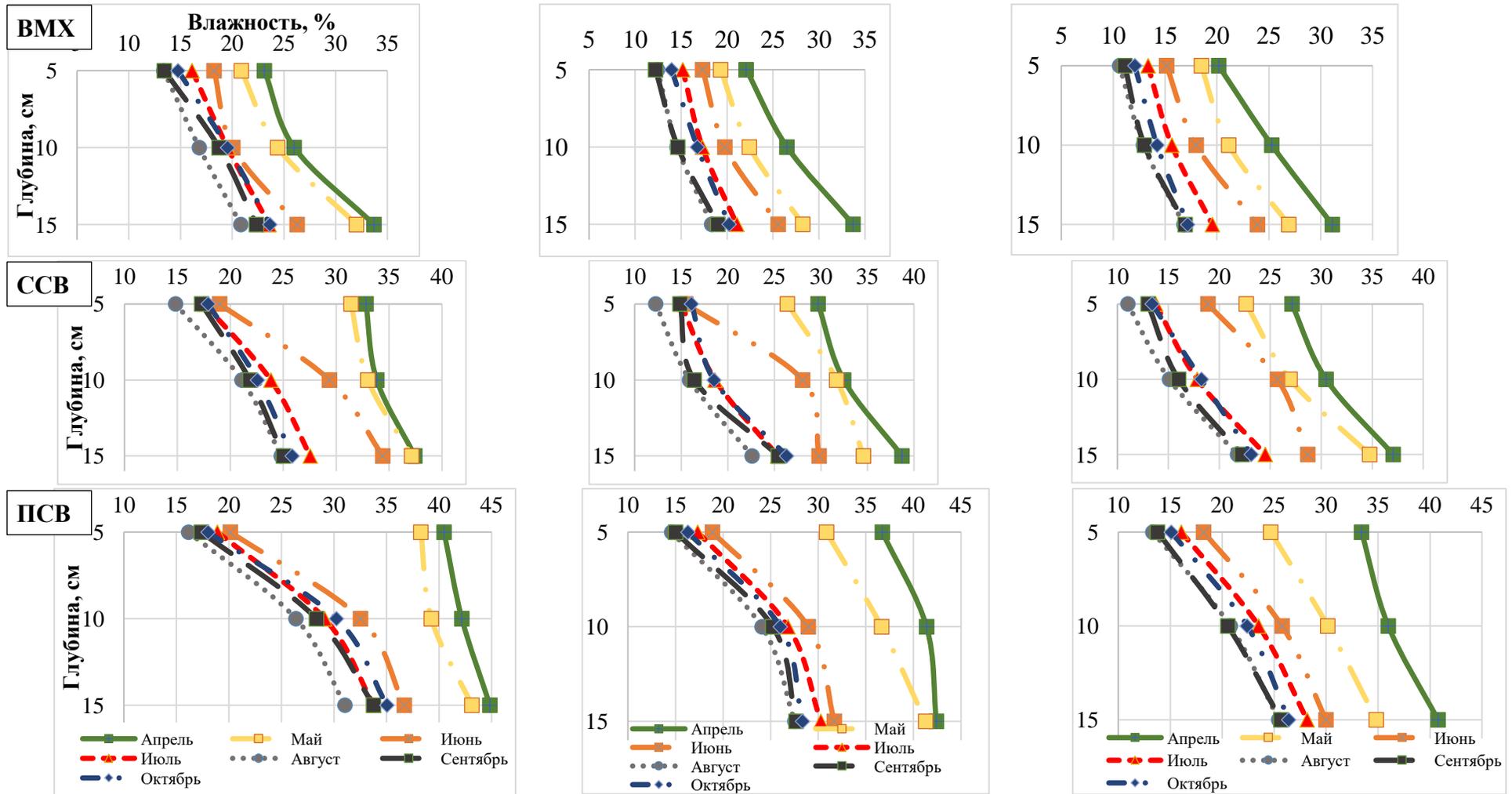


Рисунок 3.6.1. Сезонная динамика влажности верхней части профиля дерново-подзолистых почв на ключевых участках мониторинга Лесной опытной дачи в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на северо-восточном склоне.

В летние месяцы ярко выражен общий тренд на качественное снижение влажности верхних горизонтов исследованных почв – с максимальным проявлением в почве на подошве склона, с быстрым высушиванием гумусово-аккумулятивного горизонта до уровня влажности почвы на склоне при минимальных отличиях (в 2%) от почвы моренного холма. Нижележащие горизонты проявляют гораздо более высокую устойчивость к высыханию, при возрастании степени дифференциации профиля влажности в верхних горизонтах дерново-подзолистой глееватой почвы на ПСВ до 1,8–2 раз.

В почве на вершине холма высушивание отчетливо выражено и в подзолистом горизонте, средняя влажность которого в летние месяцы примерно в 1,5 раза ниже, чем весной (рис. 3.6.1.А). Почва на склоне характеризуется более быстрым летним высыханием гумусово-аккумулятивного горизонта в июне – с минимальными отличиями в это время от почвы на подошве склона, а затем, начиная с июля, уже гораздо ближе по влажности к почве на вершине моренного холма. В осенний период наблюдается постепенное повышение влажности верхних горизонтов исследованных почв, но даже в октябре оно еще не принимает характер качественных различий. Максимально выражено в почве на подошве склона, но и там сезонное увеличение влажности не превышает 4% по сравнению с наиболее низкими значениями влажности в августе.

Общий характер сезонной динамики влажности верхних горизонтов исследованных почв ключевых участков с выраженной рекреационной нагрузкой близок фоновой почве, но отличается от нее устойчиво более низкими значениями влажности, четко выраженным снижением влажности уже в мае и заметным только в октябре осенним увеличением влажности (рис. 3.6.1.Б, 1.В).

В абсолютных значениях вызванные рекреационной нагрузкой деградиационные изменения влажности максимально выражены в почве подошвы склона с сильной нагрузкой, где майские значения влажности гумусово-аккумулятивного горизонта на 13% ниже фона (рис. 3.6.1.А). Минимальные изменения (в 1–3%)

наблюдаются в почве на вершине холма, которая и при минимальном уровне рекреационной нагрузки отличается пониженной сезонной динамикой влажности верхних почвенных горизонтов.

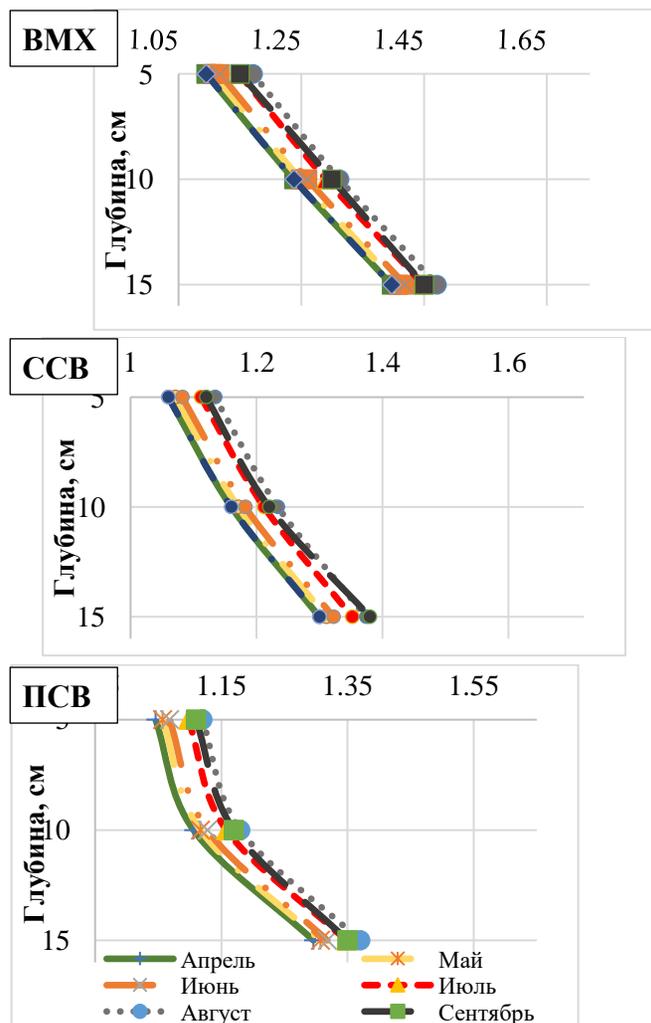
Повышенная чувствительность к выраженной рекреационной нагрузке сезонной динамики влажности дерново-подзолистых глееватых почв на подошве исследованного склона обуславливает необходимость более четкой экологической регламентации допустимого для таких почв уровня рекреационной нагрузки – особенно в наиболее влажные весенние месяцы.

Традиционно повышенной чувствительностью к уровню рекреационной нагрузки характеризуется плотность сложения верхних горизонтов почв, что очень четко проявилось и в случае исследуемых экосистем Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 3.6.2). На участках со средним уровнем рекреационной нагрузки плотность сложения большинства верхних горизонтов на  $0,1-0,2 \text{ г/см}^3$  выше плотности аналогичных горизонтов фоновых почв с минимальной рекреационной нагрузкой.

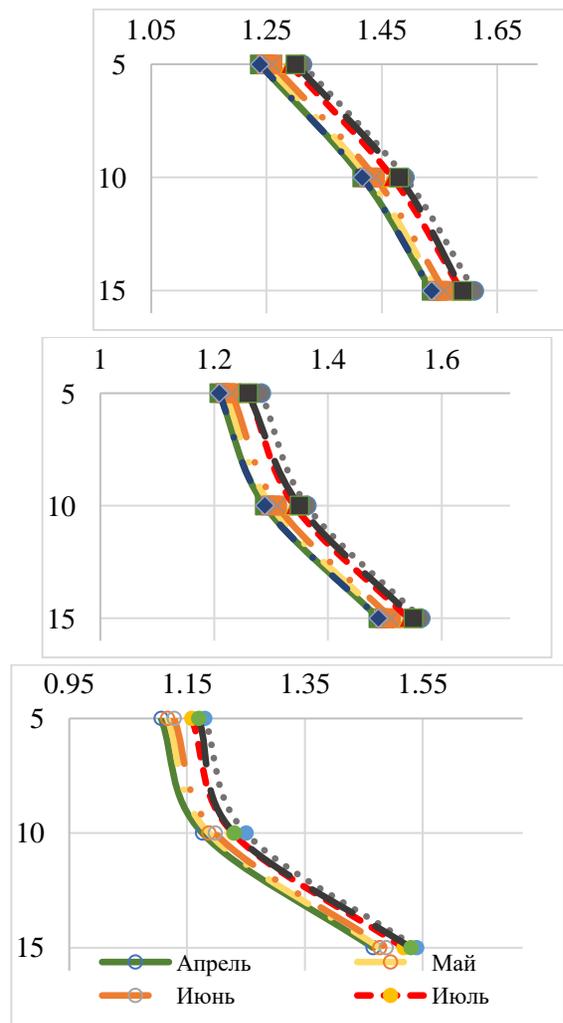
Исключение составляют гумусово-аккумулятивный и верхняя часть аккумулятивно-элювиального горизонта глееватой дерново-подзолистой почвы на подошве склона, где в условиях повышенной влажности и вязкости лишенной подстилки минеральной поверхности почв быстро развивается параллельная сеть тропинок, и верхние 10 см почвенного профиля успевают частично вернуть «фоновые» значения плотности – на фоне аномально высокой плотности нижней части аккумулятивно-элювиального горизонта, которая на  $0,4 \text{ г/см}^3$  выше плотности поверхностного минерального горизонта (рис. 3.6.2.Б).

При этом, достаточно четко выражена пространственная дифференциация плотности сложения исследованных почв по склону: с максимальными значениями плотности в наиболее сухой почве вершины моренного холма и с «пошаговым» снижением плотности примерно на  $0,05 \text{ г/см}^3$  при переходе к почве на средней части склона и его подошве. .

А) Минимальная рекреационная нагрузка



Б) Средняя рекреационная нагрузка



В) Сильная рекреационная нагрузка

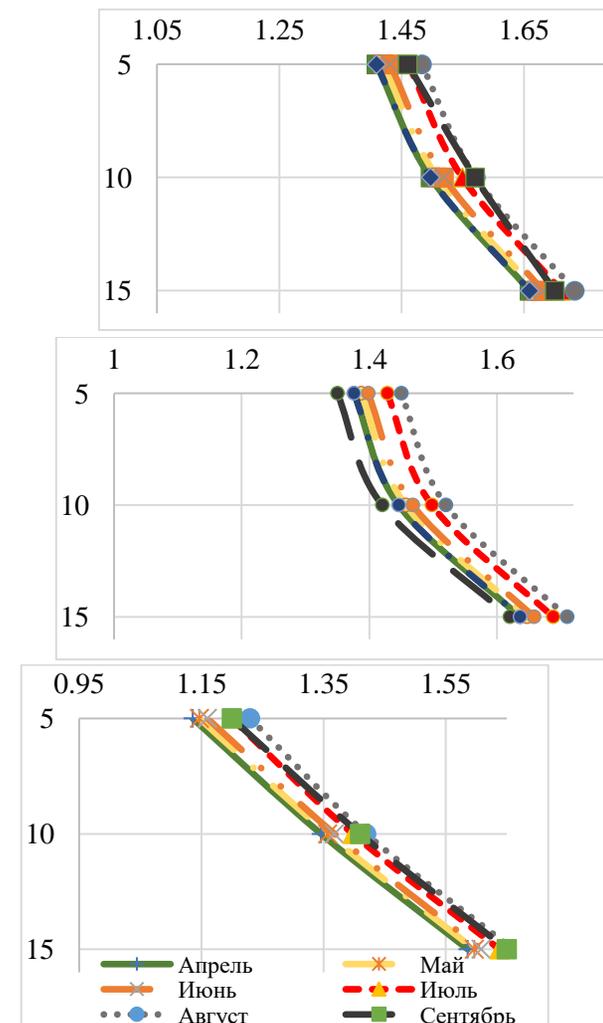


Рисунок 3.6.2. Сезонная динамика плотности сложения верхней части профиля дерново-подзолистых почв на участках мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на северо-восточном склоне.

Возможно, это связано с сильнее выраженным эффектом сезонного разуплотнения в циклах увлажнения-набухания и промерзания-растрескивания педов верхних почвенных горизонтов в условиях их повышенной влажности (см. рис. 3.6.1). Единственное исключение составляет поверхностный минеральный горизонт глееватой дерново-подзолистой почвы на подошве склона с сильной рекреационной нагрузкой, который в силу описанных выше причин не так значительно отличается по своей плотности от фонового аналога с минимальной рекреационной нагрузкой (рис. 3.6.2.В). Резкое нарастание плотности на глубине 10–15 см способствует устойчивому застою влаги в верхних 10 см ее профиля (см. рис. 3.6.1.В).

Сезонная динамика плотности сложения, как правило, не превышает  $0,1 \text{ г/см}^3$ , следуя известной закономерности понижения плотности сложения почвы при ее увлажнении-набухании и промерзании-растрескивании [Сапожников и др., 1992; Скворцова, Сапожников, 1998; «Теории и методы ...», 2007]. Максимально она выражена в верхних горизонтах почвы на склоне с сильной рекреационной нагрузкой, которые характеризуются и сильно выраженной сезонной динамикой влажности с сильным высушиванием в августе (см. рис. 3.6.1.В). Склоновые почвы и почвы подошвы склона, при более низких значениях плотности сложения верхних горизонтов при минимальной рекреационной нагрузке, как правило, сильнее уплотняются (на  $0,25\text{--}0,3 \text{ г/см}^3$ ) при возрастании рекреационной нагрузки (табл. 3.6.1 и 3.6.2).

Анализ пространственной дифференциации по элементам двух склоновых катен и участкам с разным уровнем рекреационной нагрузки усредненных по сезону для верхних горизонтов в слое 0-15 см влажности и плотности сложения исследованных дерново-подзолистых почв показал статистически достоверные различия влажности и плотности почв со средним и сильным уровнем рекреационной нагрузки от фоновым почв (с минимальной нагрузкой), а в случае плотности сложения и между собой (табл. 3.6.3).

Таблица 3.6.1. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики плотности сложения ( $\text{г/см}^3$ ) 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
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	1.16±0.79	1.16±0.08	1.17±0.07	1.20±0.09	1.22±0.05	1.21±0.09	1.10±0.04
	Средняя	1.21±0.07	1.26±0.11	1.28±0.09	1.31±0.13	1.32±0.08	1.31±0.08	1.20±0.11
	Сильная	1.29±0.11	1.37±0.13	1.37±0.15	1.38±0.16	1.41±0.11	1.40±0.12	1,29±0.08
2022	Минимальная		1.12±0.08	1.12±0.08	1.22±0.11	1.25±0.09	1.22±0.04	1.11±0.11
	Средняя		1.23±0.11	1.24±0.11	1.33±0.07	1.35±0.12	1.32±0.06	1.21±0.09
	Сильная		1.32±0.14	1.33±0.12	1.41±0.14	1.44±0.14	1.41±0.15	1.30±0.09
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	1.17±0.07	1.18±0.07	1.19±0.08	1.22±0.07	1.39±0.09	1.32±0.1	1.24±0.07
	Средняя	1.12±0.06	1.34±0.08	1.35±0.11	1.38±0.08	1.42±0.12	1.28±0.09	1.26±0.06
	Сильная	1.32±0.07	1.49±0.06	1.51±0.06	1.53±0.07	1.45±0.06	1.35±0.08	1.31±0.07
2022	Минимальная		1.14±0.06	1.15±0.02	1.24±0.08	1.40±0.03	1.33±0.11	1.27±0.05
	Средняя		1.30±0.07	1.30±0.08	1.40±0.09	1.44±0.06	1.34±0.06	1.3±0.03
	Сильная		1.46±0.08	1.47±0.12	1.56±0.13	1.46±0.09	1.41±0.09	1.36±0.11
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	1.24±0.06	1.25±0.06	1.26±0.06	1.29±0.09	1.31±0.06	1.24±0.10	1.15±0.08
	Средняя	1.35±0.07	1.41±0.08	1.42±0.08	1.42±0.11	1.47±0.09	1.30±0.12	1.21±0.10
	Сильная	1.45±0.08	1.53±0.06	1.54±0.10	1.58±0.11	1.59±0.09	1.38±0.11	1.39±0.07
2022	Минимальная		1.21±0.07	1.21±0.06	1.31±0.09	1.34±0.07	1.30±0.09	1.22±0.07
	Средняя		1.37±0.08	1.37±0.07	1.47±0.08	1.50±0.06	1.41±0.09	1.32±0.07
	Сильная		1.49±0.07	1.49±0.09	1.44±0.07	1.62±0.12	1.49±0.11	1.40±0.05

Таблица 3.6.2. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики плотности сложения ( $\text{г/см}^3$ ) верхней части профиля (0-15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции.

Год	Нагрузка	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	1.16±0.79	1.16±0.08	1.17±0.07	1.20±0.09	1.22±0.05	1.21±0.09	1.10±0.04
	Средняя	1.21±0.07	1.26±0.11	1.28±0.09	1.31±0.13	1.32±0.08	1.31±0.08	1.20±0.11
	Сильная	1.29±0.11	1.37±0.13	1.37±0.15	1.38±0.16	1.41±0.11	1.40±0.12	1,29±0.08
2022	Минимальная		1.12±0.08	1.12±0.08	1.22±0.11	1.25±0.09	1.22±0.04	1.11±0.11
	Средняя		1.23±0.11	1.24±0.11	1.33±0.07	1.35±0.12	1.32±0.06	1.21±0.09
	Сильная		1.32±0.14	1.33±0.12	1.41±0.14	1.44±0.14	1.41±0.15	1.30±0.09
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	1.21±0.20	1.22±0.12	1.24±0.03	1.24±0.10	1.26±0.11	1.23±0.09	1.20±0.10
	Средняя	1.28±0.14	1.31±0.03	1.33±0.11	1.35±0.23	1.39±0.19	1.36±0.11	1.31±0.13
	Сильная	1.31±0.11	1.37±0.21	1.38±0.22	1.40±0.22	1.42±0.20	1.39±0.20	1.35±0.22
2022	Минимальная		1.22±0.21	1.25±0.10	1.27±0.20	1.31±0.10	1.30±0.06	1.28±0.07
	Средняя		1.32±0.17	1.35±0.12	1.38±0.11	1.41±0.22	1.39±0.09	1.36±0.12
	Сильная		1.40±0.13	1.40±0.14	1.43±0.30	1.46±0.22	1.42±0.21	1.38±0.22
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	1.28±0.09	1.30±0.14	1.32±0.16	1.32±0.09	1.35±0.22	1.28±0.14	1.25±0.11
	Средняя	1.33±0.20	1.35±0.11	1.36±0.11	1.37±0.18	1.41±0.20	1.38±0.09	1.33±0.14
	Сильная	1.33±0.08	1.37±0.20	1.37±0.21	1.42±0.22	1.60±0.31	1.48±0.17	1.36±0.19
2022	Минимальная		1.23±0.09	1.25±0.13	1.29±0.13	1.35±0.14	1.32±0.13	1.30±0.17
	Средняя		1.32±0.11	1.36±0.12	1.40±0.12	1.43±0.12	1.40±0.15	1.37±0.15
	Сильная		1.41±0.19	1.42±0.18	1.47±0.19	1.65±0.05	1.54±0.09	1.42±0.23

Таблица 3.6.3 - Пространственная дифференциация по элементам склоновой катены и участкам с разным уровнем рекреационной нагрузки влажности и плотности сложения исследованных дерново-подзолистых почв, усредненных по сезону для верхних горизонтов в слое 0–15 см.

Уровень рекреационной нагрузки	Влажность почвы, %			Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>		
	ВМХ	ССВ	ПСВ	ВМХ	ССВ	ПСВ
Минимальный	21,3±2,0	26,1±2,2 <sup>a</sup>	31,1±2,7 <sup>a</sup>	1,28±0,03	1,21±0,02 <sup>a</sup>	1,20±0,03 <sup>a</sup>
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:** <sup>a</sup> – значимость различий по сравнению с почвой на вершине моренного холма при  $P \leq 0,01$ ; значимость различий по сравнению с фоновой почвой (при минимальном уровне нагрузки): \* – значимы при  $P \leq 0,05$ ; \*\* – значимы при  $P \leq 0,01$ .

Различия по влажности верхних горизонтов почв статистически высоко достоверны при сравнении всех пар рассмотренных элементов склоновой катены между собой (табл. 3.6.3). По плотности сложения – только между участками склона (ССВ, ПСВ) и вершиной моренного холма (ВМХ). В случае влажности почвы различия максимально выражены между элементами рельефа. В случае плотности сложения – между участками с разным уровнем рекреационной нагрузки. Связанные с разным уровнем рекреационной нагрузки изменения влажности почв максимально выражены в дерново-подзолистых глееватых почвах на подошве склона, изменения плотности сложения – в дерново-подзолистых почвах на вершине холма.

Проведенный анализ сезонных изменения запасов почвенной влаги в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв с ростом рекреационной нагрузки на почвы в условиях контрастных элементов склонового мезорельефа показал высоко достоверные статистические отличия запасов почвенной влаги в весенние и летние месяцы в дерново-подзолистых глееватых почвах на подошве склона от дерново-подзолистых почв на вершине холма (табл. 3.6.4). В почвах склона они достоверны в мае-июне и сентябре.

Таблица 3.6.4 – Сезонные изменения запасов влаги в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв с ростом на них рекреационной нагрузки в условиях склонового мезорельефа (<sup>a</sup> – значимые при P≤0,01 различия с почвой на вершине моренного холма, <sup>b</sup> – значимые при P≤0,01 различия с фоновой почвой при минимальном уровне нагрузки)

Ключевой участок	Уровень нагрузки	Глубина, см	Запасы воды, мм по исследуемым слоям											
			Апрель		май		июнь		июль		август		сентябрь	
Вершина моренного холма	Минимальный	0-5	14,36		11,67		10,75		9,84		9,01		13,52	
		5-10	17,70		15,55		13,91		12,61		11,03		16,87	
		10-15	24,80	56,86	22,54	49,77	20,08	44,74	17,08	39,54	15,33	35,37	22,11	52,49
	Средний	0-5	13,67		12,06		10,30		9,80		8,17		12,24	
		5-10	17,37		15,29		14,22		12,71		10,86		16,19	
		10-15	25,27	56,32	21,84	49,19	19,92	44,43	16,72	39,23	14,75	33,78	23,45	51,88
	Сильный	0-5	13,20		12,60		10,83		9,75		7,87		11,06	
		5-10	18,20		15,19		12,90		12,11		10,13		13,00	
		10-15	24,24	55,64	21,22	49,00	20,08	43,82	16,73	38,60	14,57	32,57	19,74	43,80 <sup>b</sup>
Средняя часть склона северо-восточной экспозиции	Минимальный	0-5	17,39		17,16		10,27		9,76		8,40		14,34	
		5-10	19,63		19,32		19,13		14,44		13,01		19,12	
		10-15	24,33	61,35	24,34	60,83 <sup>a</sup>	23,41	52,81 <sup>a</sup>	18,63	42,83	17,05	38,46	26,40	59,86 <sup>a</sup>
	Средний	0-5	15,93		15,50		10,77		9,46		7,86		10,80	
		5-10	18,43		19,50		18,38		12,50		10,84		13,05	
		10-15	25,95	60,31	25,13	60,13	23,06	52,21	19,55	41,51	17,68	36,39	21,89	45,73 <sup>b</sup>
	Сильный	0-5	16,40		15,70		12,51		9,28		7,99		8,97	
		5-10	19,00		20,02		17,76		12,87		11,70		12,40	
		10-15	22,82	58,22	23,86	59,58	21,58	51,85	18,86	41,02	18,18	37,86	18,44	39,81 <sup>b</sup>
Подошва склона северо-восточной экспозиции	Минимальный	0-5	21,17		20,23		10,75		10,37		9,04		9,65	
		5-10	23,32		21,93		18,34		16,85		15,56		18,42	
		10-15	29,37	73,86 <sup>a</sup>	28,18	70,33 <sup>a</sup>	24,18	53,27 <sup>a</sup>	22,78	50,00 <sup>a</sup>	21,27	45,87 <sup>a</sup>	23,81	51,87
	Средний	0-5	20,31		17,24		11,21		10,03		9,74		8,40	
		5-10	24,33		21,75		17,66		16,63		15,68		15,88	
		10-15	28,41	73,05	30,47	69,46	22,32	51,18	21,56	48,21	20,02	45,43	17,70	41,98 <sup>b</sup>
	Сильный	0-5	18,98		14,15		10,55		9,40		7,86		8,07	
		5-10	21,95		20,29		15,98		15,07		14,55		13,45	
		10-15	30,58	71,50	27,82	62,26 <sup>b</sup>	24,18	50,72	23,51	47,99	22,84	45,25	19,78	41,30 <sup>b</sup>

С ростом рекреационной нагрузки связано преимущественно статистически недостоверное снижение запасов почвенной влаги в слое 0-15 см исследованных почв. Исключение составляют статистически достоверное снижение майского запаса почвенной влаги в почве на подошве склона с сильным уровнем рекреационной нагрузки и сентябрьского запаса почвенной влаги в почвах на вершине моренного холма со средним уровнем рекреационной нагрузки, на средней части и подошве склона – со средним и сильным уровнем рекреационной нагрузки (максимально выраженное в почве склона).

Отмеченные закономерности 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.

Таким образом, проведенные в весенне-летне-осеннем сезоне мониторинговые наблюдения за сезонной динамикой влажности, плотности сложения и запасов влаги в верхних горизонтах дерново-подзолистых почв контрастных элементов представительной склоновой катены лесных экосистем с различных уровнем рекреационной нагрузки в условиях Северного округа Москвы показали их повышенную пространственно-временную изменчивость:

1. В весенние месяцы (апрель – май) влажность гумусово-аккумулятивного горизонта в почве с минимальным уровнем рекреационной нагрузки на подошве склона северо-восточной экспозиции (ПСВ) была устойчиво в 1,8 раза выше, чем в аналогичной почве на вершине моренного холма (ВМХ).

2. В летние месяцы ярко выражен общий тренд на качественное снижение влажности верхних горизонтов исследованных почв – с максимальным проявлением в почве на подошве склона, с быстрым высушиванием гумусово-аккумулятивного горизонта до уровня влажности почвы на склоне при минимальных отличиях (в 2%) от почвы моренного холма. Нижележащие

горизонты проявляют гораздо более высокую устойчивость к высыханию, при возрастании степени дифференциации профиля влажности в верхних горизонтах дерново-подзолистой глееватой почвы на ПСВ до 1,8–2 раз.

3. Общий характер сезонной динамики влажности верхних горизонтов исследованных почв участков с выраженной рекреационной нагрузкой близок фоновой почве, но отличается от нее устойчиво более низкими значениями влажности, четко выраженным снижением влажности уже в мае и заметным только в октябре осенним увеличением влажности.

4. Повышенная чувствительность к выраженной рекреационной нагрузке сезонной динамики влажности дерново-подзолистых глееватых почв на подошве исследованного склона обуславливает необходимость более четкой экологической регламентации допустимого для таких почв уровня рекреационной нагрузки – особенно в наиболее влажные весенние месяцы.

5. Традиционно повышенной чувствительностью к уровню рекреационной нагрузки характеризуется плотность сложения верхних горизонтов почв, что очень четко проявилось и в случае данных экосистем Лесной Опытной Дачи: на участках со средним уровнем рекреационной нагрузки плотность сложения большинства верхних горизонтов на 0,1–0,2 г/см<sup>3</sup> выше плотности аналогичных горизонтов фоновых почв с минимальной рекреационной нагрузкой.

6. Четко выражена пространственная дифференциация плотности сложения почв по склону: с максимальными значениями плотности в наиболее сухой почве вершины моренного холма и с «пошаговым» снижением плотности примерно на 0,05 г/см<sup>3</sup> при переходе к почве на средней части склона и его подошве. Возможно, это связано с сильнее выраженным эффектом сезонного разуплотнения в циклах увлажнения-набухания и промерзания-растрескивания педов верхних почвенных горизонтов в условиях их повышенной влажности.

7. 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/см<sup>3</sup>) при возрастании рекреационной нагрузки.

8. Связанные с разным уровнем рекреационной нагрузки изменения влажности почв максимально выражены в дерново-подзолистых глееватых почвах на подошве склона, изменения плотности сложения – в дерново-подзолистых почвах на вершине холма.

9. 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 рекреационной 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.

10. 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 безопасной 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.



В условиях 2022 года с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков на площадках с минимальным и средним уровнем рекреационной нагрузки наблюдается хорошо выраженная сезонная динамика актуальной кислотности гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтов (на 0,5-0,7 единиц рН): с четко выраженным трендом сезонного подкисления в середине лета – на фоне слабее выраженной (по сравнению с предыдущим годом) дифференциации актуальной кислотности гумусово-аккумулятивного и элювиального горизонтов.

В случае обменной кислотности профильная дифференциация выражена значительно лучше, и разница в значениях рН<sub>КСЛ</sub> гумусово-аккумулятивных и элювиальных горизонтов летом может превышать 1,5 единицы рН (рис. 4.1.2). Сезонная динамика обменной кислотности максимально выражена в случае элювиального горизонта на площадке с сильной рекреационной нагрузкой: изменения в пределах 1 рН, т.е. на порядок активности катионов водорода. Значения рН<sub>КСЛ</sub> в 2022 году с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков, в большинстве случаев, на 0,3–0,6 единицы рН) ниже по сравнению с предыдущим, более влажным, годом (рис. 4.1.2).

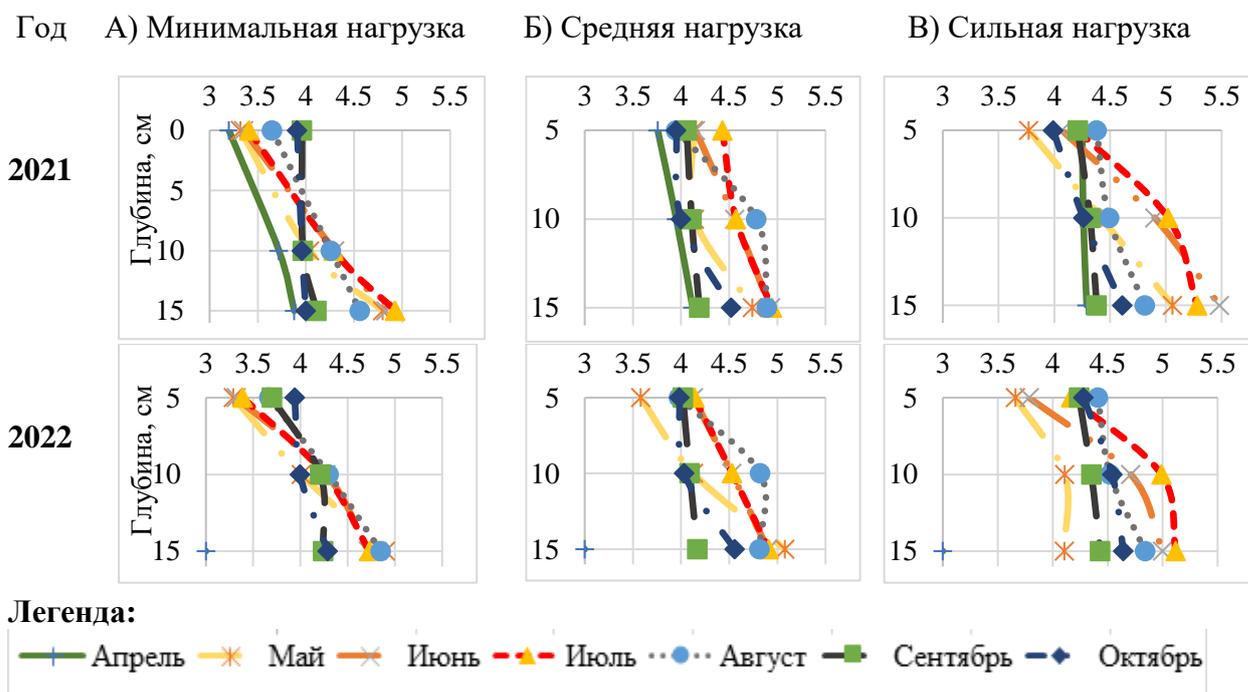


Рисунок 4.1.2. Изменение обменной кислотности почв (рН<sub>КСЛ</sub>) на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Сезонная динамика значений  $pH_{KCL}$  демонстрирует доминирующий тренд значительного понижения обменной кислотности (при более высоких значениях  $pH_{KCL}$ ) в летние месяцы – при возрастании диапазона динамики на площадке с сильной рекреационной нагрузкой.

Результаты мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости содержания аммония в ходе основного сезона вегетации показали его четкую профильную дифференциацию: с доминирующим перепадом значений при переходе от гумусово-аккумулятивного и аккумулятивно-элювиального горизонтов к элювиальному в 5-10 мг/кг – при ярко выраженной (вплоть до 2-кратной) сезонной динамике с минимальными значениями в августе (рис. 4.1.3).

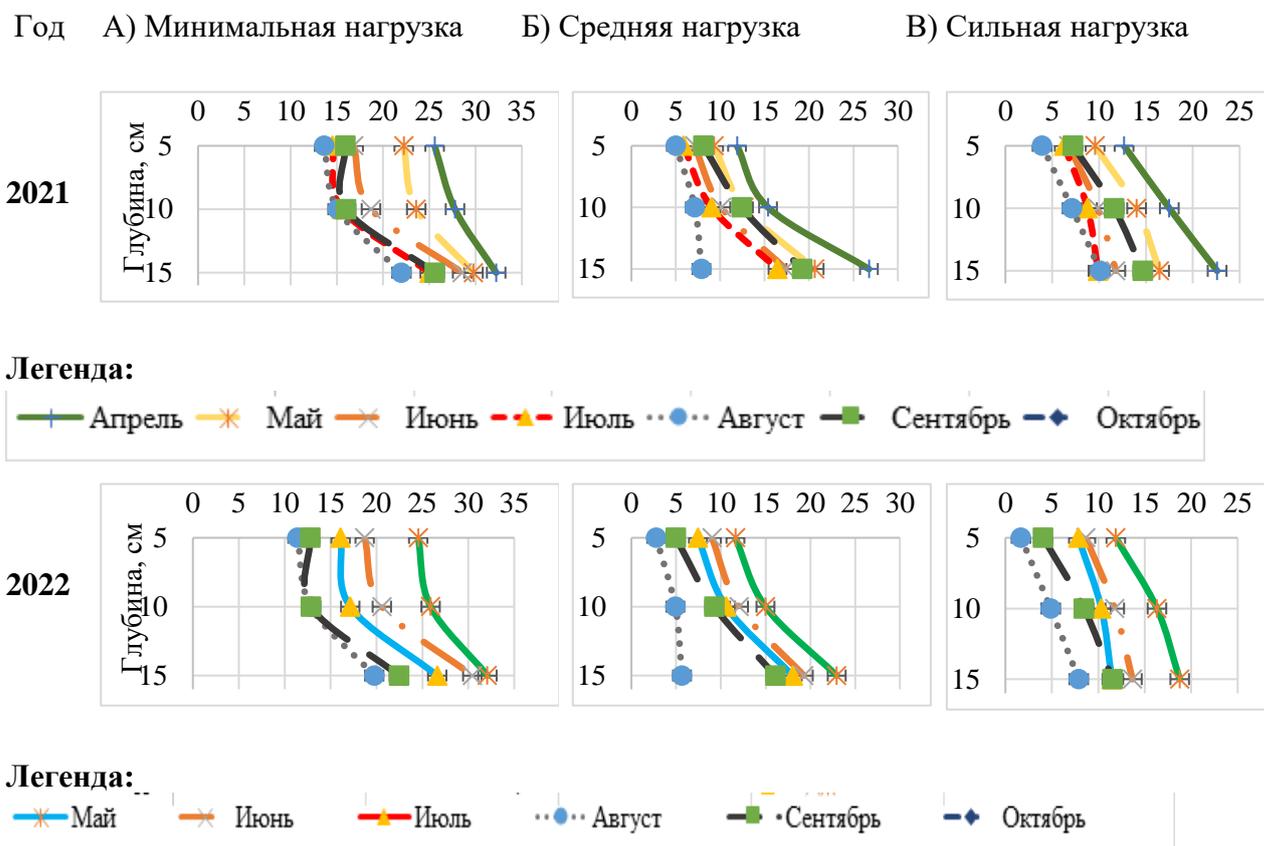


Рисунок 4.1.3. Изменение содержания аммония (мг/кг) в верхних горизонтах почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Возрастание рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня сопровождается резким снижением содержания обменного аммония – вплоть

до 2-кратного в гумусово-аккумулятивных горизонтах (0–5 см). В условиях 2021 года с повышенным на 20% относительно среднеголетних значений количеством осадков отмечается небольшое повышение содержания аммония – на 2–5 мг/кг. Максимальное содержание аммония характерно для апреля-мая (рис. 4.1.3) – после его активного осенне-зимне-ранневесеннего поступления из разлагающихся опада и растительных остатков.

Среднее значение содержания нитрат-аниона в верхних почвенных горизонтах исследуемых почв, как правило, в 5–10 раз ниже, чем аммония, но основные закономерности их пространственно-временной изменчивости очень близки: преобладание 2-кратной дифференциации по профилю, 2-3-кратной динамики по сезону основной вегетации с апрельско-майским максимумом и минимальными значениями в августе, снижение содержания нитратов по мере возрастания рекреационной нагрузки (рис. 4.1.4).

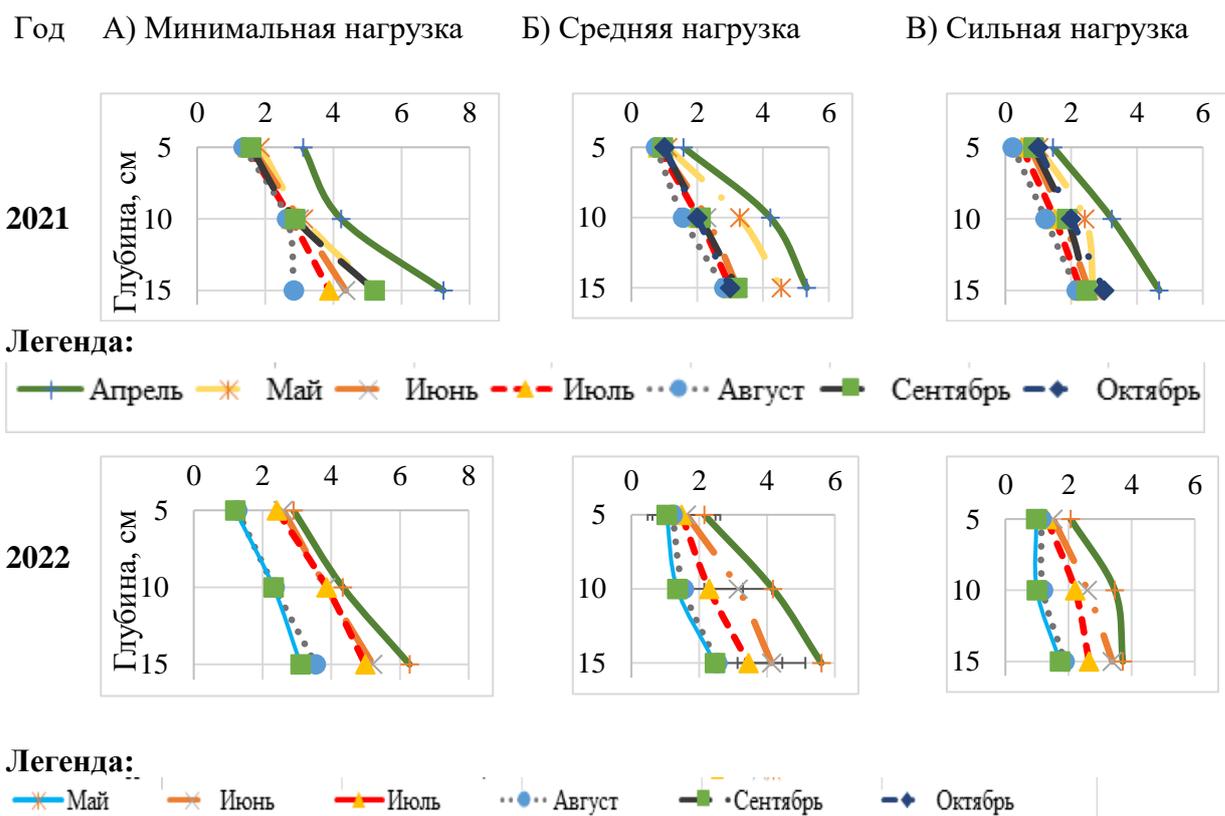


Рисунок 4.1.4. Изменение содержания нитрат-аниона (мг/кг) в верхних горизонтах почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Профильное распределение содержания подвижного фосфора в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв, в отличие от ранее рассмотренных форм минерального азота ( $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_3^-$ ), имеет в разной степени выраженный аккумулятивный характер с максимумом в гумусово-аккумулятивном горизонте и, как правило, резким снижением содержания подвижного фосфора (на 30-90 мг/кг) на площадках со средним и, особенно, сильным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.1.5).

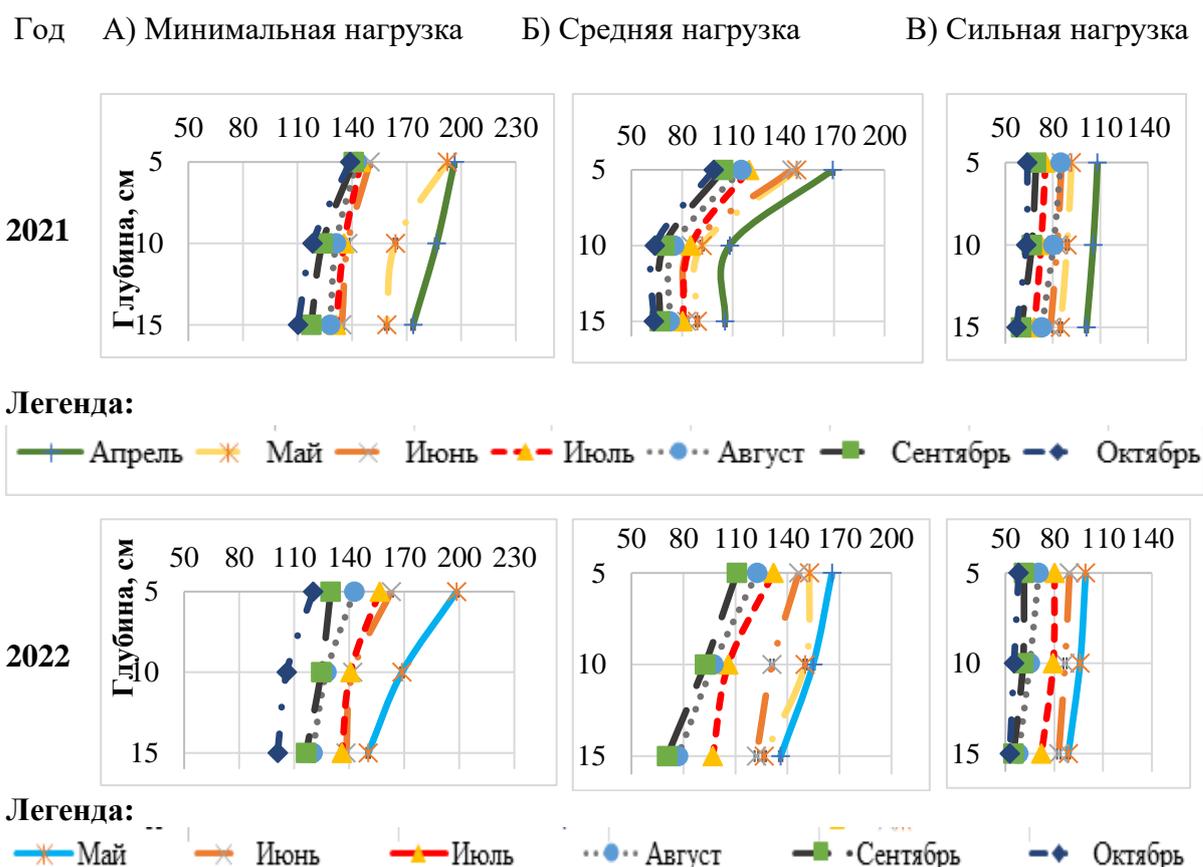


Рисунок 4.1.5. Изменение содержания подвижного фосфора (мг/кг) в верхних горизонтах почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Хорошо выражена сезонная динамика содержания подвижного фосфора: с летним минимумом в августе на 40–90 мг/кг ниже его весеннего максимума в апреле-мае (рис. 4.1.5).

Близкие закономерности пространственно-временной изменчивости содержания наблюдаются и при анализе подвижного калия: в разной степени

выраженный аккумулятивный характер профильного распределения с максимумом в гумусово-аккумулятивном горизонте и, как правило (за исключением площадки с сильной рекреационной нагрузкой), с резким снижением содержания подвижного калия (на 30–75 мг/кг) в ниже лежащих горизонтах (рис. 4.1.6).

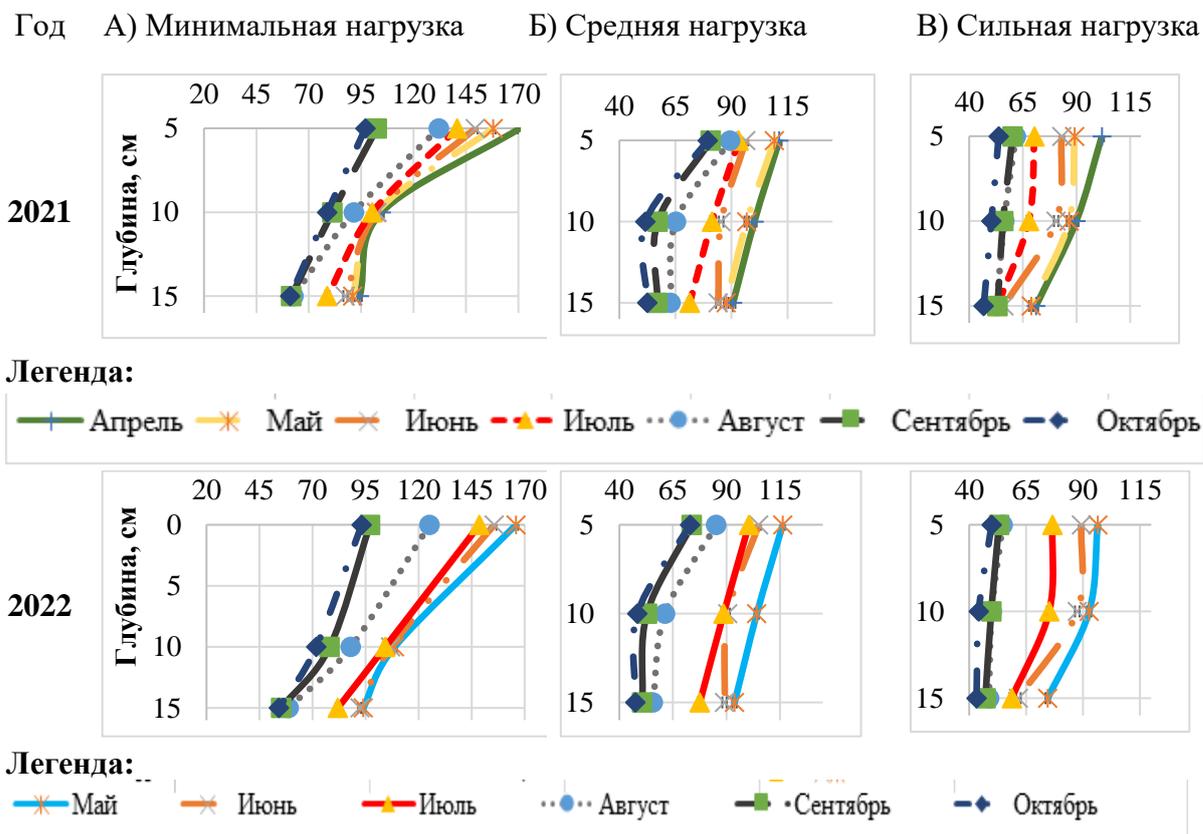


Рисунок 4.1.6. Изменение содержания подвижного калия (мг/кг) в верхних горизонтах почв на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Близкое по уровню проявления снижение содержания подвижного калия наблюдается в аналогичных почвенных горизонтах площадок со средним и сильным уровнем рекреационной нагрузки и в ходе сезонной динамики его содержания: с октябрьским минимумом на 30–80 мг/кг ниже его весеннего максимума в апреле-мае – при минимальных различиях между годами с различным количеством осадков (рис. 4.1.6).

## 4.2 Изменение физико-химических и химических свойств почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости актуальной кислотности исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части склона северо-восточной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал выраженную дифференциацию актуальной кислотности их гумусово-аккумулятивных и элювиальных горизонтов (рис. 4.2.1).

В отличие от почв на вершине моренного холма эти почвы на склоне характеризуется более кислой (в среднем, на 0,5–0,7 единицы  $pH_{H_2O}$ ) реакцией среды гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтов (соответственно, в слоях 0–5 и 5–10 см), минимальными значениями  $pH_{H_2O}$  в весенний период (апрель-май) и более широким диапазоном (до 1,0  $pH_{H_2O}$ ) сезонной динамики актуальной кислотности – с максимальными отличиями от почв вершины моренного холма в 2022 году с близким к среднемуголетнему количеством осадков (рис. 4.2.1).

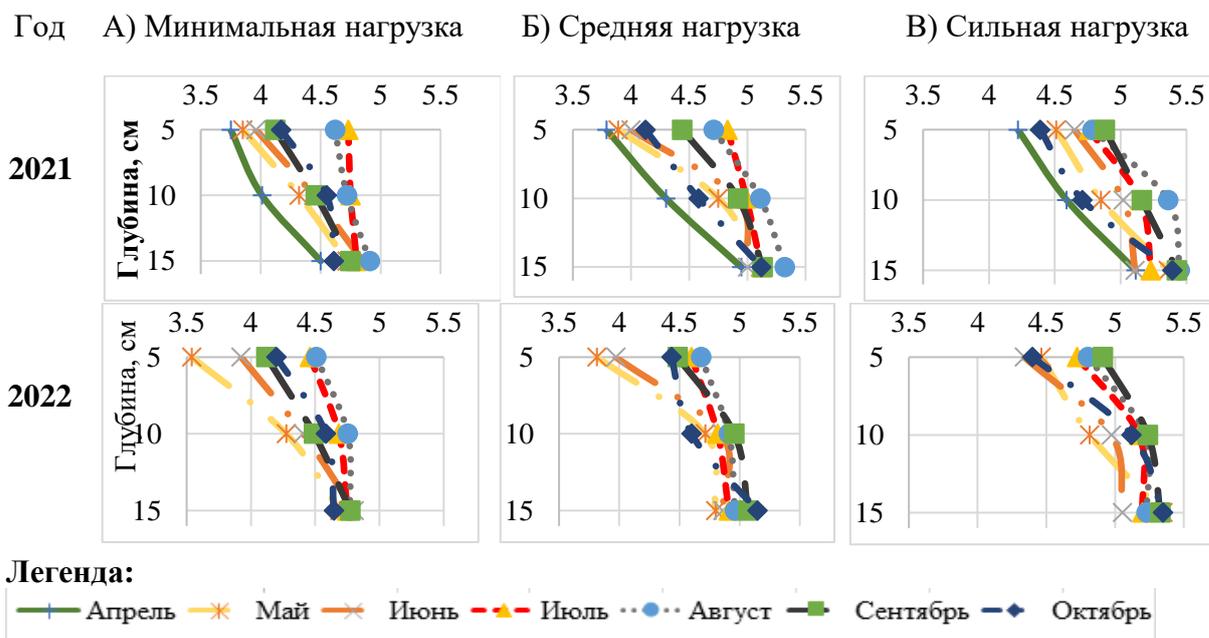


Рисунок 4.2.1. Изменение актуальной кислотности почв ( $pH_{H_2O}$ ) на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки



Важно отметить, что почвы средней части сабо выпуклого (почти прямого) склона северо-восточной экспозиции характеризуются несколько более высокими значениями содержания аммония (на 2–7 мг/кг) при слабее выраженной дифференциации по верхним горизонтам профиля и площадкам с разным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.2.3). Повышенное накопление подвижных форм элементов на выпуклых элементах склонов уже неоднократно отмечалось в литературе (Трофимов, 2010; Авилова и др., 2015).

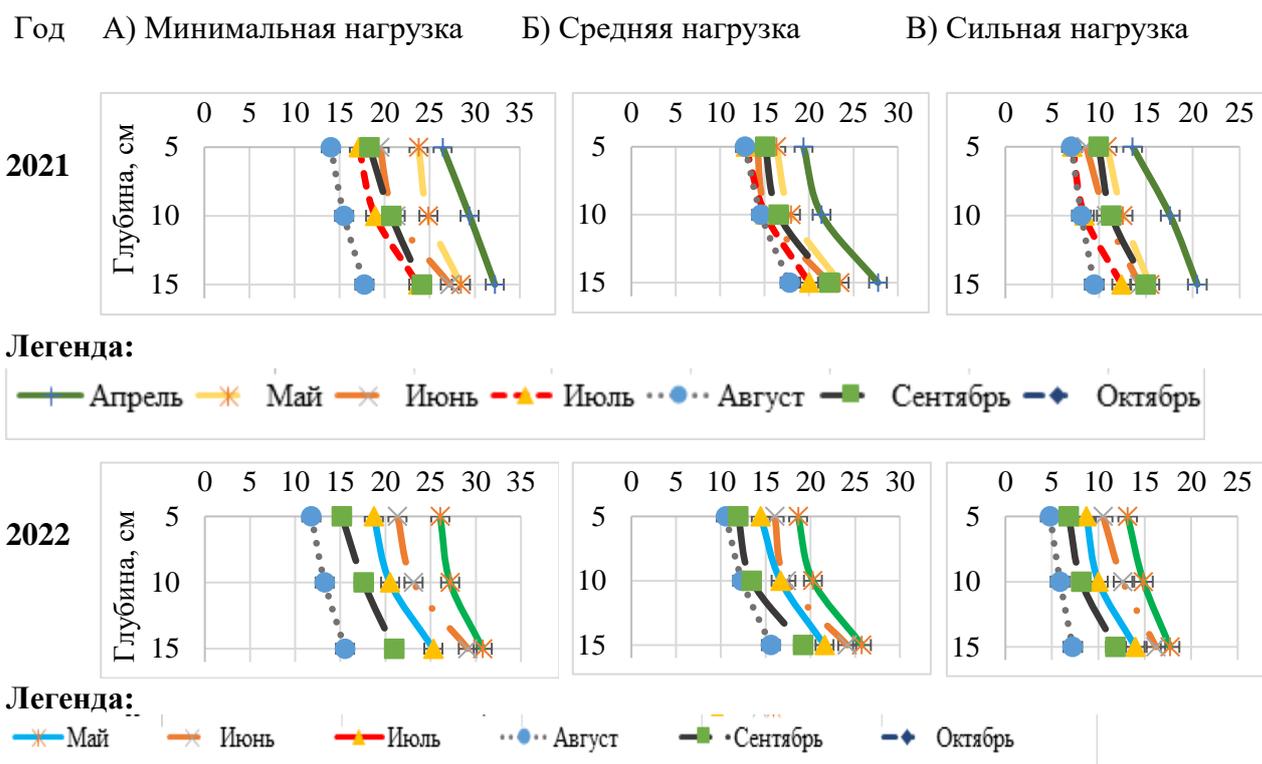


Рисунок 4.2.3. Изменение содержания аммония (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона с увеличением рекреационной нагрузки

Диапазон сезонной динамики содержания аммония максимально выражен на площадке с минимальной рекреационной нагрузкой: до 15 мг/кг с 2-кратным снижением весеннего максимума к сезонному минимуму в августе. На площадках с более высоким уровнем рекреационной нагрузки абсолютный диапазон несколько ниже, но может наблюдаться и 3-кратное сезонное снижение содержания аммония (рис. 4.2.3).

Среднее значение содержания нитрат-аниона в верхних почвенных горизонтах исследуемых почв, как и в случае почв на вершине моренного

холма, в 5–10 раз ниже, чем аммония, но основные закономерности их пространственно-временной изменчивости очень близки: преобладание 2-кратной дифференциации по профилю, поэтапное снижение содержания нитратов по мере возрастания рекреационной нагрузки, 2-3-кратная динамика по сезону основной вегетации с апрельским максимумом и минимальными значениями в августе 2021 года с повышенным количеством осадков (рис. 4.2.4). Отдельно следует отметить минимальное содержание нитратов в мае 2022 года с необычайно холодными для этого месяца условиями.

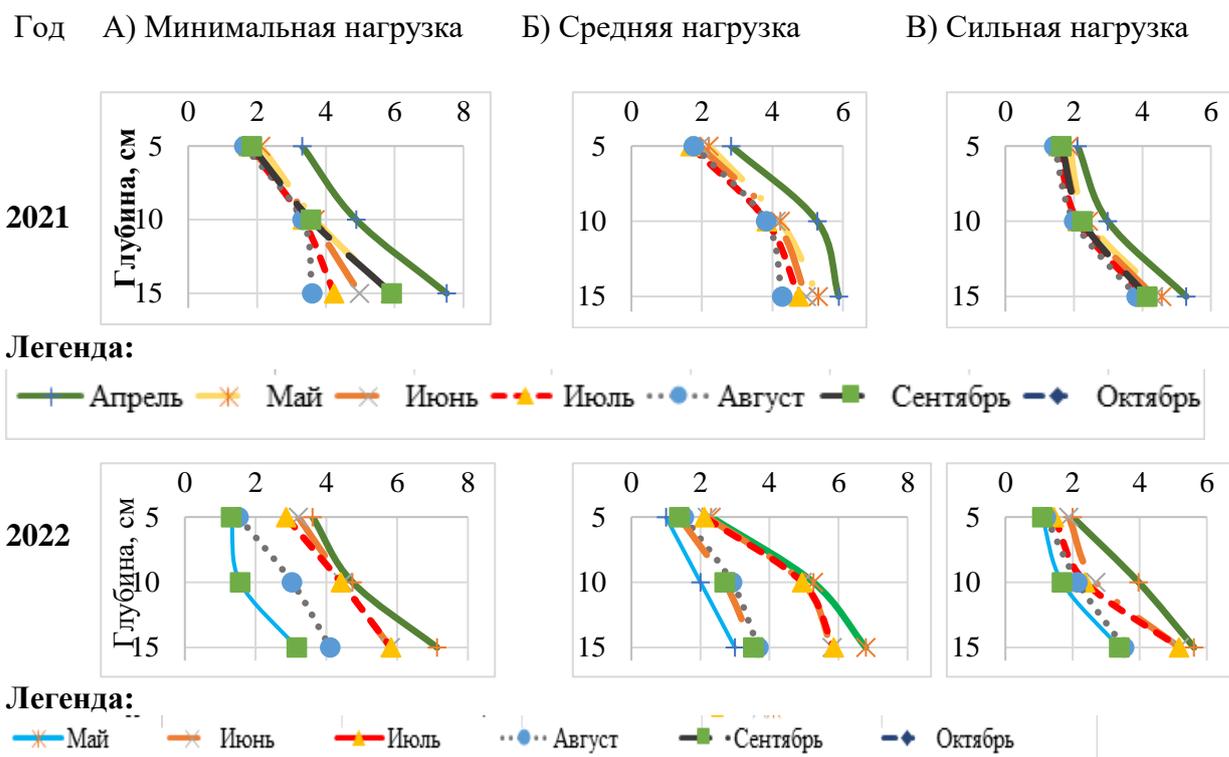


Рисунок 4.2.4. Изменение содержания нитрат-аниона (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Профильное распределение содержания подвижного фосфора в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части слабо выпуклого склона характеризуются аккумулятивным характером профиля (рис. 4.2.5) при значительно более высоких значениях его содержания по сравнению с соответствующими горизонтами почв на вершине моренного холма: на 10–30 мг/кг выше (см. рис. 4.1.5) – при лучшем сохранении содержания подвижного фосфора в почвах с рекреационной нагрузкой.

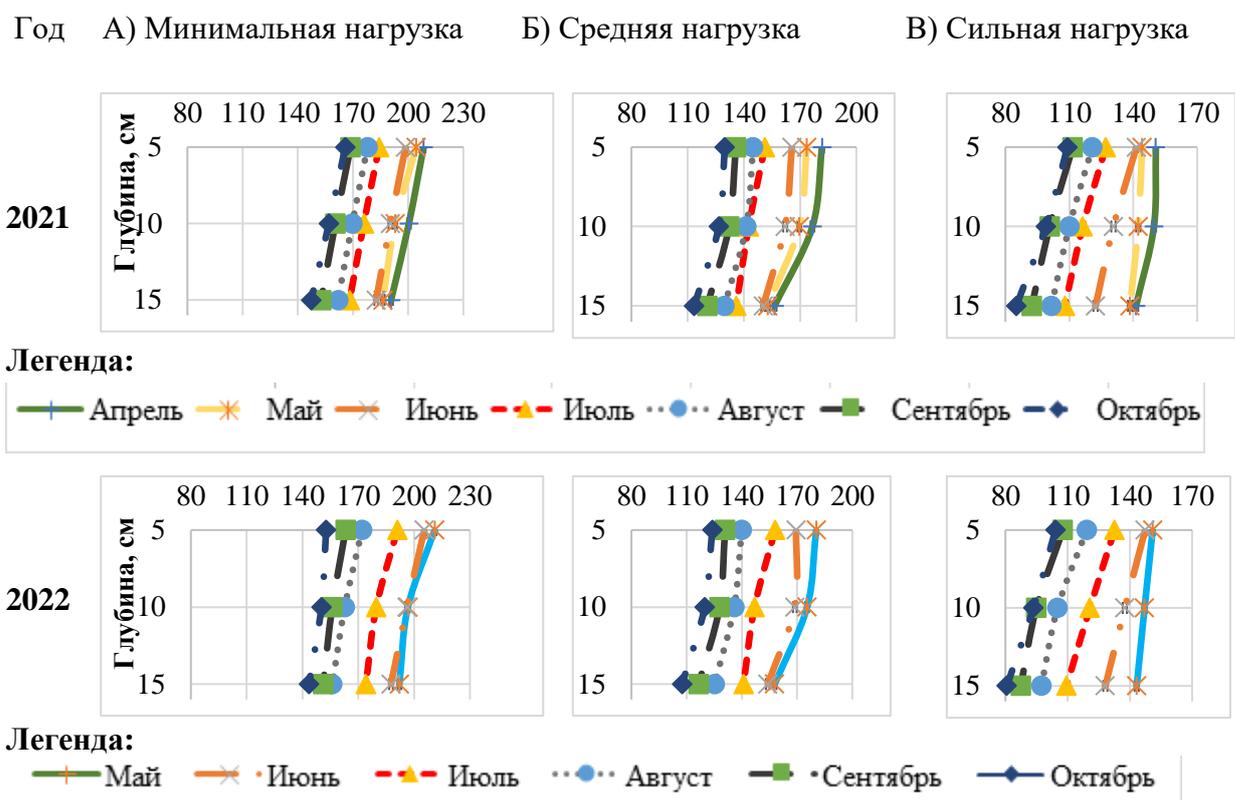


Рисунок 4.2.5. Изменение содержания подвижного фосфора (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Повышенное по сравнению с почвами вершины моренного холма содержание подвижного фосфора на площадках со средним и, особенно, сильным уровнем рекреационной нагрузки сопровождается значительным расширением диапазоны их сезонной динамики с максимальными значениями в апреле-мае и минимальными (в 1,5–1,8 раза ниже) – в августе-сентябре.

Близкие закономерности пространственно-временной изменчивости содержания наблюдаются и при анализе подвижного калия: в разной степени выраженный аккумулятивный характер профильного распределения с максимумом в гумусово-аккумулятивном горизонте и, как правило, резким снижением содержания подвижного калия (на 30–60 мг/кг) в ниже лежащих горизонтах (рис. 4.2.6) – но на фоне, в отличие от содержания подвижного фосфора, более низких в целом (на 10-45 мг/кг) значений содержания калия (см. рис. 4.1.6).

В условиях хорошо выраженной сезонной динамики содержания

подвижного калия (с преобладанием диапазона изменений в 40–60 мг/кг) обращает на себя внимание устойчивая приуроченность сезонного минимума содержания подвижного калия к августу-октябрю – при значительном сокращении диапазона сезонной динамики на площадках со средним и, особенно, сильным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.2.6).

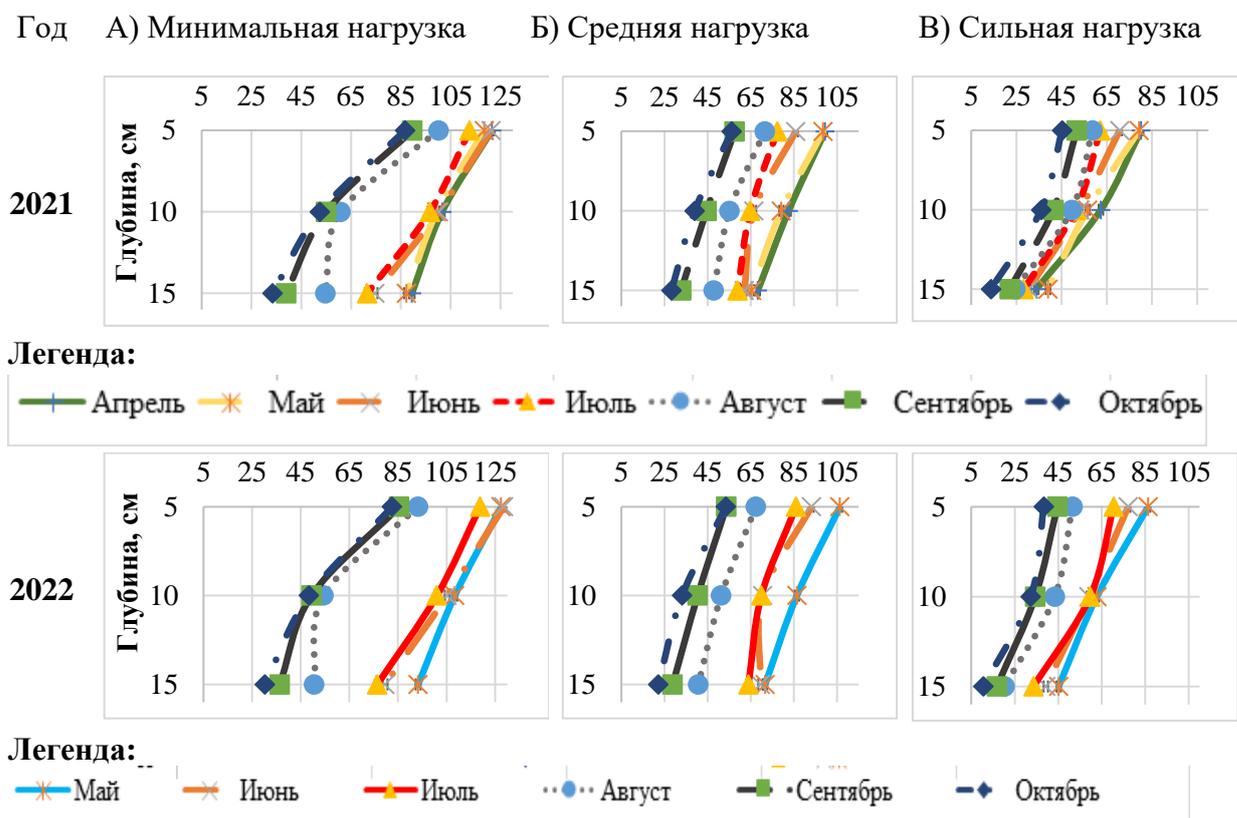


Рисунок 4.2.6. Изменение содержания подвижного калия (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

### 4.3 Изменение физико-химических и химических свойств почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости актуальной кислотности исследуемых дерново-подзолистых почв на подошве склона северо-восточной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал четкую дифференциацию актуальной кислотности верхних горизонтов почв в

пределах 0-15 см (рис. 4.3.1) – на фоне, в среднем, наиболее низких значений  $pH_{H_2O}$ , по сравнению с их аналогами в выше лежащих по склону почвах (на 0,3-1,0 единиц  $pH$ ) в условиях 2021 года с повышенным количеством осадков (см. рис. 4.1.1 и 4.2.1).

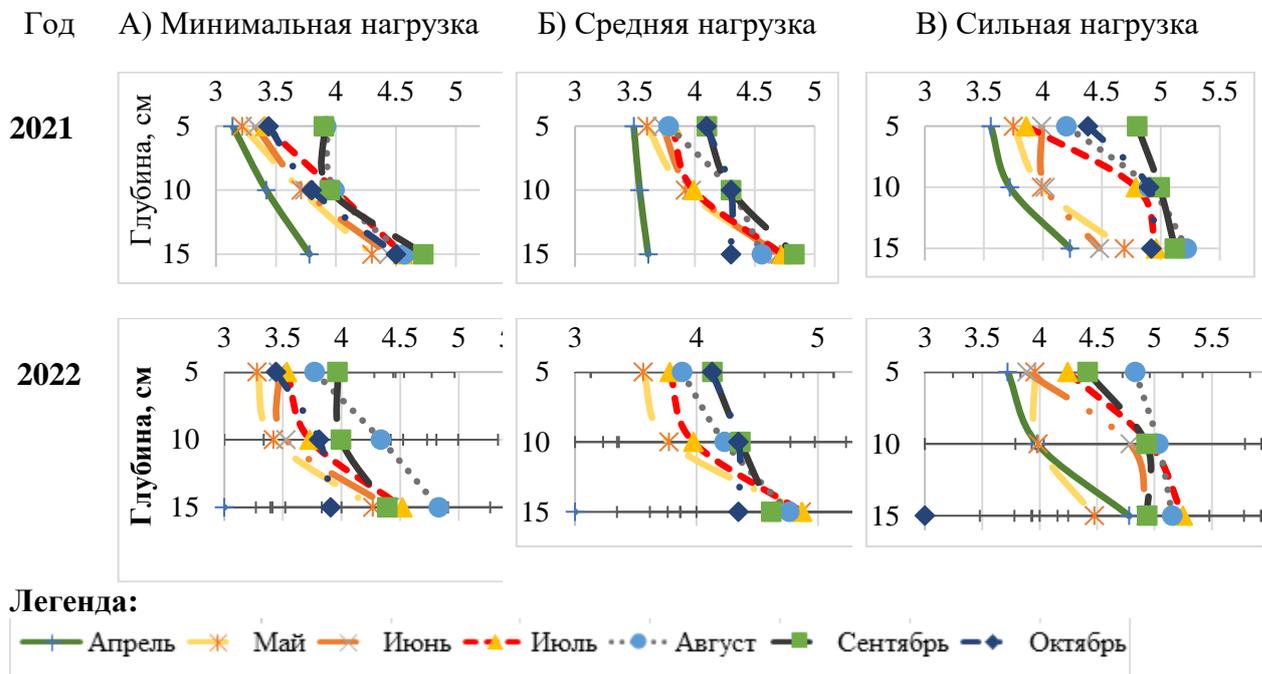


Рисунок 4.3.1. Изменение актуальной кислотности почв ( $pH_{H_2O}$ ) на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

При этом почвы на площадках со средней и, особенно, сильной рекреационной нагрузкой, как правило, характеризуются менее кислой реакцией при увеличенном (до 1,0-1,3 единиц  $pH$ ) диапазоне ее сезонной динамики с наиболее кислыми условиями в апреле-мае (после осенне-зимне-ранневесенней «промывки» верхних горизонтов почв на подошве склона) и постепенной частичной нейтрализации вплоть до августа или даже октября.

В случае обменной кислотности профильная дифференциация наиболее сильно выражена на площадке с сильным уровнем рекреационной нагрузки, где разница в значениях  $pH_{KCL}$  гумусово-аккумулятивных и элювиальных горизонтов летом может достигать 1,5 единицы  $pH$  (рис. 4.3.2). Сезонная динамика обменной кислотности максимально выражена в случае элювиального горизонта на площадке с сильной рекреационной нагрузкой: изменения в пределах 1,3 единицы  $pH$ , т.е. более порядка активности катионов

водорода. Значения  $pH_{KCL}$  в 2022 году с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков, в большинстве случаев, мало отличаются (на 0,1–0,2 единицы pH) от предыдущего, более влажного, года (рис. 4.3.2).

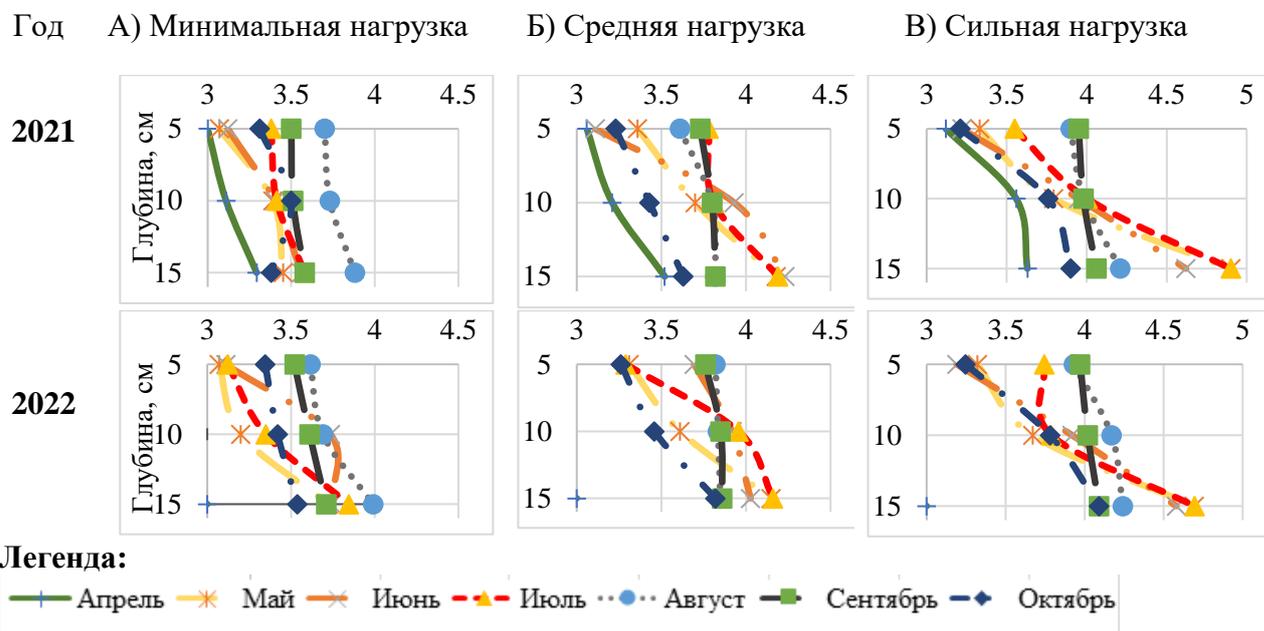


Рисунок 4.3.2. Изменение обменной кислотности почв ( $pH_{KCL}$ ) на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В сравнении со своими аналогами на выше лежащих ключевых участках почвы подошвы северо-восточного склона отличаются максимальным содержанием аммония (на 3–10 мг/кг) при сохранении элювиального типа дифференциации по верхним горизонтам профиля и площадкам с разным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.3.3).

Диапазон сезонной динамики содержания аммония максимально выражен на площадке с минимальной рекреационной нагрузкой: до 15 мг/кг с почти 2-кратным снижением весеннего максимума к сезонному минимуму в августе. На площадках с более высоким уровнем рекреационной нагрузки абсолютный диапазон сезонной динамики несколько ниже, но может наблюдаться и 3-кратное сезонное снижение содержания аммония – на площадке с сильным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.3.3).

Среднее значение содержания нитрат-аниона в верхних почвенных горизонтах исследуемых почв, как и в случае выше лежащих почв, в 5–10 раз ниже, чем аммония, но основные закономерности их пространственно-

временной изменчивости очень близки (рис. 4.3.4).

Год А) Минимальная нагрузка Б) Средняя нагрузка В) Сильная нагрузка

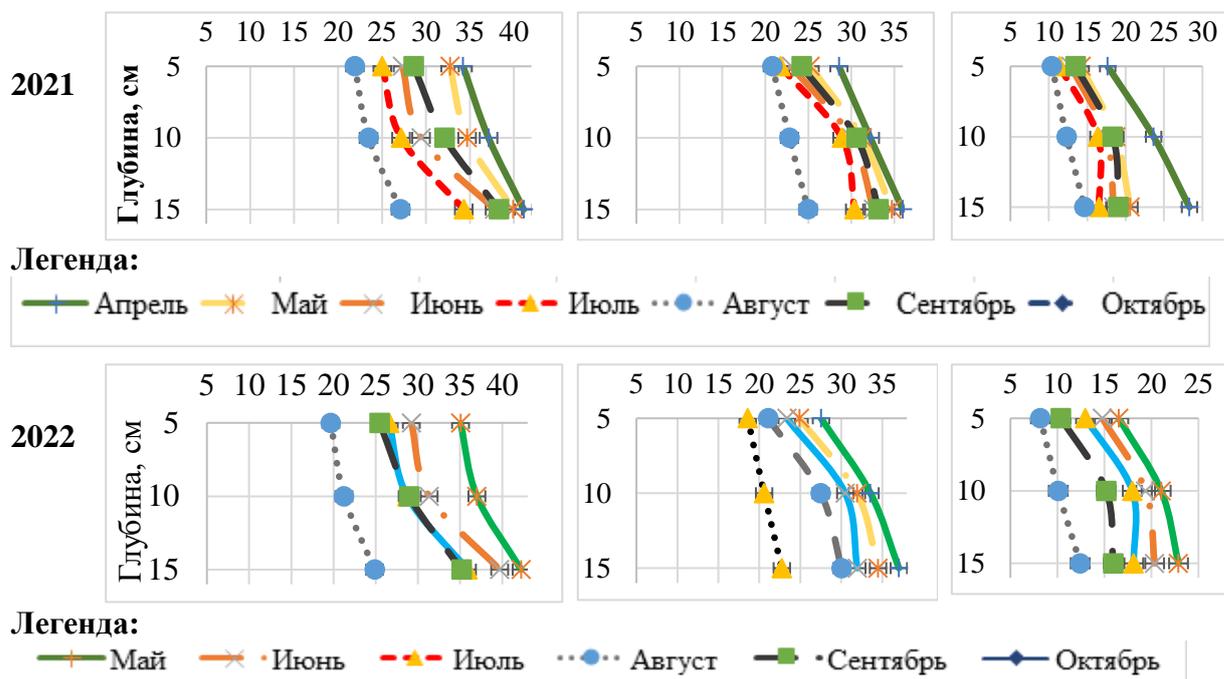


Рисунок 4.3.3. Изменение содержания аммония (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Год А) Минимальная нагрузка Б) Средняя нагрузка В) Сильная нагрузка

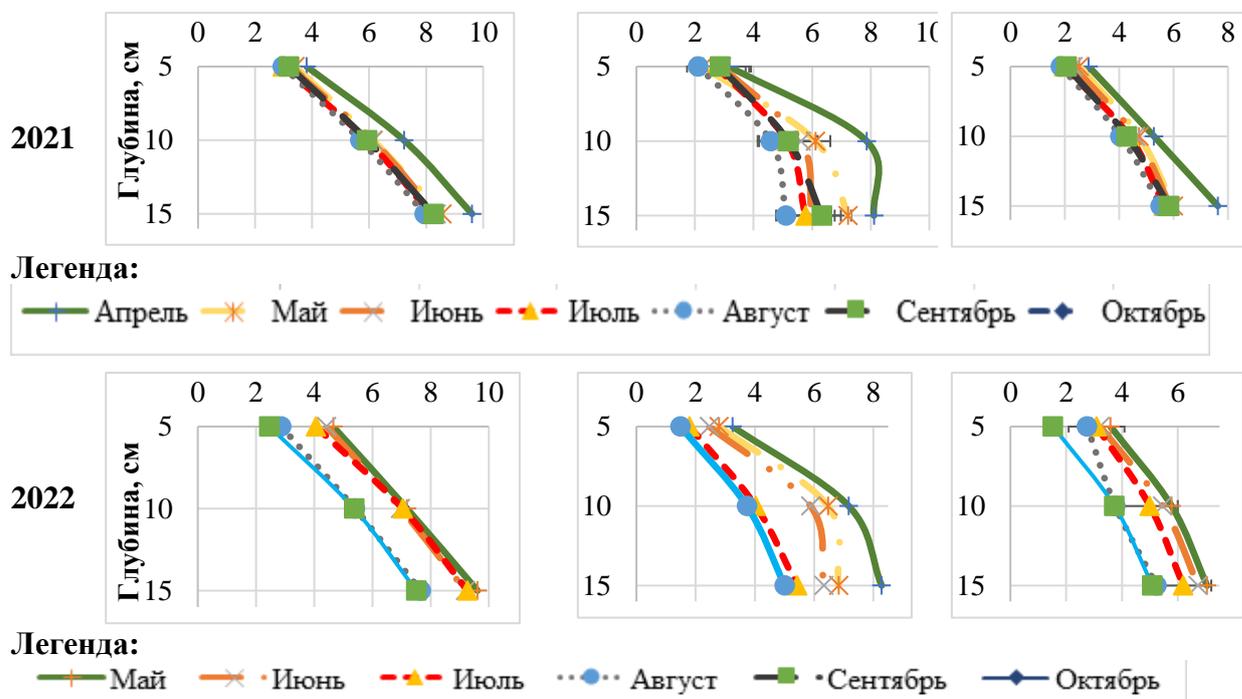


Рисунок 4.3.4. Изменение содержания нитрат-аниона (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

К локальным особенностям следует отнести преобладание более, чем 2-кратной дифференциации содержания нитратов в пределах верхних 15 см профиля исследуемых почв и слабее выраженное обеднение гумусово-аккумулятивного горизонта в почвах площадок со средним и сильным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.3.4).

Почвы на подошве склона северо-восточной экспозиции отличаются максимальным содержанием подвижного фосфора в верхних горизонтах: на площадках с минимальным и средним уровнем рекреационной нагрузки – на 30–60 мг/кг выше своих аналогов в выше лежащих почвах, при сохранении в разной степени выраженного аккумулятивного типа дифференциации по верхним горизонтам профиля на площадках с различной рекреационной нагрузкой (рис. 4.3.5). Увеличение уровня рекреационной нагрузки до сильного сопровождается резким снижением содержания подвижного фосфора – в 1.6–1.7 раза.

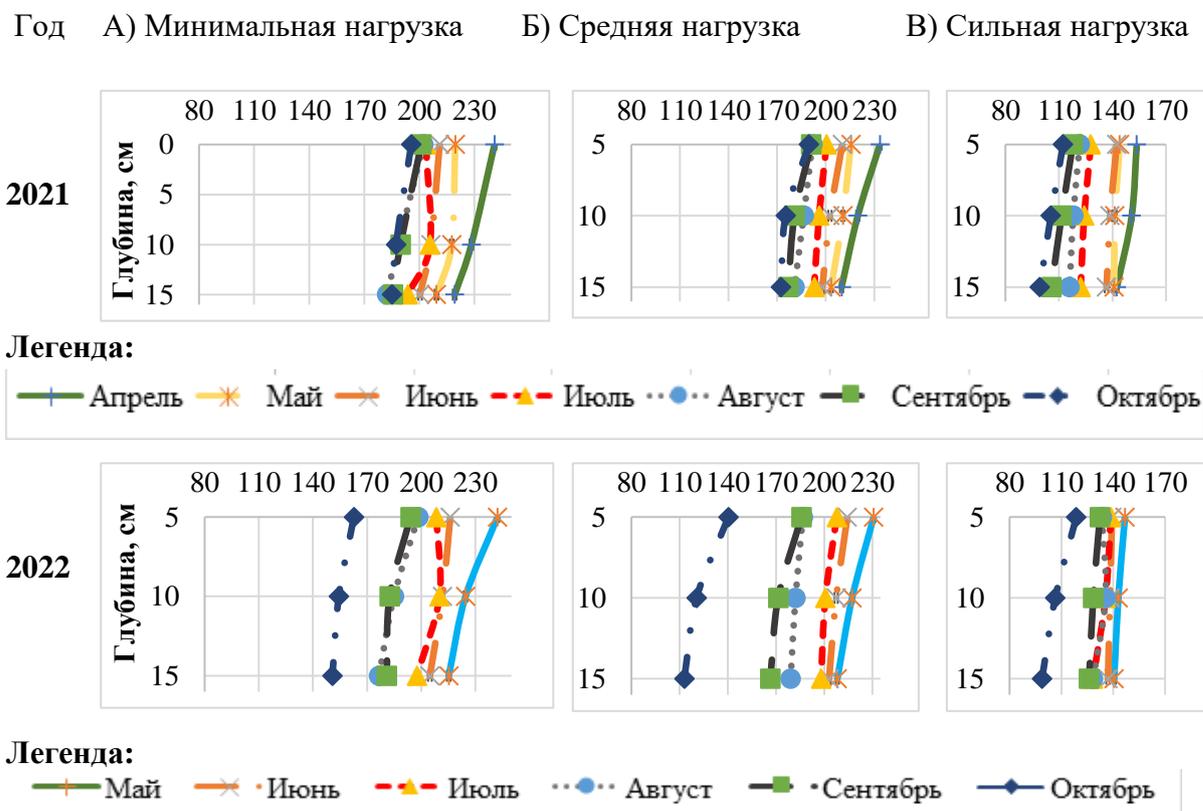


Рисунок 4.3.5. Изменение содержания подвижного фосфора (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В условиях 2022 года со среднемноголетним значением количества осадков диапазон сезонной динамики содержания подвижного фосфора значительно шире 2021 года с повышенным количеством осадков – при наиболее быстром снижении содержания подвижного фосфора в осенний период, с сохранением общего тренда на постепенное снижения содержания фосфора в верхних горизонтах почв с апреля-мая по сентябрь-октябрь (рис. 4.3.5).

Близкие закономерности пространственно-временной изменчивости содержания наблюдаются и при анализе подвижного калия: в разной степени выраженный аккумулятивный характер профильного распределения с максимумом в гумусово-аккумулятивном горизонте и, как правило, быстрым снижением содержания подвижного калия (на 20–40 мг/кг) в ниже лежащих горизонтах (рис. 4.3.6) – но на фоне, в отличие от содержания подвижного фосфора, существенно более низких (на 20-65 мг/кг) значений содержания калия по сравнению с выше лежащими почвами (см. рис. 4.1.6 и 4.2.6).

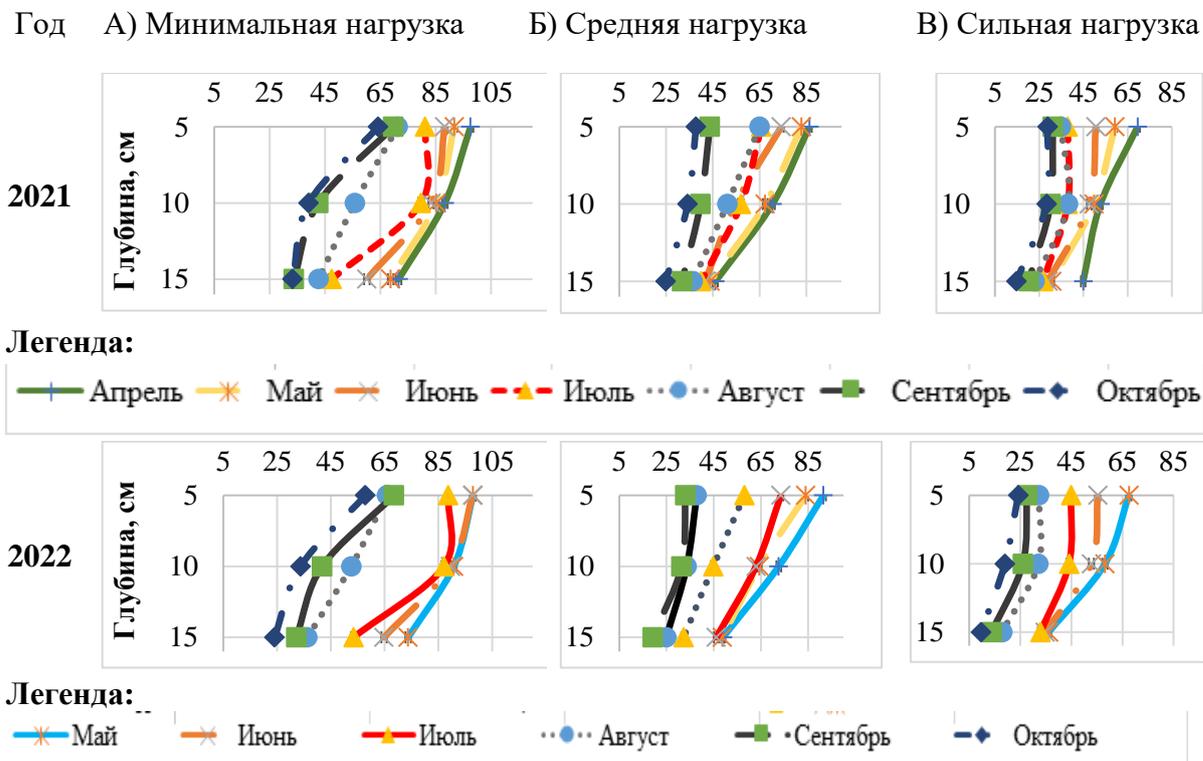


Рисунок 4.3.6. Изменение содержания подвижного калия (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

#### 4.4. Изменение физико-химических и химических свойств почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости актуальной кислотности исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части слабоогнутого склона юго-западной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показал, как правило, слабее выраженную, по сравнению с аналогичными почвами противоположного склона северо-восточной экспозиции (рис. 4.2.1), дифференциацию актуальной кислотности верхней части профиля (в пределах 0,5-0,8 единицы рН) – на фоне сокращенного до 0,5-0,7 единиц рН диапазона сезонной динамики  $pH_{H_2O}$  гумусово-аккумулятивных горизонтов и относительно расширенного – в случае элювиальных горизонтов (рис. 4.4.1).

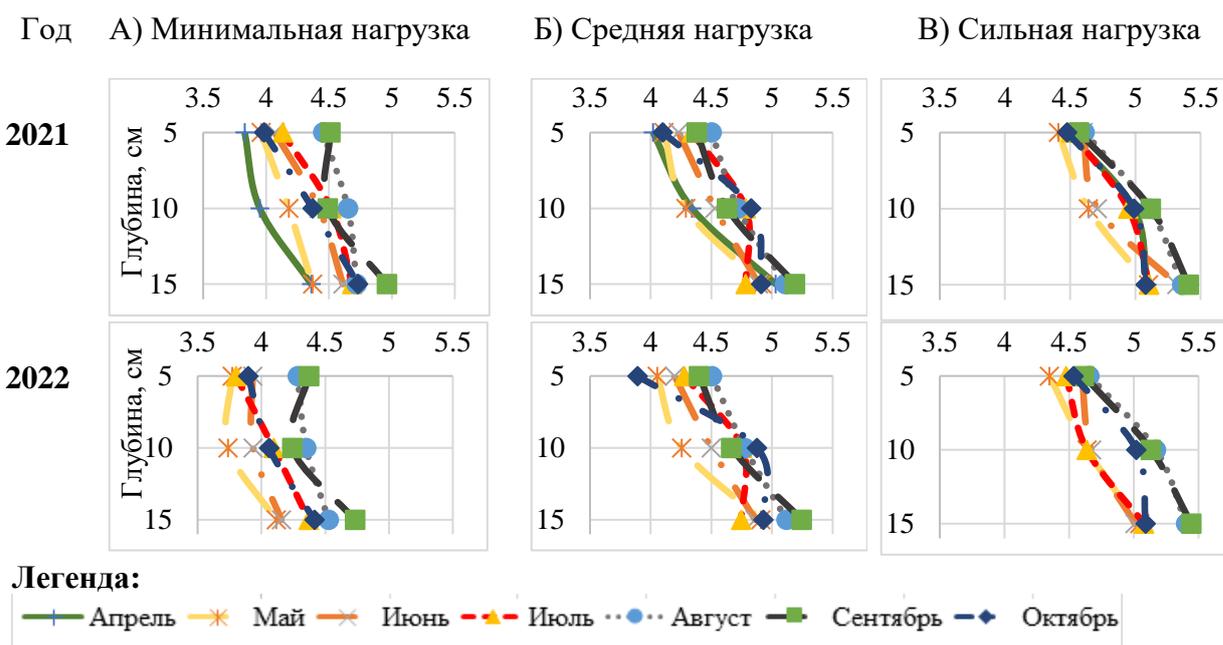


Рисунок 4.4.1. Изменение актуальной кислотности почв ( $pH_{H_2O}$ ) на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В отличие от почв противоположного склона холма (см. рис. 4.1.2) дерново-подзолистые почвы на средней части слабоогнутого склона юго-западной экспозиции характеризуются слабее выраженной профильной дифференциацией и сезонной динамикой обменной кислотности исследуемых

гумусово-аккумулятивных, аккумулятивно-элювиальных и элювиальных горизонтов в условиях сезона 2021 года с повышенным количеством осадков (рис. 4.4.2). Соответственно, перепады по слоям 0–5, 5–10 и 10–15 см составляют не более 0,3–0,4 единицы рН, сезонная динамика – с изменениями по горизонтам в пределах не более 0,5 единицы рН.

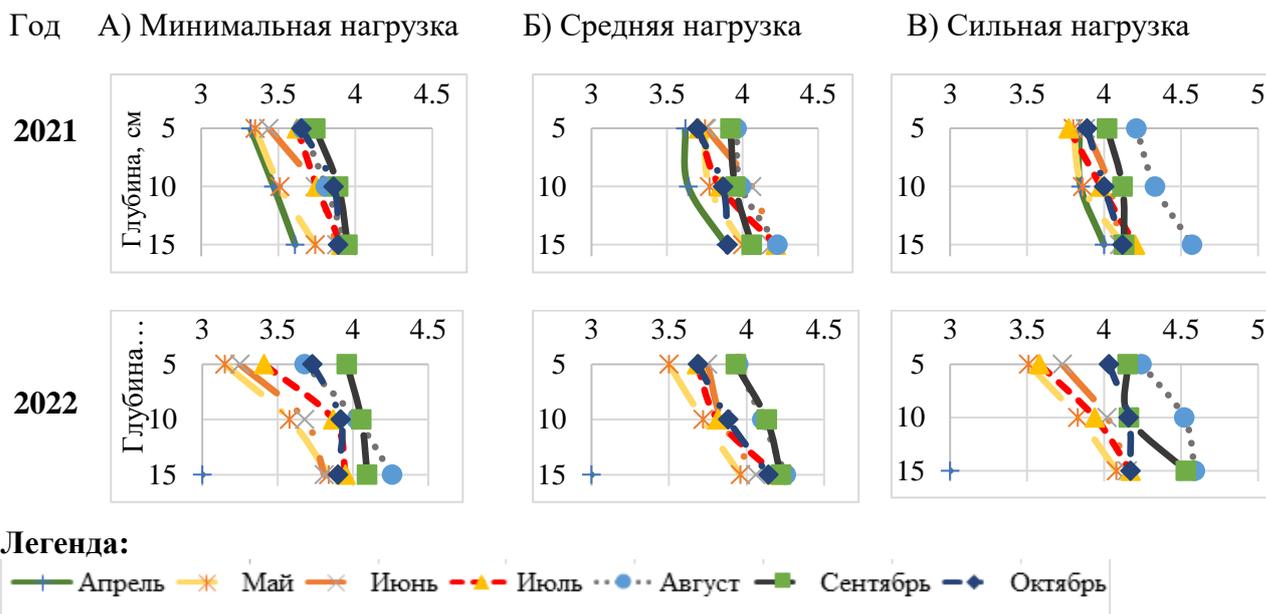


Рисунок 4.4.2. Изменение обменной кислотности почв ( $pH_{KCL}$ ) на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В условиях 2022 года с близким к среднеголетнему количеством осадков выраженность профильной дифференциацией и сезонной динамикой обменной кислотности существенно повышается: соответственно, до 0,6 и 0,8 (0,9) единицы рН – при сохранении доминирующего тренда постепенной относительной нейтрализации кислотности в течение сезона от максимальных значений обменной кислотности в апреле-мае (рис. 4.4.2). На площадках с сильным уровнем рекреационной нагрузки наблюдается осеннее подкисление после августовского максимума значений  $pH_{KCL}$ .

Почвы средней части слабовогнутого склона юго-западной экспозиции отличаются от почв противоположного склона (см. рис. 4.2.3) более высокими значениями содержания аммония (в среднем, на 2–7 мг/кг – рис. 4.4.3) при лучше выраженной элювиальной дифференциации по верхним горизонтам

профиля (до 13 мг/кг), площадкам с разным уровнем рекреационной нагрузки (до 8-13 мг/кг) и сезонной динамики (до 2-кратных изменений концентраций по горизонтам), с сохранением общего тренда на постепенное обеднение исследуемых горизонтов обменным аммонием после максимальных значений его концентраций в апреле-мае.

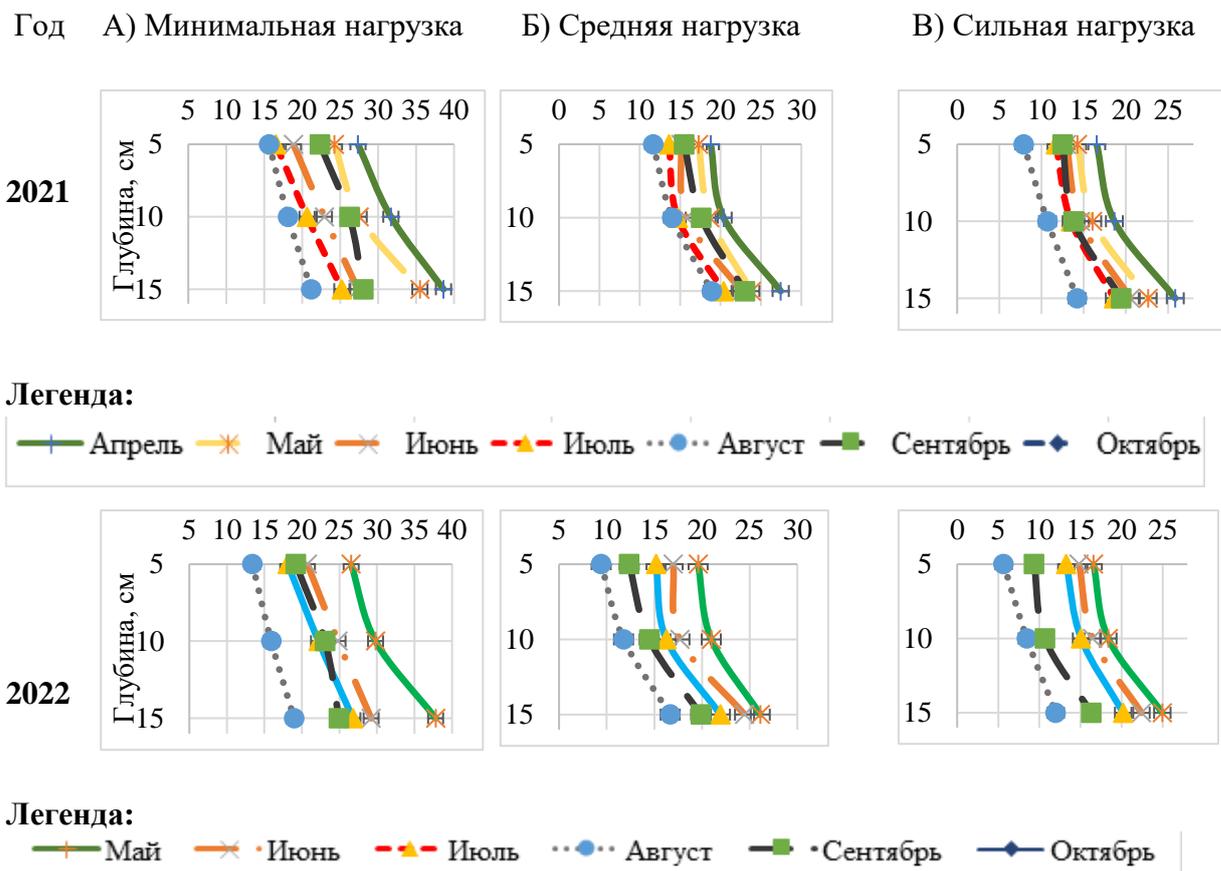


Рисунок 4.4.3. Изменение содержания аммония (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Среднее значение содержания нитрат-аниона в верхних почвенных горизонтах исследуемых почв (рис. 4.4.4), как и в случае почв на середине противоположного склона (см. рис. 4.2.4) и вершине моренного холма (см. рис. 4.1.4), кратно (в данном случае, в 4–6 раз) ниже, чем аммония, но основные закономерности их пространственно-временной изменчивости очень близки. Наблюдается преобладание 2–3-кратной дифференциации по профилю, поэтапное снижение содержания нитратов по мере возрастания рекреационной нагрузки и 2-кратная динамика по сезону основной вегетации

с апрельским максимумом и минимальными значениями в августе 2021 года с повышенным количеством осадков (рис. 4.4.4). Отдельно следует отметить минимальное содержание нитратов в мае 2022 года с необычайно холодными для этого месяца условиями.

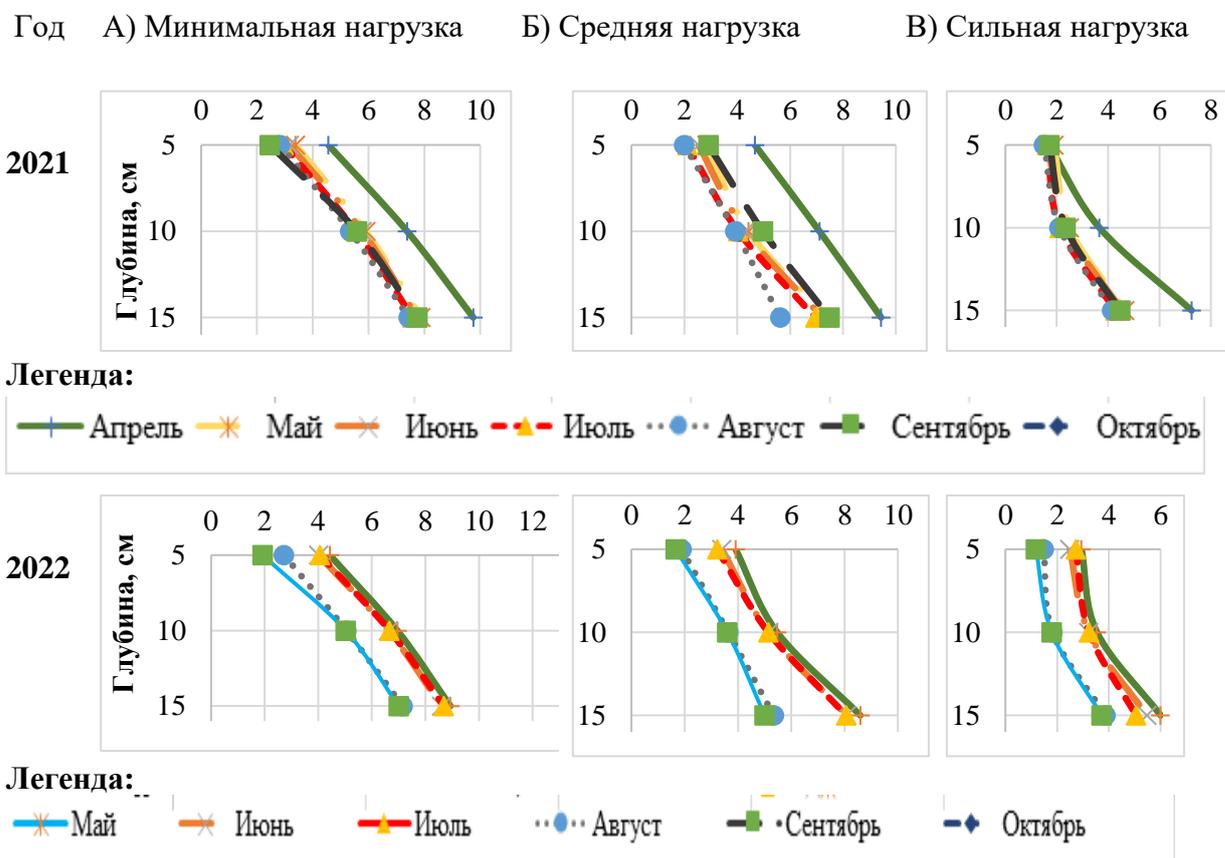


Рисунок 4.4.4. Изменение содержания нитрат-аниона (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Профильное распределение содержания подвижного фосфора в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части слабо-вогнутого склона характеризуются аккумулятивным характером профиля (рис. 4.4.5), но при значительно более низких значениях его содержания по сравнению с соответствующими горизонтами почв на противоположном склоне: на 10–45 мг/кг ниже (см. рис. 4.2.5) – при наибольших потерях содержания подвижного фосфора в почвах с сильной рекреационной нагрузкой.

Важно отметить сильнее выраженную сезонную динамику содержания

подвижного фосфора (с диапазоном изменений до 60–70 мг/кг) в почвах площадок с минимальным и средним уровнем рекреационной нагрузки в условиях сезона 2022 года с близким к среднемноголетнему значению количеством осадков и повышенным уровнем кислотности верхних горизонтов исследуемых почв (см. рис. 4.4.1 и 4.4.2)

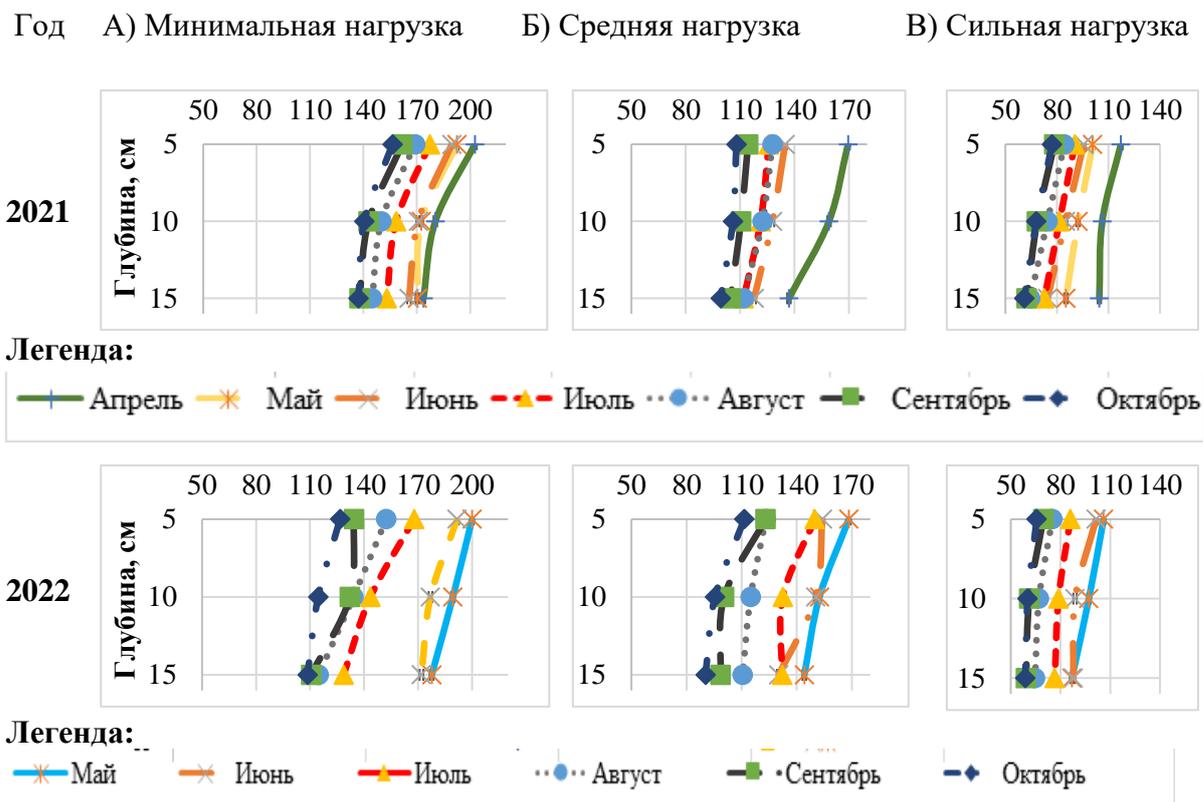


Рисунок 4.4.5. Изменение содержания подвижного фосфора (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Близкие закономерности пространственно-временной изменчивости содержания наблюдаются и при анализе подвижного калия: в разной степени выраженный аккумулятивный характер профильного распределения (рис. 4.4.6) – но на фоне значительно более низкого содержания (на 5–35 мг/кг), по сравнению с аналогичными горизонтами почв противоположного склона (см. рис. 4.2.6), и слабее выраженной дифференциации верхних горизонтов профиля (с преобладающим перепадом значений в пределах 10-15 мг/кг).

Как и в случае содержания подвижного фосфора (см. рис. 4.4.5), сезонная динамика содержания подвижного калия (рис. 4.4.6) значительно

лучше выражена (вплоть до 3–4-кратных изменений) в условиях сезона 2022 года с близким к среднемноголетнему значению количеством осадков и повышенным уровнем кислотности верхних горизонтов исследуемых почв. При четко выраженном общем тренде постепенного снижения содержания подвижного калия от весенних максимумов к осенним минимумам наиболее резкие изменения в его содержании наблюдаются в конце летнего периода от июля к августу.

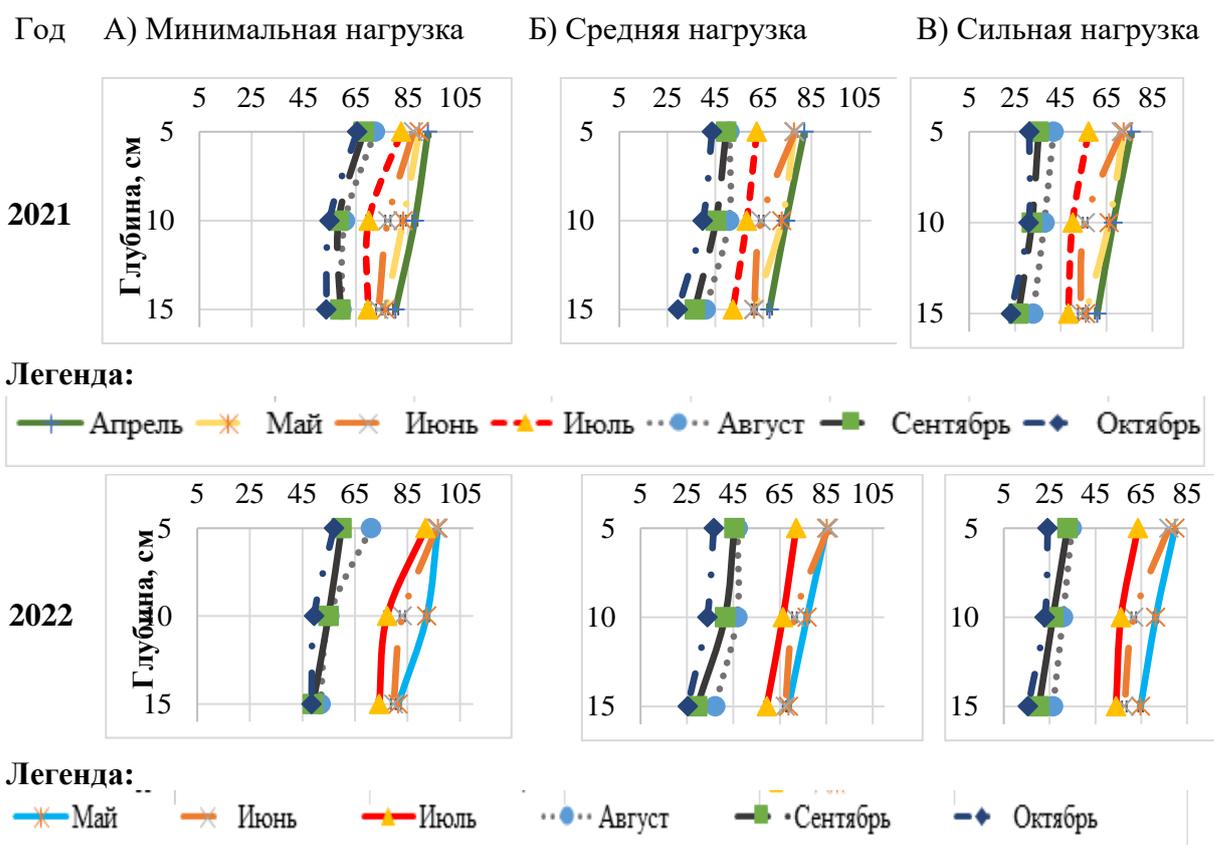


Рисунок 4.4.6. Изменение содержания подвижного калия (мг/кг) в верхних горизонтах почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

#### 4.5. Изменение физико-химических и химических свойств почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результаты мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости актуальной кислотности исследуемых дерново-подзолистых почв на подошве склона юго-западной экспозиции в ЛОД с увеличением

рекреационной нагрузки и в ходе основного сезона вегетации показали значительно слабее выраженную, чем в почвах на подошве противоположного склона (см. рис. 4.3.1), дифференциацию актуальной кислотности верхних горизонтов почв в пределах 0-15 см (с перепадом от 0,1 до 0,7 единицы рН – рис. 4.5.1) – на фоне, в среднем, более высоких (на 0,2-0,7 единицы рН) значений  $pH_{H_2O}$  в условиях 2021 года с повышенным количеством осадков.

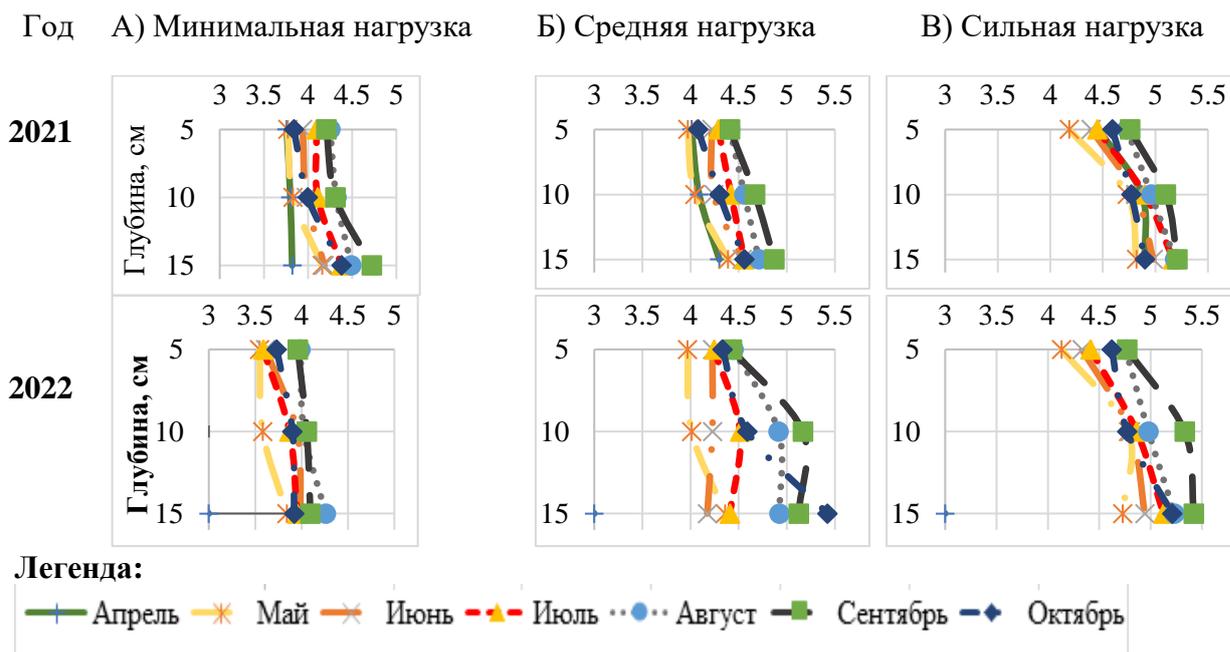


Рисунок 4.5.1. Изменение актуальной кислотности почв ( $pH_{H_2O}$ ) на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

При этом почвы на площадках со средней и, особенно, сильной рекультивационной нагрузкой, как правило, характеризуются менее кислой реакцией (на 0,2-1,3 единицы рН) при увеличенном (до 1,0-1,3 единицы рН) диапазоне ее сезонной динамики в условиях 2022 года с близким к среднемноголетнему значению количеством осадков: от наиболее кислых условий в апреле-мае (после осенне-зимне-ранневесенней «промывки» верхних горизонтов почв на подошве склона) к постепенной частичной нейтрализации вплоть до октября.

В случае обменной кислотности профильная дифференциация выражена значительно лучше: в середине лета перепад значений  $pH_{KCL}$  между гумусово-аккумулятивными и элювиальными горизонтами на площадке с минимальной

рекреационной нагрузкой может достигать 1,0–1,2 единицы рН (рис. 4.5.2). Минимальные значения рН<sub>КСL</sub> наблюдаются весной с последующим трендом на постепенное снижение обменной кислотности, но диапазон ее сезонной динамики обычно несколько меньше, чем на подошве противоположного склона (см. рис. 4.3.2), а наиболее высокие значения рН<sub>КСL</sub> могут наблюдаться как в июле (чаще – в элювиальных горизонтах), так и в августе или октябре (рис. 4.5.2).

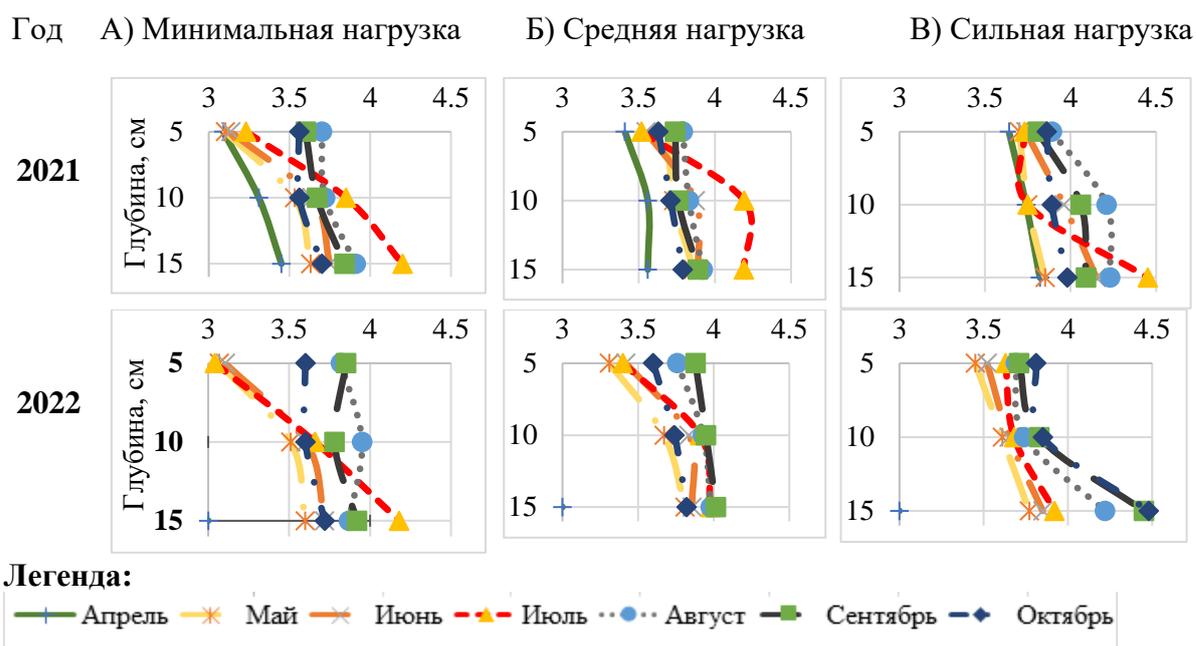


Рисунок 4.5.2. Изменение обменной кислотности почв (рН<sub>КСL</sub>) на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного аммония в верхних горизонтах исследуемых почв (рис. 4.5.3) значительно отличается от почв на подошве противоположного склона (см. рис. 4.3.3). При лучше выраженной профильной дифференциации содержания аммония (с перепадом в 7–12 мг/кг), его содержание в гумусово-аккумулятивных и переходных аккумулятивно-элювиальных горизонтах почвы на площадке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 4.5.3), как правило, на 3–5 мг/кг ниже аналогичных горизонтов почв на подошве склона северо-восточной экспозиции (см. рис. 4.3.3). В 2 раза слабее выражено снижение содержания аммония в почвах площадок с возрастанием рекреационной

нагрузки, а диапазон сезонной динамики содержания аммония, наоборот, увеличен и может превышать 15 мг/кг (рис. 4.5.3).

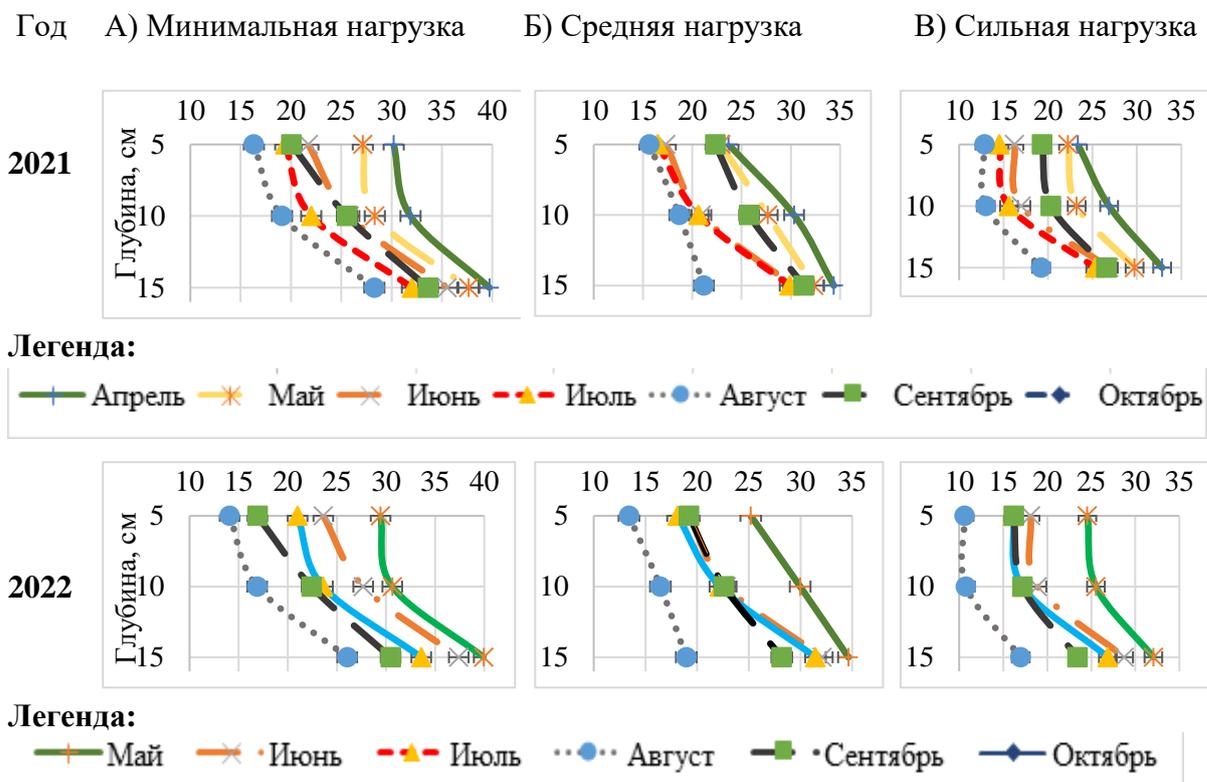


Рисунок 4.5.3. Изменение содержания аммония (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Среднее значение содержания нитрат-аниона в верхних почвенных горизонтах исследуемых почв в 3–5 раз ниже, чем аммония, а основные закономерности их пространственно-временной изменчивости (рис. 4.5.4) близки почвам подошвы противоположного склона (см. рис. 4.3.4): четко выраженная профильная дифференциация элювиального типа, постепенное обеднение на площадках с возрастающим уровнем рекреационной нагрузки, весенний максимум содержания с последующим частичным вымыванием нитратов (рис. 4.5.4).

В условиях 2021 года с повышенным количеством осадков сезонное снижение содержания нитратов происходит гораздо быстрее, при сильнее выраженном весеннем максимуме. В апреле этого года в элювиальном горизонте дерново-подзолистых почв на площадке с минимальным уровнем

рекреационной нагрузки наблюдалось наиболее высокое среди исследованных почв содержание нитратов – более 13 мг/кг (рис. 4.5.4).

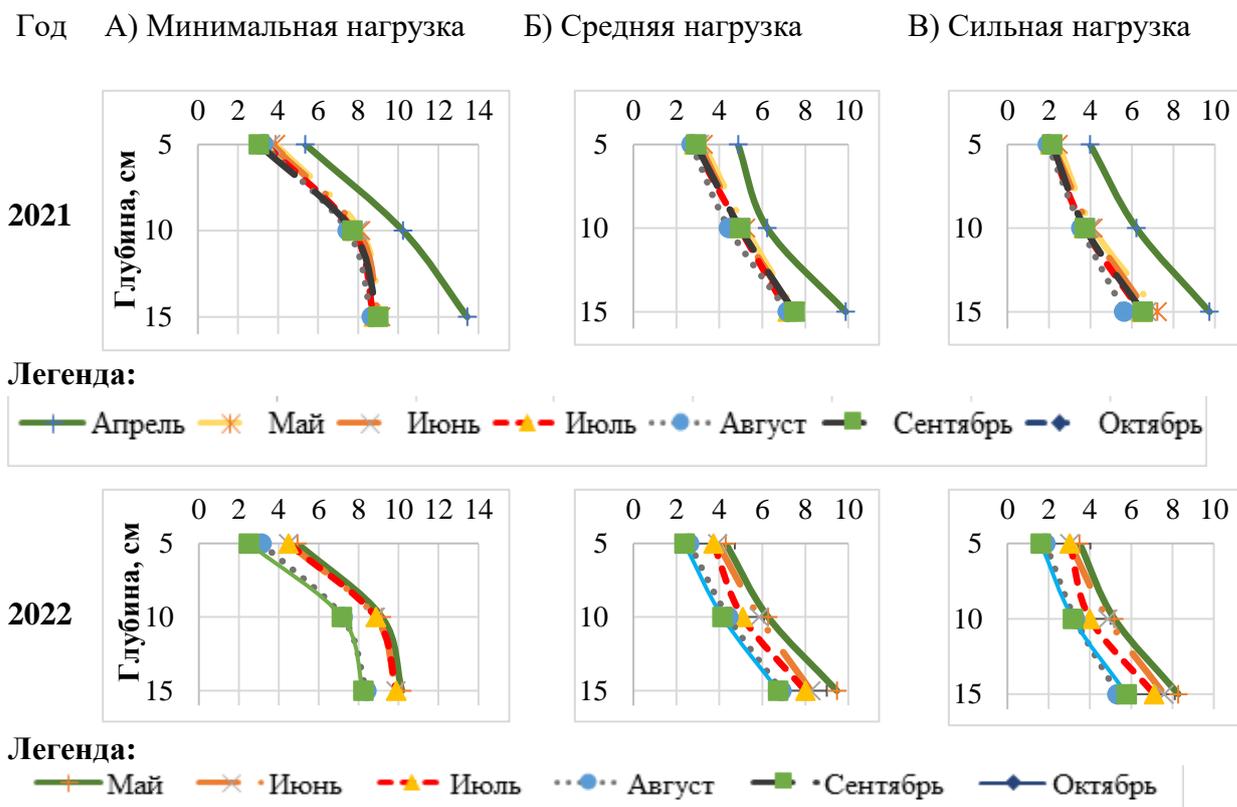


Рисунок 4.5.4. Изменение содержания нитрат-аниона (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Почвы на подошве склона юго-западной экспозиции по содержанию подвижного фосфора (рис. 4.5.5) значительно отличаются от почв на подошве противоположного склона (см. рис. 4.3.5) существенно более резким (вплоть до 2-кратного) снижением содержания подвижного фосфора на площадках с возрастанием уровня рекреационной нагрузки – при сохранении выраженной профильной дифференциации (с перепадом значений от 20 до 40 мг/кг) и сезонной динамики (с диапазоном изменений от 40 до 80 мг/кг).

Близкие закономерности пространственно-временной изменчивости содержания наблюдаются и при анализе подвижного калия: в разной степени выраженный аккумулятивный характер профильного распределения с преобладающим перепадом значений от 10 до 20 мг/кг; постепенное обеднение на 7–20 мг/кг с ростом рекреационной нагрузки (рис. 4.5.6).

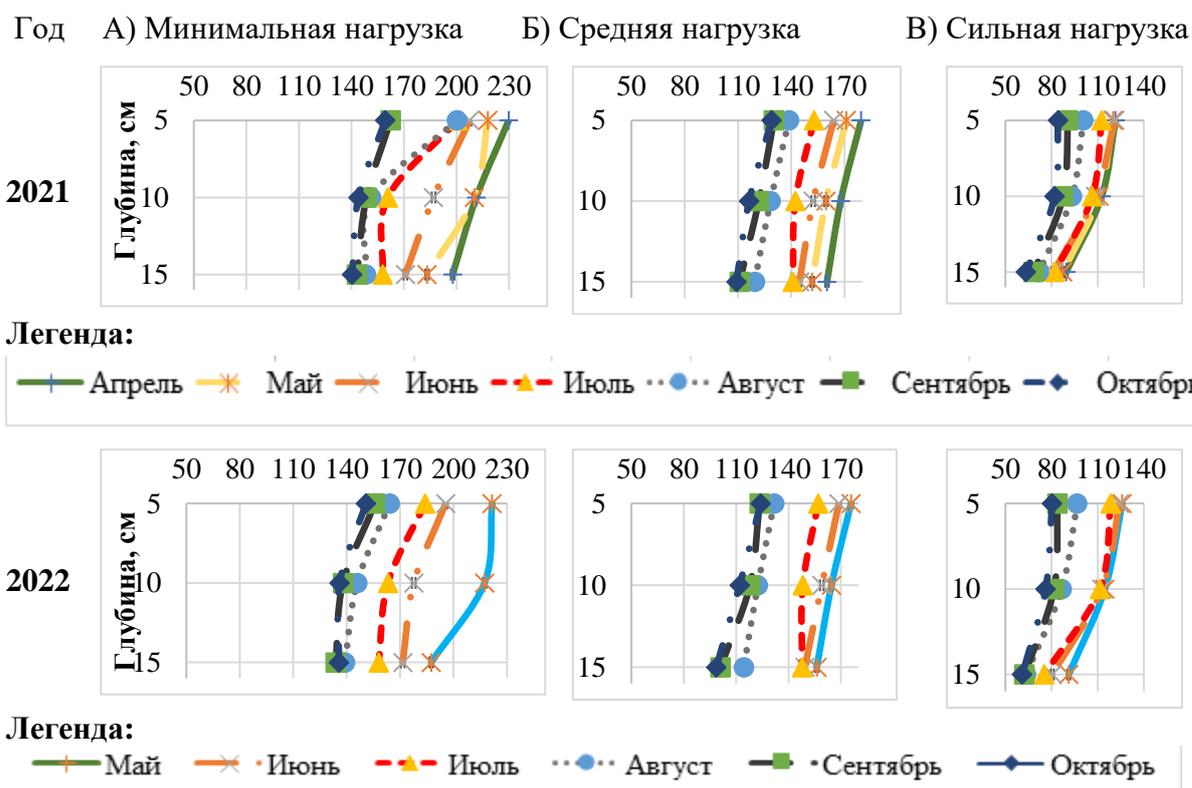


Рисунок 4.5.5. Изменение содержания подвижного фосфора (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

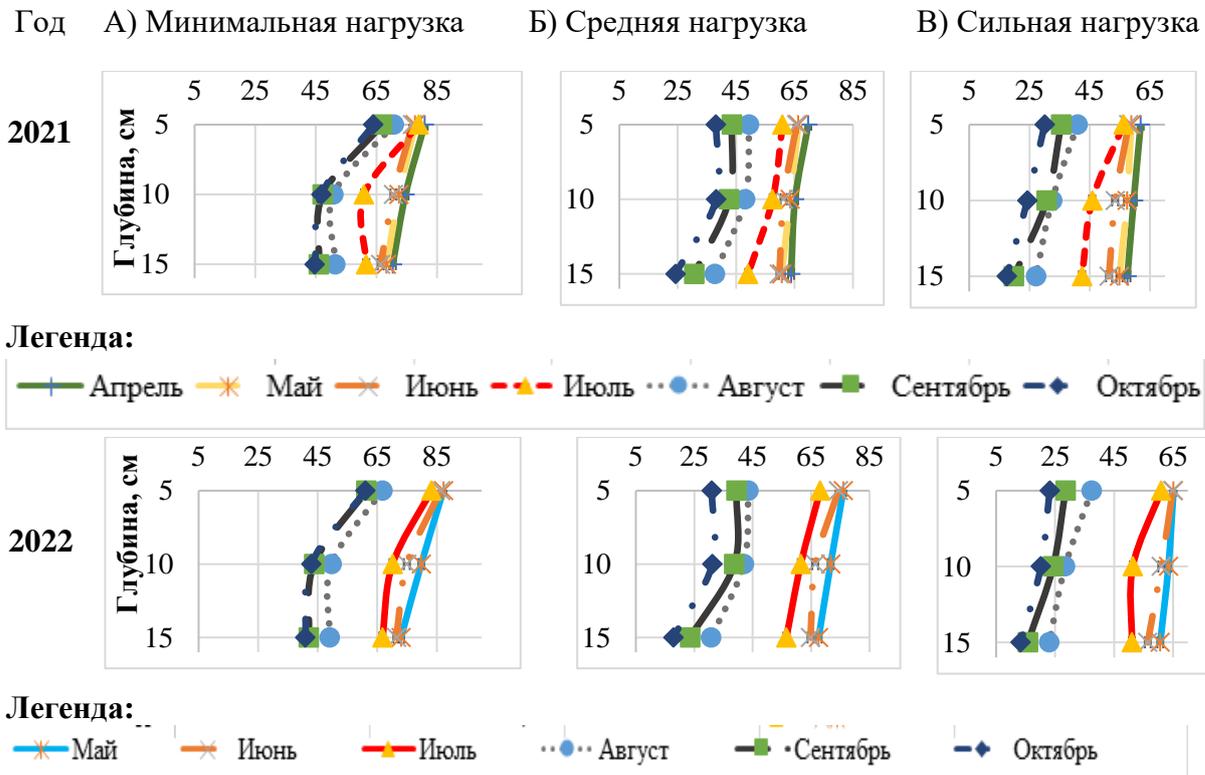


Рисунок 4.5.6. Изменение содержания подвижного калия (мг/кг) в верхних горизонтах почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

В отличие от почв на подошве склона противоположной экспозиции (см. рис. 4.3.6) эти почвы характеризуются еще более четкой дифференциацией сезонной динамики подвижного калия на период с повышенным содержанием в апреле – июле и период его пониженного содержания в августе-октябре (рис. 4.5.6).

#### **4.6. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику физико-химических и химических свойств исследуемых почв**

Мониторинговые наблюдения, проведенные в условиях 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков и 2022 года с очень близким к среднемноголетним значениям количеством осадков, показали четко выраженную пространственную дифференциацию сезонной динамики актуальной кислотности верхних горизонтов исследованных дерново-подзолистых почв по их позиции на склоне, экспозиции (и формы склона) и уровню рекреационной нагрузки (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются максимальным по сезону уровнем актуальной кислотности (минимальными значениями  $pH_{H_2O}$ ). Последующий тренд постепенной частичной нейтрализации сильно кислой реакции среды, как правило, продолжается до августа или сентября, с последующим, в разной степени выраженным, осенним подкислением. При расчете средних значений для объединенного слоя 0–15 см исследуемых почв каждого из двух годов наблюдений ежемесячно наблюдаемые изменения, как правило, статистически недостоверны, но формируют аналогичные по разным вариантам почв и логично объяснимые сезонные тренды (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

Различия по элементу рельефа (включая разницу в экспозиции склона) и степени рекреационной нагрузки в большинстве случаев статистически достоверны в апреле 2021 года и в условиях 2022 года с очень близким к среднемноголетним значениям количеством осадков (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

Таблица 4.6.1. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики актуальной кислотности ( $pH_{H_2O}$ ) 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
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	4.64±0.18	4.68±0.19	4.69±0.09	4.76±0.02	4.82±0.17	4.77±0.24	4.81±0.07
	Средняя	4.91±0.02	4.81±0.13	4.93±0.10	4.98±0.08	5.05±0.18	5.10±0.16	4.89±0.07
	Сильная	5.19±0.15	4.99±0.02	5.08±0.09	5.12±0.09	5.20±0.21	5.16±0.16	5.01±0.06
2022	Минимальная		4.17±0.34	4.42±0.41	4.74±0.03	4.86±0.16	4.59±0.13	4.48±0.14
	Средняя		4.44±0.32	4.81±0.20	4.95±0.07	5.06±0.17	4.96±0.27	4.73±0.22
	Сильная		4.88±0.26	4.94±0.28	5.01±0.15	5.27±0.22	5.18±0.15	4.94±0.39
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	3.78±0.34	4.16±0.52	4.29±0.54	4.30±0.52	4.44±0.25	3.98±0.02	4.46±0.17
	Средняя	4.09±0.19	4.34±0.20	4.55±0.23	4.65±0.15	4.71±0.24	4.16±0.18	4.57±0.34
	Сильная	4.39±0.16	4.52±0.46	4.82±0.41	4.94±0.40	4.96±0.13	4.32±0.24	4.69±0.39
2022	Минимальная		4.65±0.19	4.68±0.09	4.66±0.28	4.84±0.17	4.90±0.16	4.85±0.06
	Средняя		4.78±0.14	4.89±0.07	4.80±0.22	5.02±0.16	5.10±0.08	4.89±0.07
	Сильная		4.96±0.01	5.05±0.09	5.10±0.09	5.03±0.09	5.13±0.16	5.06±0.06
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	3.22±0.06	3.59±0.37	3.65±0.38	3.78±0.39	4.05±0.25	4.20±0.27	3.70±0.13
	Средняя	3.50±0.04	4.01±0.47	3.92±0.46	4.15±0.40	4.16±0.28	4.41±0.22	4.23±0.07
	Сильная	3.84±0.20	4.14±0.28	4.16±0.16	4.54±0.34	4.77±0.30	4.97±0.09	4.73±0.17
2022	Минимальная		3.47±0.13	3.58±0.08	3.70±0.04	4.29±0.26	4.12±0.14	3.72±0.14
	Средняя		3.98±0.46	3.90±0.46	3.97±0.12	4.26±0.35	4.37±0.13	4.28±0.07
	Сильная		4.12±0.22	4.14±0.17	4.42±0.44	4.82±0.30	5.01±0.10	4.76±0.17

Таблица 4.6.2. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики актуальной кислотности ( $pH_{H_2O}$ ) верхней части профиля (0-15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции.

Год	Нагрузка	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	4.64±0.18	4.68±0.19	4.69±0.09	4.76±0.02	4.82±0.17	4.77±0.24	4.81±0.07
	Средняя	4.91±0.02	4.81±0.13	4.93±0.10	4.98±0.08	5.05±0.18	5.10±0.16	4.89±0.07
	Сильная	5.19±0.15	4.99±0.02	5.08±0.09	5.12±0.09	5.20±0.21	5.16±0.16	5.01±0.06
2022	Минимальная		4.17±0.34	4.42±0.41	4.74±0.03	4.86±0.16	4.59±0.13	4.48±0.14
	Средняя		4.44±0.32	4.81±0.20	4.95±0.07	5.06±0.17	4.96±0.27	4.73±0.22
	Сильная		4.88±0.26	4.94±0.28	5.01±0.15	5.27±0.22	5.18±0.15	4.94±0.39
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	4.05±0.16	4.17±0.12	4.37±0.16	4.44±0.16	4.61±0.08	4.65±0.15	4.36±0.22
	Средняя	4.46±0.30	4.44±0.25	4.55±0.19	4.63±0.15	4.78±0.18	5.03±0.25	4.54±0.33
	Сильная	4.86±0.19	4.72±0.20	4.88±0.22	4.86±0.18	5.03±0.22	4.73±0.24	4.85±0.19
2022	Минимальная		4.14±0.14	4.34±0.15	4.40±0.17	4.73±0.16	4.68±0.16	4.38±0.07
	Средняя		4.41±0.26	4.52±0.19	4.60±0.16	4.80±0.18	4.77±0.25	4.57±0.34
	Сильная		4.68±0.21	4.76±0.13	4.73±0.16	5.08±0.22	5.06±0.24	4.88±0.18
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	3.79±0.02	3.92±0.12	4.03±0.07	4.20±0.09	4.35±0.07	4.41±0.16	4.07±0.16
	Средняя	4.13±0.09	4.13±0.13	4.33±0.10	4.42±0.08	4.74±0.16	4.84±0.22	4.13±0.15
	Сильная	4.74±0.14	4.58±0.20	4.73±0.18	4.84±0.21	4.96±0.13	5.15±0.20	4.75±0.09
2022	Минимальная		3.87±0.12	4.01±0.08	4.09±0.16	4.39±0.06	4.45±0.15	4.13±0.15
	Средняя		4.11±0.12	4.21±0.02	4.39±0.08	4.76±0.16	4.91±0.24	4.78±0.33
	Сильная		4.55±0.21	4.69±0.18	4.80±0.21	4.99±0.14	5.17±0.21	4.87±0.18

Различия актуальной кислотности верхних горизонтов исследованных дерново-подзолистых почв по вариантам с разным уровнем рекреационной нагрузки в большинстве случаев статистически более достоверны в почвах на подошве склонов с наиболее кислой в целом реакцией среды и на склоне юго-западной экспозиции с менее кислой реакцией среды (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

В целом, преобладающие по площади почвы склонов характеризуются устойчиво более кислой реакцией среды, по сравнению с почвами пологого водораздельного моренного холма, а максимальной кислотностью отличаются почвы на подошве исследованных склонов. Реакция среды почв на склоне северо-восточной экспозиции устойчиво кислее их аналогов на склоне юго-западной экспозиции. Различия максимально выражены на площадках с минимальным уровнем рекреационной нагрузки и частично сглаживаются при возрастании нагрузки (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

В условиях 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков реакция среды верхних горизонтов почв на вершине моренного холма отличается преимущественно пониженным уровнем актуальной кислотности – по сравнению с данными за 2022 год с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков. В почвах на склоне северо-восточной экспозиции наблюдается обратный тренд – в сторону подкисления (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

В случае обменной кислотности весенние месяцы (апрель – май) также характеризуются ее максимальным по сезону уровнем (минимальными значениями  $pH_{KCL}$ ). Последующий тренд постепенной частичной нейтрализации сильно кислой реакции среды, как правило, продолжается до августа или июля, с последующим осенним подкислением. При расчете средних значений для объединенного слоя 0–15 см исследуемых почв каждого из годов наблюдений ежемесячно наблюдаемые изменения, как правило, статистически недостоверны, но формируют логично объяснимые сезонные тренды (табл. 4.6.1 и 4.6.2).

Таблица 4.6.3. 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
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
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
<b>На средней части склона</b>								
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
<b>На подошве склона</b>								
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

Таблица 4.6.4. 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 юго-западной экспозиции.

Год	Нагрузка	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
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
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	3.57±0.04	3.68±0.09	3.87±0.12	3.64±0.15	3.90±0.05	4.09±0.09	3.79±0.07
	Средняя	3.72±0.09	3.84±0.08	4.00±0.13	3.83±0.11	4.06±0.09	4.04±0.04	3.82±0.06
	Сильная	3.90±0.05	3.93±0.10	4.01±0.07	3.98±0.12	4.37±0.13	4.28±0.13	4.00±0.07
2022	Минимальная		3.66±0.07	3.85±0.12	3.89±0.14	4.10±0.09	3.85±0.06	3.70±0.13
	Средняя		3.73±0.13	3.97±0.12	3.80±0.11	4.09±0.08	3.98±0.04	3.85±0.06
	Сильная		3.81±0.16	3.88±0.09	3.90±0.17	4.45±0.13	4.09±0.04	4.12±0.05
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	3.28±0.10	3.42±0.16	3.51±0.19	3.76±0.28	3.78±0.07	3.70±0.07	3.61±0.04
	Средняя	3.51±0.05	3.76±0.05	3.77±0.11	3.97±0.22	3.85±0.04	3.80±0.05	3.71±0.05
	Сильная	3.73±0.06	3.77±0.04	3.95±0.12	3.98±0.24	4.11±0.11	3.99±0.09	3.91±0.04
2022	Минимальная		3.39±0.05	3.48±0.19	3.63±0.33	3.89±0.05	3.95±0.04	3.64±0.04
	Средняя		3.72±0.05	3.74±0.11	3.94±0.22	3.88±0.04	3.85±0.04	3.74±0.04
	Сильная		3.65±0.10	3.84±0.14	3.95±0.24	4.14±0.12	4.19±0.05	3.95±0.03

Различия по элементам рельефа в большинстве случаев статистически достоверны, по степени рекреационной нагрузки – статистически достоверны в почвах склонов, при сохранении на всех вариантах рельефа общего тренда к снижению обменной кислотности при возрастании уровня рекреационной нагрузки (табл. 4.6.3 и 4.6.4). Различия по элементам рельефа могут достигать 0,8–0,9 единицы рН, по уровню рекреационной нагрузки – 0,6–0,7 единицы рН, в рамках сезонной динамики кислотности также – 0,6–0,7 единицы рН.

Максимальным уровнем обменной кислотности отличаются почвы на подошве склона северо-восточной экспозиции, но на средней части склона сильнее и более устойчиво подкислены почвы слабовогнутого склона юго-западной экспозиции (табл. 4.6.3 и 4.6.4). Важно принимать отмеченные закономерности во внимание, планируя и интерпретируя результаты проводимых мониторинговых наблюдений на Лесной Опытной Даче как фоновом объекте экологического мониторинга для северной части Москвы.

Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются и максимальным по сезону содержанием обменного аммония в верхних горизонтах всех исследуемых почв. Последующий тренд постепенного обеднения почв аммонием продолжается до августа, с последующим обогащением в сентябре, максимально выраженным в почвах с минимальным уровнем рекреационной нагрузки. При расчете средних значений для объединенного слоя 0–15 см исследуемых почв каждого из двух годов наблюдений ежемесячно наблюдаемые изменения, как правило, статистически недостоверны, но формируют аналогичные по разным вариантам почв и логично объяснимые сезонные тренды (табл. 4.6.5 и 4.6.6).

В большинстве случаев статистически достоверны различия в содержании обменного аммония по степени рекреационной нагрузки. Различия по элементам рельефа статистически менее достоверны – при общем устойчивом тренде обеднения почв на склоне при максимальном содержании обменного аммония в почвах на вершине моренного холма (табл. 4.6.5 и 4.6.6).

Таблица 4.6.5 – Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания аммония (мг/кг) в 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	Нагрузки	Апреля	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>							
2021	Минимальная	37.49±2.01	35.78±2.14	31.52±3.19	28.83±2.8	24.16±1.54	33.01±2.84
	Средняя	32.26±2.14	30.39±2.77	28.54±2.86	27.02±2.66	22.86±1.20	29.34±2.67
	Сильная	23.21±3.08	16.84±1.09	15.27±1.72	13.78±1.68	12.46±1.22	13.98±1.74
2022	Минимальная		37.09±2.33	32.41±3.20	29.40±2.68	23.93±1.63	30.87±3.04
	Средняя		32.70±2.18	30.43±2.81	28.59±2.57	20.63±1.41	26.20±2.98
	Сильная		20.15±1.52	18.17±1.63	16.36±1.92	10.23±1.14	13.84±2.34
<b>На средней части склона</b>							
2021	Минимальная	28.52±1.96	25.19±2.32	21.35±3.63	18.37±3.34	16.89±2.57	19.17±2.20
	Средняя	22.85±2.52	19.25±2.15	17.26±2.51	15.99±2.10	15.06±1.47	17.98±1.20
	Сильная	17.21±2.00	13.93±2.33	12.23±1.66	10.33±1.58	9.21±1.70	10.08±1.49
2022	Минимальная		26.50±2.71	24.24±3.43	20.94±2.37	15.66±1.07	17.02±1.58
	Средняя		21.55±3,00	19.14±3.21	17.56±2.74	12.83±1.18	14.84±1.53
	Сильная		15.24±2.38	13.13±2.27	10.90±2.00	5.98±1.78	8.94±3.10
<b>На подошве склона</b>							
2021	Минимальная	29.35±1.67	25.69±1.74	22.63±2.35	19.93±1.96	15.75±1.08	21.05±1.67
	Средняя	18.00±4.48	14.20±2.24	11.53±3.04	10.44±3.13	7.04±0.86	13.24±3.23
	Сильная	17.58±2.86	11.34±2.11	10.47±1.46	9.30±1.06	6.67±1.75	11.16±2.16
2022	Минимальная		27.00±1.42	25.52±2.07	20.50±1.44	13.52±2.00	17.91±2.11
	Средняя		16.51±3.35	13.42±2.21	12.01±2.41	4.81±2.12	10.10±2.28
	Сильная		15.65±2.01	11.36±1.18	9.87±1.13	4.44±1.01	8.02±2.98

Таблица 4.6.6 – Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания аммония (мг/кг) в верхней части профиля (0-15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции

Год	Нагрузки	Апреля	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>							
2021	Минимальная	37.49±2.01	35.78±2.14	31.52±3.19	28.83±2.8	24.16±1.54	33.01±2.84
	Средняя	32.26±2.14	30.39±2.77	28.54±2.86	27.02±2.66	22.86±1.20	29.34±2.67
	Сильная	23.21±3.08	16.84±1.09	15.27±1.72	13.78±1.68	12.46±1.22	13.98±1.74
2022	Минимальная		37.09±2.33	32.41±3.20	29.40±2.68	23.93±1.63	30.87±3.04
	Средняя		32.70±2.18	30.43±2.81	28.59±2.57	20.63±1.41	26.20±2.98
	Сильная		20.15±1.52	18.17±1.63	16.36±1.92	10.23±1.14	13.84±2.34
<b>На средней части склона</b>							
2021	Минимальная	32.54±3.27	29.08±3.34	23.03±2.45	20.80±2.50	18.32±1.61	25.54±1.68
	Средняя	22.19±2.66	19.91±1.98	17.81±2.38	16.22±2.09	14.84±2.13	18.70±2.23
	Сильная	20.34±2.82	18.66±2.54	17.02±2.29	15.61±2.07	11.93±1.83	14.25±2.13
2022	Минимальная		32.39±2.22	26.92±3.12	23.37±2.44	17.09±2.13	21.40±2.44
	Средняя		22.22±2.88	19.70±2.71	17.79±1.32	12.61±1.41	15.56±1.57
	Сильная		19.97±3.96	17.91±2.26	16.18±2.22	8.70±2.29	12.11±1.84
<b>На подошве склона</b>							
2021	Минимальная	33.94±2.93	31.04±3.32	27.68±3.09	24.49±2.84	21.23±2.61	26.48±1.62
	Средняя	29.46±3.11	27.62±2.73	22.82±2.84	22.35±2.95	18.50±0.66	26.41±2.94
	Сильная	27.76±2.76	24.07±2.35	21.02±2.42	19.49±2.43	16.02±1.10	22.08±1.27
2022	Минимальная		34.35±2.87	30.57±2.85	27.06±2.82	20.00±1.82	23.34±2.34
	Средняя		29.93±2.66	24.71±1.83	23.92±2.47	16.27±2.04	22.27±1.69
	Сильная		27.38±2.00	21.91±2.22	20.07±1.97	12.79±2.64	18.94±2.01

В целом, преобладающие по площади почвы склонов характеризуются устойчиво более низким содержанием обменного аммония, по сравнению с почвами пологого водораздельного моренного холма. 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 (табл. 4.6.5 и 4.6.6).

В мае-июле 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков содержание обменного аммония в верхних горизонтах почв всех исследуемых участков устойчиво несколько ниже его содержания в 2022 году с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков. В августе-сентябре наблюдается обратный тренд – с более высоким содержанием аммония в 2021 году (табл. 4.6.5 и 4.6.6) при очень низком количестве осадков в августе и первой декаде сентября 2022 года (см. табл. 2.1.2).

В отличие от обменного аммония пространственное распределение нитрат-анионов четко дифференцировано по экспозиции склона (табл. 4.6.7 и 4.6.8). На склоне северо-восточной экспозиции их содержание в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв, в большинстве случаев, устойчиво снижается вниз по склону: вплоть до 2-кратного сокращения на подошве склона (табл. 4.6.7). В почвах на склоне юго-западной экспозиции наблюдается обратный тренд: с преобладанием более высоких значений содержания нитратов по сравнению с аналогичными почвами на вершине моренного холма (табл. 4.6.8).

Почвы на всех исследованных элементах рельефа характеризуются общим трендом значительного (от 1,5- до 4-кратного), но не всегда статистически достоверного снижения содержания нитратов при возрастании рекреационной нагрузки (табл. 4.6.7 и 4.6.8).

Таблица 4.6.7 – Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания нитрат-аниона (мг/кг) в 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	Нагрузки	Апреля	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>							
2021	Минимальная	6.88±1.68	6.03±0.61	5.89±0.46	5.69±1.03	5.54±1.54	5.79±0.84
	Средняя	6.07±1.92	4.84±0.69	4.18±1.21	3.64±0.28	2.96±1.20	3.45±0.67
	Сильная	4.07±1.54	2.17±0.34	2.80±0.22	2.63±0.17	1.30±1.22	1.56±0.72
2022	Минимальная		7.58±0.49	7.24±0.12	7.30±0.98	4.81±1.63	4.67±0.15
	Средняя		5.89±1.10	5.03±0.25	4.75±0.22	2.69±1.41	2.83±0.65
	Сильная		3.72±0.54	3.15±0.47	3.24±0.30	1.57±1.14	1.44±0.36
<b>На средней части склона</b>							
2021	Минимальная	5.26±1.37	4.42±0.91	4.26±1.04	4.00±1.07	3.81±1.06	4.06±1.09
	Средняя	4.66±0.93	3.66±0.72	3.45±0.76	3.19±0.76	2.99±0.71	3.24±0.74
	Сильная	4.39±1.09	2.92±0.96	2.76±1	2.60±0.93	2.51±0.94	2.77±0.97
2022	Минимальная		5.47±1.01	5.11±1.02	5.11±0.74	3.58±1.01	3.45±1.03
	Средняя		4.71±0.74	4.30±1.11	4.30±0.23	2.76±0.65	2.62±0.69
	Сильная		3.97±0.38	3.61±0.89	3.71±0.75	2.28±0.88	2.15±0.92
<b>На подошве склона</b>							
2021	Минимальная	4.86±1.22	3.40±0.98	2.99±0.79	2.71±0.69	2.28±0.46	3.22±0.99
	Средняя	3.71±1.11	2.98±1.00	2.08±0.72	1.85±0.73	1.54±0.74	2.05±0.61
	Сильная	3.12±0.93	2.53±0.51	1.92±0.47	1.03±0.43	1.08 ±0.41	1.07±0.44
2022	Минимальная		4.95±1.47	3.34±0.28	3.32±0.47	2.05±0.22	1.98±0.61
	Средняя		4.03±3.0	2.93±0.66	2.96±0.82	1.31±0.56	1.18±0.34
	Сильная		3.08±2.93	2.57±0.78	1.30±0.42	1.15±0.47	1.00±0.29

Таблица 4.6.8 – Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания нитрат-аниона (мг/кг) в верхней части профиля (0-15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции

Год	Нагрузки	Апреля	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>							
2021	Минимальная	6.88±1.68	6.03±0.61	5.89±0.46	5.69±1.03	5.54±1.54	5.79±0.84
	Средняя	6.07±1.92	4.84±0.69	4.18±1.21	3.64±0.28	2.96±1.20	3.45±0.67
	Сильная	4.07±1.54	2.17±0.34	2.80±0.22	2.63±0.17	1.30±1.22	1.56±0.72
2022	Минимальная		7.58±0.49	7.24±0.12	7.30±0.98	4.81±1.63	4.67±0.15
	Средняя		5.89±1.10	5.03±0.25	4.75±0.22	2.69±1.41	2.83±0.65
	Сильная		3.72±0.54	3.15±0.47	3.24±0.30	1.57±1.14	1.44±0.36
<b>На средней части склона</b>							
2021	Минимальная	7.23±1.50	5.72±1.30	5.56±1.32	5.35±1.33	5.20±1.33	5.45±1.36
	Средняя	7.07±1.37	5.29±1.20	5.16±1.25	4.98±1.26	4.77±1.30	5.12±1.32
	Сильная	4.20±1.62	2.17±1.08	2.01±1.12	2.04±1.05	1.96±1.05	2.21±1.08
2022	Минимальная		6.34±0.88	6.21±1.11	6.09±1.30	4.50±1.30	4.67±1.40
	Средняя		6.27±1.18	6.01±2.31	6.06±1.31	4.34±1.54	4.54±1.10
	Сильная		3.72±1.96	3.36±1.21	3.45±0.98	1.89±1.42	2.03±1.15
<b>На подошве склона</b>							
2021	Минимальная	9.68±1.35	7.04±0.72	6.88±0.65	6.63±0.66	6.47±0.65	6.39±1.00
	Средняя	6.99±0.50	4.94±0.38	4.69±0.36	4.36±0.41	3.85±0.05	4.54±0.47
	Сильная	6.65±0.67	4.00±0.40	4.81±0.42	4.07±0.27	3.22±0.06	4.14±0.28
2022	Минимальная		8.09±0.23	7.23±0.02	7.24±0.08	6.24±0.05	5.27±0.03
	Средняя		5.99±0.07	5.54±0.08	5.47±0.09	3.62±0.03	3.92±0.06
	Сильная		5.65±0.08	5.16±0.12	5.18±0.13	3.49±0.11	3.53±0.09

В сезонной динамике доминирует общий тренд постепенного обеднения верхних горизонтов почв от максимальных значений в апреле – мае к сезонному минимуму в сентябре или августе с последующим незначительным обогащением в сентябре (табл. 4.6.7 и 4.6.8).

Как и в случае обменного аммония, в мае-июле 2021 года с повышенным на 20% относительно среднеголетних значений количеством осадков содержание нитратов в верхних горизонтах почв всех исследуемых участков устойчиво на 15–20% ниже его содержания в 2022 году с близким к среднеголетним значениям количеством осадков. В августе-сентябре наблюдается обратный тренд – с более высоким содержанием нитратов в 2021 году (табл. 4.6.7 и 4.6.8) при очень низком количестве осадков в августе и первой декаде сентября 2022 года (см. табл. 2.1.2).

Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются и максимальным по сезону содержанием подвижного фосфора в верхних горизонтах всех исследуемых почв. Последующий тренд постепенного обеднения почв подвижным фосфором продолжается до октября. При расчете средних значений для объединенного слоя 0–15 см исследуемых почв каждого из двух годов наблюдений ежемесячно наблюдаемые изменения, как правило, статистически недостоверны, но формируют аналогичные по разным вариантам почв и логично объяснимые сезонные тренды (табл. 4.6.9 и 4.6.10).

В большинстве случаев статистически достоверны различия в содержании подвижного фосфора по степени рекреационной нагрузки. Различия по элементам рельефа статистически не всегда достоверны – при общем устойчивом тренде обогащения почв на склоне при максимальном содержании подвижного фосфора в почвах с минимальным уровнем рекреационной нагрузки на подошвах склонов (табл. 4.6.9 и 4.6.10). Верхние горизонты почв склона северо-восточной экспозиции, как правило, устойчиво и достоверно богаче подвижным фосфором аналогичных почв юго-западной экспозиции.

Таблица 4.6.9. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания подвижного фосфора (мг/кг) в 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
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	185.43±6.60	172.58±14.06	158.57±18.53	138.29±2.31	122.31±2.41	121.99±5.56	103.42±2.46
	Средняя	127.70±20.86	152.18±8.63	143.21±8.31	133.21±7.12	111.57±10.48	98.91±13.19	91.27±11.63
	Сильная	104.96±2.03	94.63±3.13	86.26±1.92	76.88±2.34	80.97±16.68	76.97±18.30	78.85±20.73
2022	Минимальная		171.70±10.39	153.90±17.92	133.40±2.20	129.55±1.60	120.58±3.11	114.22±4.03
	Средняя		109.60±19.16	104.46±20.33	87.70±13.77	95.01±12.39	84.21±18.96	80.81±19.45
	Сильная		88.56±2.03	82.26±2.03	72.06±2.03	95.25±15.96	80.12±12.11	75.33±11.75
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	199.83±5.11	199.95±5.72	196.41±5.15	181.58±4.96	163.58±9.20	156.76±3.51	148.77±2.75
	Средняя	171.56±7.72	171.21±6.85	164.11±5.02	148.61±5.03	133.62±4.38	125.05±4.31	117.07±4.92
	Сильная	147.20±2.96	147.11±2.21	137.71±5.54	120.93±6.67	107.23±6.39	96.67±5.92	92.79±6.77
2022	Минимальная		194.46±5.28	190.50±4.61	176.11±1.61	169.80±4.61	160.60±4.61	156.66±5.36
	Средняя		165.30±6.35	159.30±4.61	142.23±4.42	138.60±4.61	129.40±4.61	123.28±5.02
	Сильная		141.66±1.67	131.50±5.55	117.10±5.55	110.80±5.56	101.60±5.54	97.76±6.96
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	229.56±6.29	227.38±7.92	210.90±3.28	205.42±3.91	186.62±6.32	192.16±5.66	189.38±5.79
	Средняя	188.67±25.27	218.78±6.56	208.28±3.30	202.18±2.91	182.64±2.20	182.83±6.35	179.08±4.14
	Сильная	148.96±3.33	122.86±1.93	128.94±1.82	143.44±1.82	138.13±1.67	130.45±2.56	120.91±10.60
2022	Минимальная		215.56±3.13	205.93±3.09	201.10±3.70	191.16±5.80	157.34±4.62	150.58±3.19
	Средняя		209.84±3.52	204.43±4.39	197.56±3.28	188.16±2.28	128.66±4.23	120.44±5.34
	Сильная		142.13±1.99	139.26±1.66	124.73±1.66	118.56±1.67	111.70±3.46	105.73±3.75

Таблица 4.6.10. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания подвижного фосфора (мг/кг) в верхней части профиля (0-15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции.

Год	Нагрузка	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	185.43±6.60	172.58±14.06	158.57±18.53	138.29±2.31	122.31±2.41	121.99±5.56	103.42±2.46
	Средняя	127.70±20.86	152.18±8.63	143.21±8.31	133.21±7.12	111.57±10.48	98.91±13.19	91.27±11.63
	Сильная	104.96±2.03	94.63±3.13	86.26±1.92	76.88±2.34	80.97±16.68	76.97±18.30	78.85±20.73
2022	Минимальная		171.70±10.39	153.90±17.92	133.40±2.20	129.55±1.60	120.58±3.11	114.22±4.03
	Средняя		109.60±19.16	104.46±20.33	87.70±13.77	95.01±12.39	84.21±18.96	80.81±19.45
	Сильная		88.56±2.03	82.26±2.03	72.06±2.03	95.25±15.96	80.12±12.11	75.33±11.75
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	185.56±8.73	182.27±7.99	181.58±7.22	168.41±7.97	149.69±7.52	142.54±6.79	140.84±5.00
	Средняя	169.06±5.57	165.56±5.68	159.08±5.60	151.00±3.02	122.88±5.03	114.11±6.74	111.53±7.33
	Сильная	107.90±9.55	110.04±9.82	106.45±13.52	101.76±13.34	81.28±10.78	73.68±9.06	68.56±9.78
2022	Минимальная		178.43±7.06	175.36±7.32	162.96±7.34	154.66±7.32	147.46±7.00	144.68±5.90
	Средняя		160.76±5.57	153.56±5.57	145.33±3.75	128.80±5.57	119.60±6.80	115.85±7.62
	Сильная		106.04±9.73	101.47±13.91	96.84±12.79	86.10±11.09	79.60±9.54	73.48±9.68
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	212.96±9.27	204.53±10.77	188.40±10.62	154.87±23.24	150.70±25.11	134.76±13.56	129.89±14.52
	Средняя	155.13±9.60	135.50±2.70	126.76±4.96	119.67±4.09	120.65±4.69	109.80±2.81	104.35±2.63
	Сильная	109.46±3.94	92.833±4.51	87.20±4.35	84.09±6.13	79.24±3.81	70.15±4.41	68.33±4.66
2022	Минимальная		205.17±9.89	195.55±11.65	146.65±11.39	133.69±10.86	129.40±117.38	124.46±5.23
	Средняя		139.68±2.74	132.68±4.42	124.46±4.00	108.76±3.94	117.38±17.94	116.54±16.98
	Сильная		96.69±5.52	92.68±4.41	80.46±2.83	68.93±3.14	63.33±3.18	61.55±2.09

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. 4.6.11).

Таблица 4.6.11. Функционально-экологическая оценка запасов подвижного фосфора ( $P_2O_5$  (г/м<sup>2</sup>) в верхней части (0–15 см) дерново-подзолистых почв в условиях склонного мезорельефа и разной рекреационной нагрузки на ЛОД

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

В отличие от минеральных форм азота, в мае-июле 2021 года с повышенным на 20% относительно среднеголетних значений количеством осадков содержание подвижного фосфора в верхних горизонтах почв четырех из пяти исследуемых участков (за исключением подошвы склона юго-западной экспозиции) незначительно, но устойчиво на 1–6 мг/кг выше его содержания в 2022 году с близким к среднеголетним значениям количеством осадков. В августе-октябре наблюдается обратный тренд – с более низким содержанием подвижного фосфора в 2021 году (табл. 4.6.9 и 4.6.10) при очень низком количестве осадков в августе и первой декаде сентября 2022 года (см. табл. 2.1.2).

В почвах на подошве склона юго-западной экспозиции наблюдается обратная картина: с более низким содержанием подвижного фосфора в мае-июле 2021 году и преобладанием его более высоких значений в августе-октябре – по сравнению с аналогичными почвами и месяцами 2022 года.

Как и в случае подвижного фосфора, весенние месяцы (апрель – май) характеризуются максимальным по сезону содержанием подвижного калия в верхних горизонтах всех исследуемых почв, и последующий тренд постепенного обеднения почв подвижным калием продолжается до октября. При расчете средних значений для объединенного слоя 0–15 см исследуемых почв каждого из двух годов наблюдений ежемесячно наблюдаемые изменения, как правило, статистически недостоверны, но формируют аналогичные по разным вариантам почв и логично объяснимые сезонные тренды (табл. 4.6.12 и 4.6.13).

В большинстве случаев статистически достоверны различия в содержании подвижного калия в верхних горизонтах почв на разных элементах склона и по степени рекреационной нагрузки на почвы склонов (табл. 4.6.12 и 4.6.13). Почвы на вершине моренного холма с минимальным уровнем рекреационной нагрузки часто характеризуются повышенной пространственной неоднородностью, что может сопровождаться отсутствием статистически достоверных различий при сопоставлении с ними почв на средней части склона или со средней нагрузкой.

Таблица 4.6.12. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания подвижного калия (мг/кг) в 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
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	122.50±24.26	117.93±20.48	92.36±5.11	89.65±10.75	77.20±14.40	71.50±9.80	70.05±8.80
	Средняя	100.73±5.95	97.83±6.22	88.63±3.90	82.00±6.33	72.46±8.49	64.96±7.91	61.21±9.12
	Сильная	87.60±8.93	81.50±6.34	73.26±8.56	63.76±5.38	68.00±11.22	64.85±8.57	61.00±10.84
2022	Минимальная		122.85±21.96	98.46±4.33	93.10±11.20	73.66±14.68	66.67±11.42	63.00±8.73
	Средняя		104.77±6.50	94.91±5.08	88.93±6.61	67.42±9.07	59.13±7.37	56.34±8.35
	Сильная		87.89±6.78	79.47±8.93	70.16±5.74	62.15±11.13	62.21±11.66	58.59±12.91
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	104.23±9.35	101.73±9.08	98.66±12.47	93.60±11.96	71.90±14.25	57.03±16.31	53.10±16.88
	Средняя	83.46±9.01	81.08±9.61	71.48±7.32	66.99±5.42	58.16±7.00	38.40±3.49	32.28±3.88
	Сильная	55.70±7.25	49.34±5.83	42.88±6.29	34.67±3.23	31.90±4.59	27.76±2.90	23.93±4.60
2022	Минимальная		108.68±10.02	105.87±14.20	98.76±12.26	66.06±13.62	54.40±15.61	48.85±16.90
	Средняя		88.14±10.06	77.71±7.72	73.27±6.57	53.12±7.76	32.10±3.79	27.87±4.34
	Сильная		56.97±6.47	49.16±4.98	40.87±3.62	27.08±5.13	23.83±3.01	17.92±3.95
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	85.83±7.60	81.88±6.8	77.29±8.68	69.46±11.01	56.60±8.26	52.83±10.41	50.05±9.00
	Средняя	67.63±11.69	64.73±11.33	56.90±9.47	54.24±7.57	50.86±8.25	44.93±7.19	41.18±8.15
	Сильная	58.80±13.51	55.50±14.04	50.91±12.11	46.72±10.47	44.20±10.19	37.76±9.27	31.65±9.34
2022	Минимальная		87.05±7.08	84.42±10.02	76.40±11.41	51.57±8.57	47.31±12.87	46.13±7.51
	Средняя		71.01±12.33	65.21±10.27	61.29±8.03	45.03±7.42	40.89±7.12	36.33±9.25
	Сильная		61.71±14.49	56.98±12.29	54.34±11.15	38.38±9.35	30.93±9.05	26.79±8.75

Таблица 4.6.13. Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики содержания подвижного калия (мг/кг) в верхней части профиля (0-15 см) дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции.

Год	Нагрузка	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
<b>На вершине пологого моренного холма</b>								
2021	Минимальная	122.50±24.26	117.93±20.48	92.36±5.11	89.65±10.75	77.20±14.40	71.50±9.80	70.05±8.80
	Средняя	100.73±5.95	97.83±6.22	88.63±3.90	82.00±6.33	72.46±8.49	64.96±7.91	61.21±9.12
	Сильная	87.60±8.93	81.50±6.34	73.26±8.56	63.76±5.38	68.00±11.22	64.85±8.57	61.00±10.84
2022	Минимальная		122.85±21.96	98.46±4.33	93.10±11.20	73.66±14.68	66.67±11.42	63.00±8.73
	Средняя		104.77±6.50	94.91±5.08	88.93±6.61	67.42±9.07	59.13±7.37	56.34±8.35
	Сильная		87.89±6.78	79.47±8.93	70.16±5.74	62.15±11.13	62.21±11.66	58.59±12.91
<b>На средней части склона</b>								
2021	Минимальная	86.80±3.60	82.90±3.71	79.30±3.97	73.97±4.22	64.18±4.07	61.40±2.73	57.47±3.27
	Средняя	74.73±4.18	70.61±4.91	67.78±5.24	57.57±2.88	47.49±3.28	43.74±3.83	37.62±4.22
	Сильная	68.20±4.30	64.78±4.80	58.74±6.35	51.82±2.70	37.51±2.57	31.39±2.61	26.55±3.69
2022	Минимальная		90.10±4.49	86.25±4.96	81.10±5.45	58.66±6.40	55.57±2.32	51.63±2.69
	Средняя		76.84±4.74	74.83±5.64	65.89±3.67	43.45±3.21	38.70±4.81	31.81±3.38
	Сильная		71.06±3.56	66.36±6.78	57.89±2.89	30.67±2.36	26.54±3.59	20.90±2.66
<b>На подошве склона</b>								
2021	Минимальная	75.30±3.05	72.83±4.09	71.32±3.05	67.14±5.87	57.68±6.54	53.75±7.07	52.33±6.58
	Средняя	66.23±1.78	63.47±1.63	62.25±1.77	55.83±3.49	45.08±3.71	38.96±4.14	33.51±4.63
	Сильная	59.67±1.27	57.00±1.13	55.68±1.27	48.17±4.15	33.53±4.01	28.69±4.62	23.91±3.65
2022	Минимальная		79.96±4.09	76.48±3.46	74.34±6.01	55.05±5.80	48.89±6.07	48.29±6.53
	Средняя		71.78±2.43	68.53±2.95	62.06±3.34	38.78±4.01	33.92±5.17	26.68±4.42
	Сильная		63.08±1.31	61.89±1.72	54.45±3.26	29.60±4.18	22.86±3.75	19.80±3.65

В исследованных почвах ярко выражен общий устойчивый тренд обеднения подвижным калием почв на склоне при максимальном содержании подвижного калия в почве на вершине моренного холма с минимальным уровнем рекреационной нагрузки (табл. 4.6.12 и 4.6.13). Как и в случае подвижного фосфора, верхние горизонты почв склона северо-восточной экспозиции устойчиво и достоверно богаче подвижным калием аналогичных почв на склоне юго-западной экспозиции.

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. 4.6.14).

Таблица 4.6.14. Функционально-экологическая оценка запасов подвижного калия ( $K_2O$ ,  $г/м^2$ ) в верхней части (0–15 см) дерново-подзолистых почв в условиях склонного мезорельефа и разной рекреационной нагрузки на ЛОД

КУМ	$K_2O$ , кг м-2						$\Delta K_2O$ (кг м-2)
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
<b>Минимальный уровень рекреационной нагрузки</b>							
<b>ВМХ</b>	20.8	20.2	19.5	18.9	17.1	15.8	<b>5.01</b>
<b>ССВ</b>	15.1	14.4	13.7	12.6	10.4	10	<b>5.14</b>
<b>ПСВ</b>	19.2	18.9	18.4	17.9	13.9	10.7	<b>8.52</b>
<b>СЮЗ</b>	20.5	19.8	19.5	18.8	16.5	12.1	<b>8.32</b>
<b>ПЮЗ</b>	17.9	17.5	17.2	16.3	14.1	12.5	<b>5.38</b>
<b>Средний уровень рекреационной нагрузки</b>							
<b>ВМХ</b>	19	18.3	16.9	15.9	14.2	12.6	<b>6.37</b>
<b>ССВ</b>	15	16.1	14.3	13.8	12.1	7.88	<b>7.07</b>
<b>ПСВ</b>	13.4	13.4	11.9	11.6	11	8.24	<b>5.18</b>
<b>СЮЗ</b>	17.5	16.3	15.8	15.5	12.9	10.3	<b>7.19</b>
<b>ПЮЗ</b>	16.7	16.7	15.9	14.3	11.7	10.3	<b>6.36</b>
<b>Сильный уровень рекреационной нагрузки</b>							
<b>ВМХ</b>	16.6	16.4	14.8	13.1	12	11.8	<b>4.82</b>
<b>ССВ</b>	10.9	10.9	9.56	7.93	7.38	5.99	<b>4.9</b>
<b>ПСВ</b>	12.5	12.5	11.5	10.8	10.4	7.18	<b>5.29</b>
<b>СЮЗ</b>	16.3	15.2	15.1	14.9	11.6	7.14	<b>9.2</b>
<b>ПЮЗ</b>	15.3	16.1	15.9	14.1	9.86	8.31	<b>7.01</b>

В отличие от подвижного фосфора, в мае-июле 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков содержание подвижного калия в верхних горизонтах почв всех исследуемых участков незначительно, но устойчиво на 4–7 мг/кг ниже его содержания в 2022 году с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков. В августе-октябре наблюдается обратный тренд – с более высоким содержанием подвижного калия в 2021 году (табл. 4.6.12 и 4.6.13) при очень низком количестве осадков в августе и первой декаде сентября 2022 года (см. табл. 2.1.2).

Отмеченные закономерности позволяют уточнить роль мезорельефа городских лесных экосистем северной части Москвы и уровня оказываемой на них рекреационной нагрузки в пространственной дифференциации и сезонной динамике кислотности верхних горизонтов зональных дерново-подзолистых почв и содержания в них подвижных форм основных элементов питания (азота, фосфора и калия), которые в значительной мере определяют уровень выполнения почвами экологической функции обеспечения продукционного процесса растений доступными формами элементов питания.

Проведенные в весенне-летне-осенних сезонах 2021 и 2022 годов мониторинговые наблюдения за сезонной динамикой актуальной, обменной кислотности и содержания подвижных форм минерального азота, фосфора и калия в верхних горизонтах дерново-подзолистых почв контрастных элементов представительной склоновой катены лесных экосистем с различных уровнем рекреационной нагрузки в условиях Северного округа Москвы показали их повышенную пространственно-временную изменчивость, в значительной мере определяемую положением почвы в склоновом мезорельефе (включая экспозицию склона), уровнем рекреационной нагрузки (диагностируемой по выраженности неорганизованной тропиной сети) и погодными условиями текущего сезона (годовой суммой осадков):

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

2. Преобладающие по площади почвы склонов характеризуются устойчиво более кислой реакцией среды, по сравнению с почвами пологого водораздельного моренного холма, а максимальной кислотностью отличаются почвы на подошве исследованных склонов. Реакция среды почв на склоне северо-восточной экспозиции устойчиво кислее их аналогов на склоне юго-западной экспозиции. Различия максимально выражены на площадках с минимальным уровнем рекреационной нагрузки и частично сглаживаются при возрастании нагрузки, при частичной нейтрализации реакции среды. Различия обменной кислотности почв по элементам рельефа могут достигать 0,8–0,9 единицы pH, по уровню рекреационной нагрузки – 0,6–0,7 единицы pH.

3. В условиях года с повышенным количеством осадков реакция среды верхних горизонтов почв на вершине моренного холма отличается преимущественно пониженным уровнем актуальной кислотности – по сравнению с данными за год с близким к среднемноголетним значениям количеством осадков. В почвах на склоне северо-восточной экспозиции наблюдается обратный тренд – в сторону подкисления.

4. Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются и максимальным по сезону содержанием обменного аммония и нитратов в верхних горизонтах всех исследуемых почв. Последующий тренд постепенного обеднения ими почв продолжается до августа, с последующим обогащением в сентябре, максимально выраженным в почвах с минимальным уровнем рекреационной нагрузки.

5. Почвы склонов характеризуются устойчиво более низким содержанием обменного аммония, по сравнению с почвами пологого водораздельного моренного холма. 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.

6. 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: вплоть до 2-кратного сокращения на подошве склона. В почвах на склоне юго-западной экспозиции наблюдается обратный тренд: с преобладанием более высоких значений содержания нитратов по сравнению с аналогичными почвами на вершине холма.

7. Почвы на всех исследованных элементах рельефа характеризуются общим трендом значительного (от 1,4- до 4-кратного), но не всегда статистически достоверного снижения содержания аммония и нитратов при возрастании рекреационной нагрузки.

8. 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 среднемноголетнему количеству 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.

9. Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются и максимальным по сезону содержанием подвижных форм фосфора и калия в верхних горизонтах всех исследуемых почв. Последующий тренд постепенного обеднения почв подвижным фосфором продолжается до октября. В большинстве случаев статистически достоверно значительное снижение содержания подвижных форм фосфора и калия при возрастании степени рекреационной нагрузки.

10. Различия в содержании подвижного фосфора по элементам рельефа статистически не всегда достоверны – при общем устойчивом тренде обогащения им почв на склоне при максимальном содержании в почвах с минимальным уровнем рекреационной нагрузки на подошвах склонов. Почвы склона северо-восточной экспозиции, как правило, устойчиво и достоверно богаче подвижными формами фосфора и калия аналогичных почв юго-западной экспозиции.

## ГЛАВА 5. Экологическая оценка влияния склонового мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику содержания гумуса и почвенных потоков CO<sub>2</sub>

### 5.1 Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO<sub>2</sub> на вершине пологого моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

Результаты мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости содержания гумуса в ходе основного сезона вегетации показали его выраженную профильную дифференциацию: с доминирующим перепадом значений при переходе от гумусово-аккумулятивного и аккумулятивно-элювиального горизонтов к верхней части элювиального в 0,2-0,4 % – при ярко выраженной (вплоть до 1,5-кратной и выше) сезонной динамике с максимумом в апреле-мае и минимальными значениями в октябре (рис. 5.1.1).

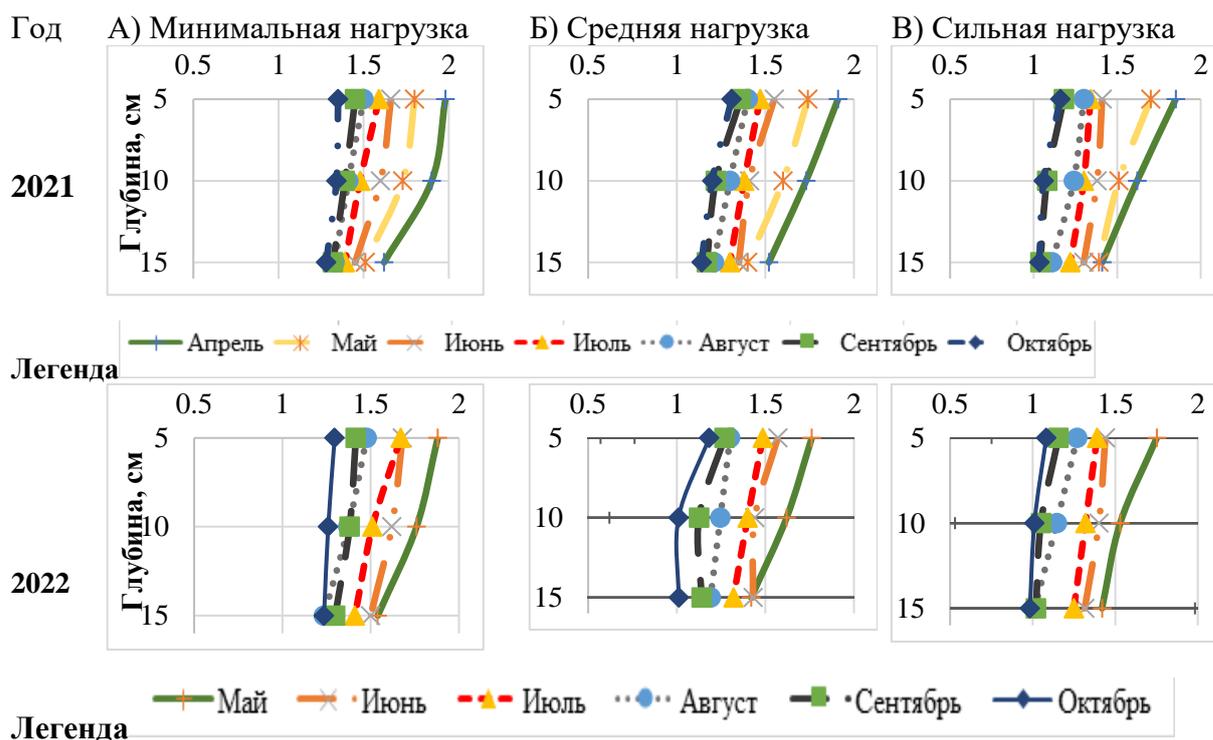


Рисунок 5.1.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв на вершине пологого моренного холма с увлечением рекреационной нагрузки

Возрастание рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня сопровождается существенным снижением содержания гумуса: на 0,1-0,25% – которое прослеживается по всему сезону наблюдений.

В условиях сезона 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков в весенние месяцы более ярко выражен аккумулятивный характер профильного распределения гумуса с превышением его содержания в аналогичных горизонтах в сезоне 2022 года с близким к среднемноголетнему количеству осадков на 0,15-0,25%, что еще раз подтверждает сезонный характер дополнительного активного поступления из разлагающихся опада и растительных корневых остатков потечного гумуса, формирующего так называемую «гумусовую занавеску» (Яшин и др., 2017; 2020).

Характерное для конца мая-начала июня устойчивое повышение среднесуточной температуры при еще сохранившихся запасах весенней влаги (см. раздел 3) и основных элементов питания (см. раздел 4) сопровождается сезонным всплеском активности почвенной микробиоты, диагностируемой прямыми измерениями *in situ* почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>, которая в это время на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой достигает максимальных за сезон значений в 34-35 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в сутки (рис. 5.1.2).

Затем в ходе всего сезона наблюдений до конца октября наблюдается общий тренд устойчивого снижения уровня почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> до уровня 12-11 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в сутки и ниже. В условиях сезона 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков сезонное снижение почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> происходит более плавно, чем в сезоне 2022 года с близким к среднемноголетнему количеству осадков, когда уже в конце июня эмиссия CO<sub>2</sub> снизилась почти в полтора раза (рис. 5.1.2).

С увеличением уровня рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня наблюдается устойчивое по сезону снижение уровня почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> по сравнению с площадкой минимального уровня нагрузки: на 1-5 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в сутки в случае средней нагрузки, и на 3-13 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в сутки – в случае сильной (рис. 5.1.2). Часто статистически достоверное снижение уровня почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в случае среднего и сильного уровня нагрузки

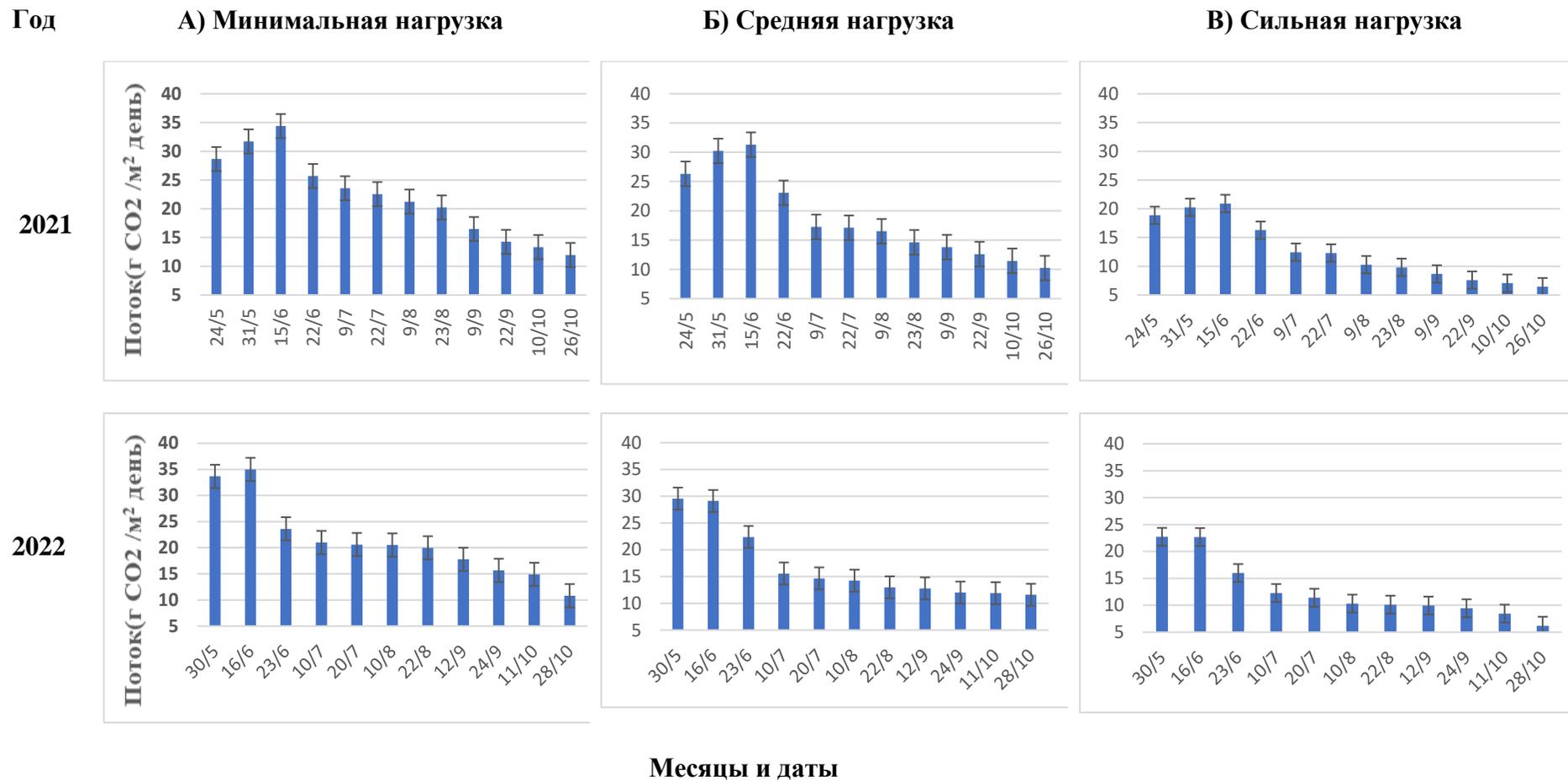


Рисунок 5.1.2. Изменение почвенных потоков СО<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) на вершине выположенного моренного холма с увеличением рекреационной нагрузки

связано как с пониженным содержанием гумуса (см. табл. 5.1.1), так и менее благоприятными условиями функционирования почвенной микробиоты.

## 5.2 Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO<sub>2</sub> на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости содержания гумуса исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части склона северо-восточной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки в ходе основного сезона вегетации показал более ярко выраженную, по сравнению с почвами вершины моренного холма дифференциацию содержания гумуса их гумусово-аккумулятивных и верхней части элювиальных горизонтов: с более высоким, в среднем, содержанием гумуса и перепадом его значений на площадке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки от 0,2 до 0,7% (рис. 5.2.1).

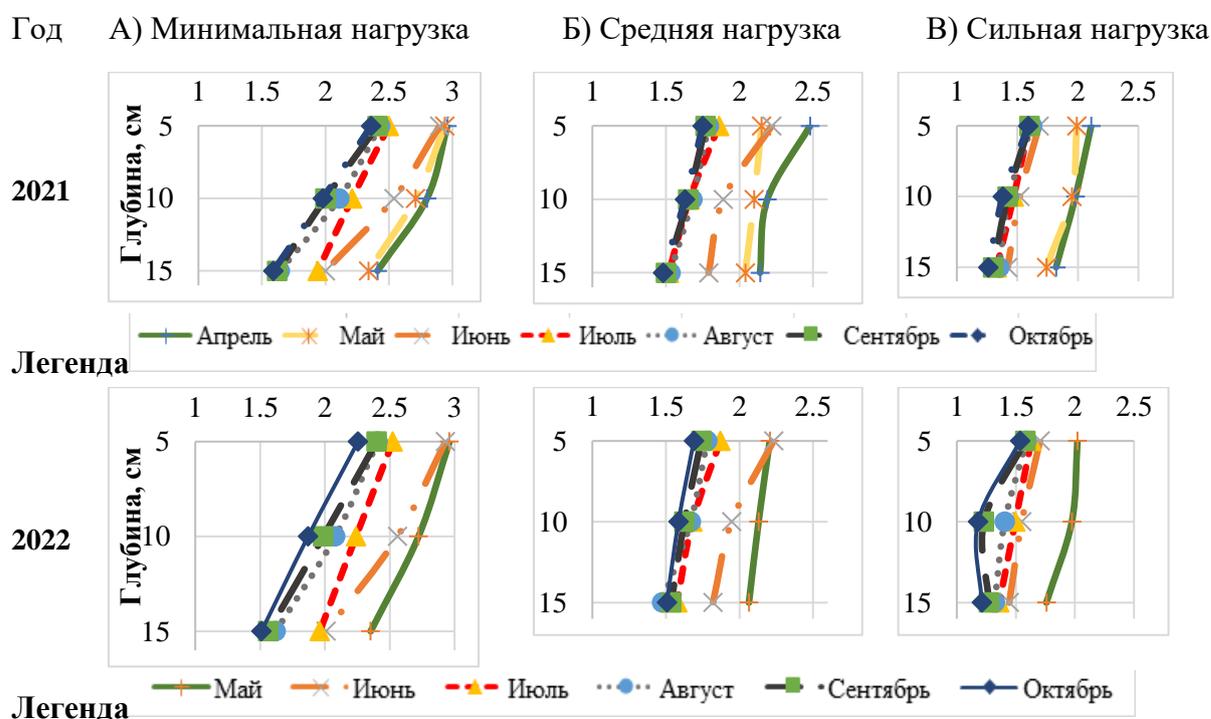


Рисунок 5.2.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв на средней части склона северо-восточной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки

В отличие от почв на вершине моренного холма эти почвы на склоне характеризуется устойчиво более высоким (на 0,3-1,0%) содержанием гумуса в гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтах (соответственно, в слоях 0–5 и 5–10 см – при сохранении ярко выраженной сезонной динамики содержанием гумуса: с перепадом от 0,5 до 0,8% во всех исследуемых горизонтах (рис. 5.2.1).

Возрастание рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня сопровождается существенно более выраженным, чем в случае почв вершины моренного холма, снижением содержания гумуса: с максимальным падением в 0,8-1,0% (рис. 5.2.1).

В условиях сезона 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков в большинстве случаев наблюдается более высокое, по сравнению с данными его содержания в аналогичных горизонтах в сезоне 2022 года, содержание гумуса, но различия в данном случае выражены слабее, чем в почвах моренного холма (рис. 5.2.1).

Средний уровень эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  и общий тренд их постепенного сезонного снижения с весеннего-раннелетнего максимума в 35-37 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки до сезонного минимума в 8-17 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки в октябре (рис. 5.2.2), во многом, аналогичны почвам вершины моренного холма (см. рис. 5.1.2). При этом отмечается преобладание, в целом, более плавного изменения уровня эмиссии на фоне, в среднем, незначительно повышенных, на 3-5 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки по сравнению с почвами вершины моренного холма, значениями почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ .

С увеличением уровня рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня наблюдается, в целом, устойчивое по сезону и более выраженное (по сравнению с почвами вершины моренного холма) снижение уровня почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в сопоставлении с площадкой минимального уровня нагрузки: на 1-6 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки в случае средней нагрузки, и на 9-15 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки – в случае сильной (рис. 5.2.2).

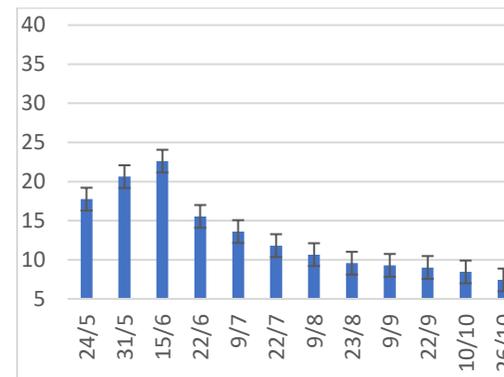
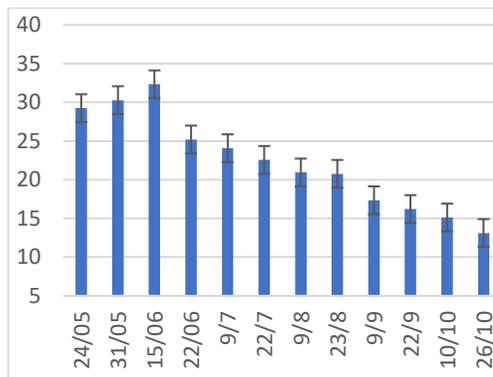
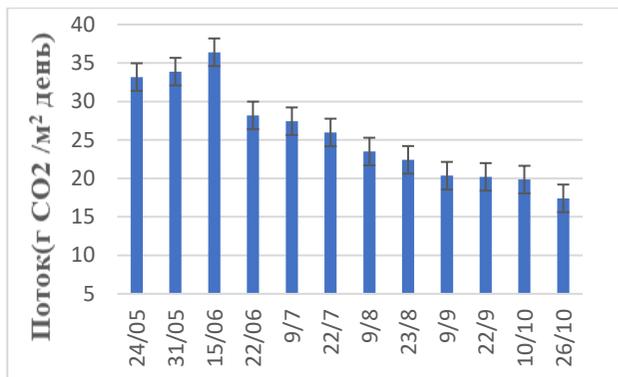
Год

А) Минимальная нагрузка

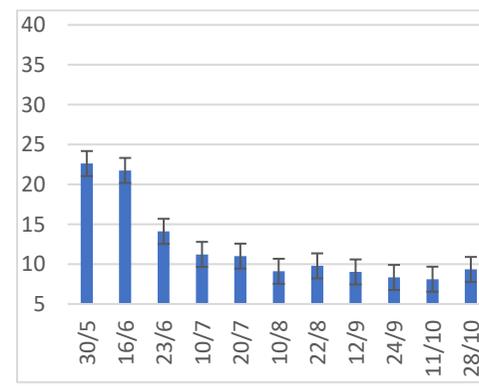
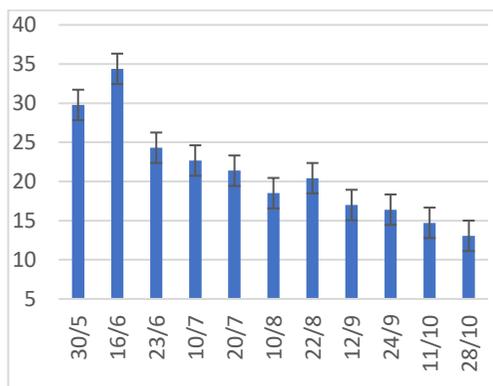
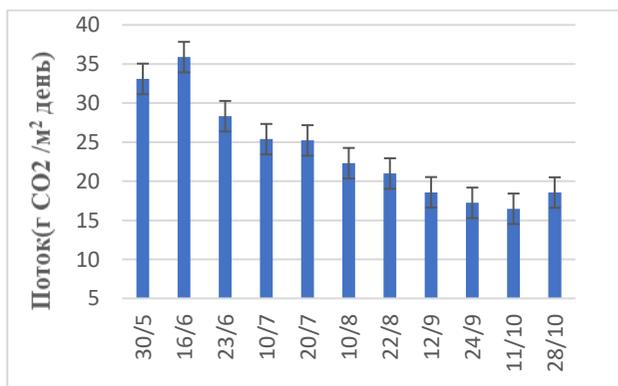
Б) Средняя нагрузка

В) Сильная нагрузка

2021



2022



Месяцы и даты

Рисунок 5.2.2. Изменение почвенных потоков CO<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) на средней части склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

### 5.3 Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO<sub>2</sub> на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости содержания гумуса исследуемых дерново-подзолистых почв на подошве склона северо-восточной экспозиции в ЛОД с увеличением рекреационной нагрузки в ходе основного сезона вегетации показал наиболее ярко выраженную, по сравнению с выше лежащими почвами, дифференциацию содержания гумуса их гумусово-аккумулятивных, аккумулятивно-элювиальных и верхней части элювиальных горизонтов: с максимальным, в среднем, на склоне содержанием гумуса (до 3,4%) и перепадом его значений на площадке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки от 0,7 до 1,0% (рис. 5.3.1).

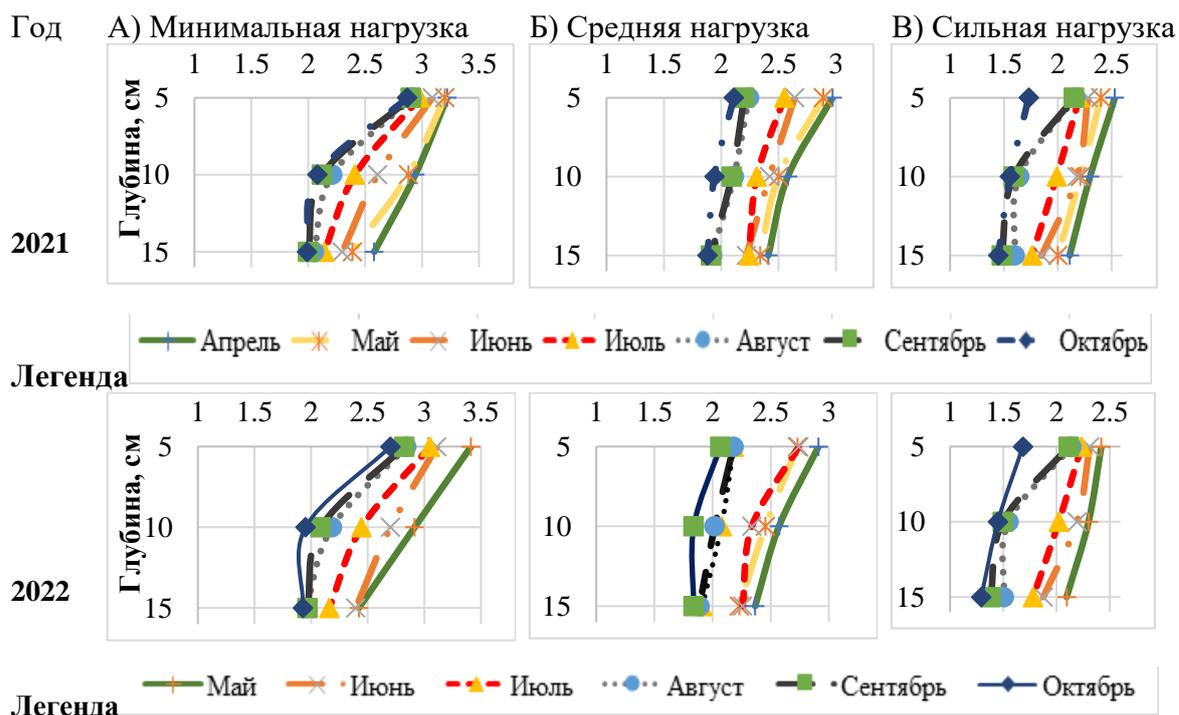


Рисунок 5.3.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв на подошве склона северо-восточной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки

Сезонная динамика содержания гумуса, в большинстве случаев, несколько ниже предыдущих почв: с общим перепадом от 0,4 до 0,9% во всех исследуемых горизонтах (рис. 5.3.1).

Максимально выражено снижение содержания гумуса с возрастанием рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня: с максимальным падением в 1,0-1,2% (рис. 5.3.1).

Сравнения данных содержания гумуса сезонов 2021 года с повышенным на 20% относительно среднегодовалых значений количеством осадков и 2022 года с близким к среднегодовому количеству осадков менее однозначны, чем в выше лежащих почвах, что хорошо согласуется с более устойчивым повышенным увлажнением почв на подошве моренного холма (см. раздел 3.3).

Почвы подошвы склона характеризуются максимальным для склона уровнем почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , которая на площадках с минимальной рекреационной нагрузкой в июне может достигать максимальных за сезон значений в 38-40 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки и даже в октябре не опускается ниже 20 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки (рис. 5.3.2).

С увеличением уровня рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня наблюдается устойчивое по сезону снижение уровня почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  по сравнению с площадкой минимального уровня нагрузки: на 3-7 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки в случае средней нагрузки, и на 10-13 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки – в случае сильной (рис. 5.3.2).

#### **5.4 Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков $\text{CO}_2$ на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки**

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости содержания гумуса исследуемых дерново-подзолистых почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки в ходе основного сезона вегетации показал более ярко выраженную, по сравнению с почвами противоположного склона дифференциацию гумуса

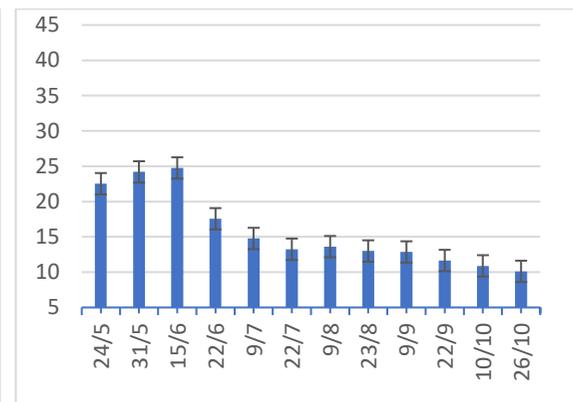
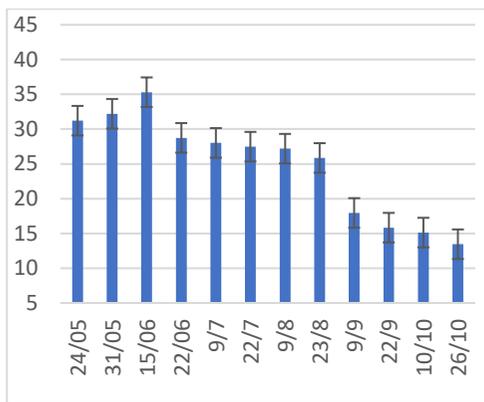
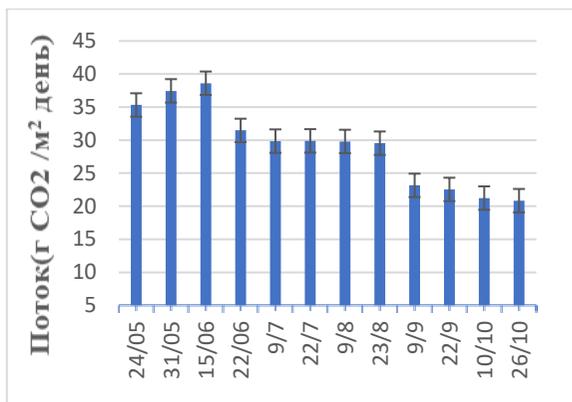
Год

А) Минимальная нагрузка

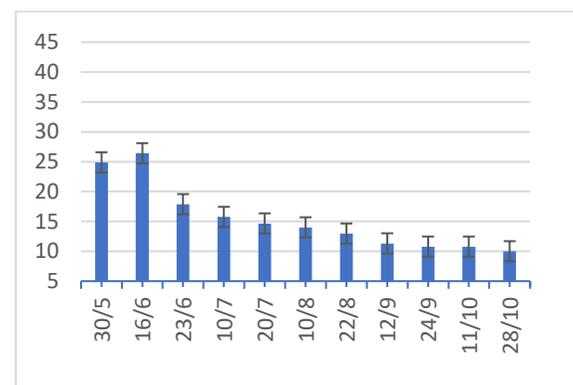
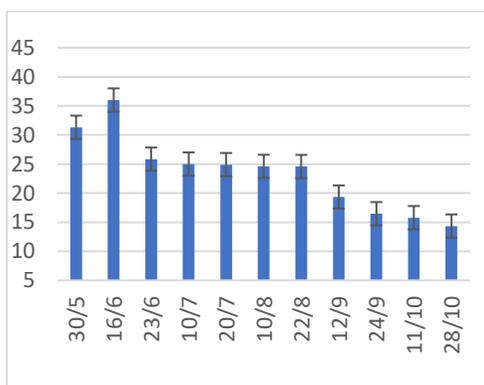
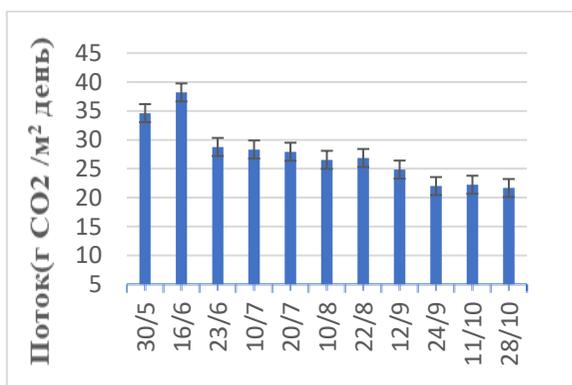
Б) Средняя нагрузка

В) Сильная нагрузка

2021



2022



Месяцы и даты

Рисунок 5.3.2. Изменение почвенных потоков СО<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) на подошве склона северо-восточной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

их гумусово-аккумулятивных и верхней части элювиальных горизонтов: с перепадом его значений на площадке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки от 0,7 до 1,3% (рис. 5.4.1).

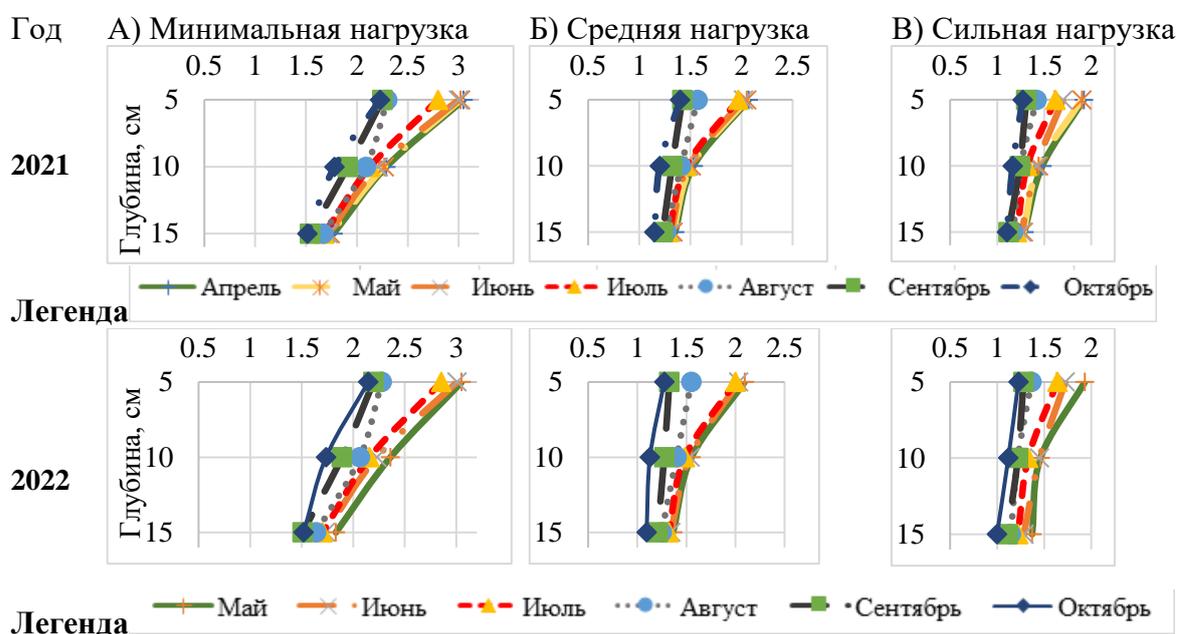


Рисунок 5.4.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв на средней части склона юго-западной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки

В отличие от почв противоположного склона эти почвы на длинном слабоогнутом склоне юго-западной экспозиции характеризуется резким снижением содержания гумуса при возрастании рекреационной нагрузки уже до среднего уровня: на 0,5-1,0% – и относительно небольшим диапазоном его сезонной динамики в верхней части элювиального горизонта (в пределах 0,3-0,4%) при двукратно большем диапазоне динамики гумуса – в гумусово-аккумулятивном (рис. 5.4.1).

Средний уровень эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  и общий тренд их постепенного сезонного снижения с раннелетнего максимума в 32-36 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки на площадках с минимальным и средним уровнем рекреационной нагрузки до сезонного минимума в 10-17 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки в октябре (рис. 5.4.2), во многом, аналогичны почвам противоположного склона (см. рис. 5.2.2), отличаясь от них большим контрастом площадок сильного и среднего уровня рекреационной нагрузки и двух сезонов наблюдений (рис. 5.4.2).

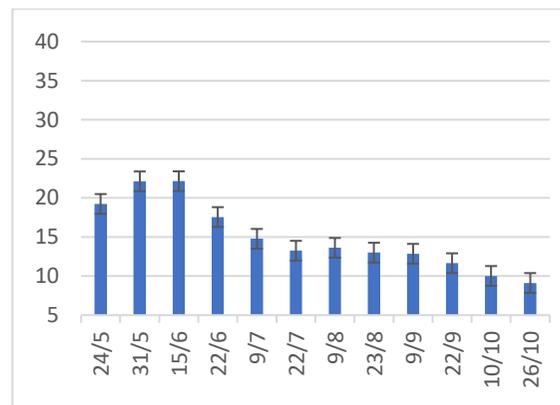
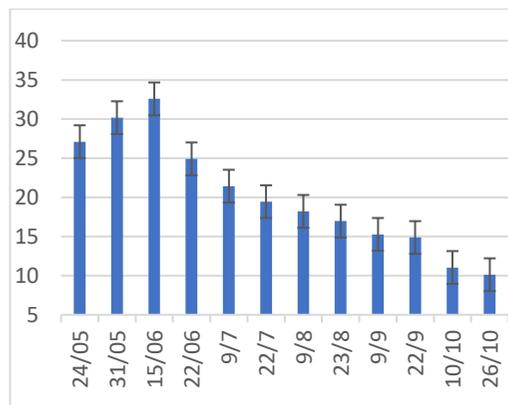
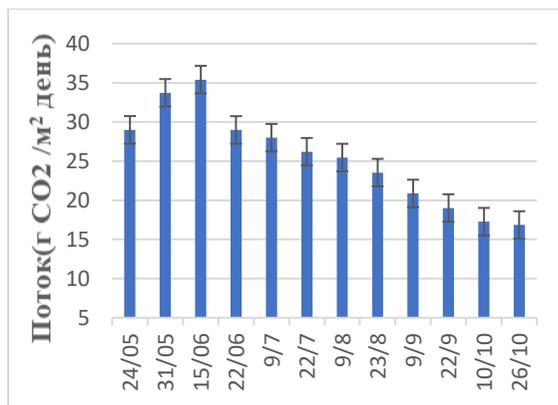
Год

А) Минимальная нагрузка

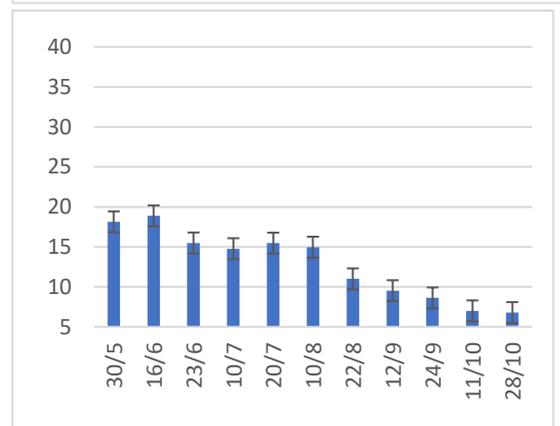
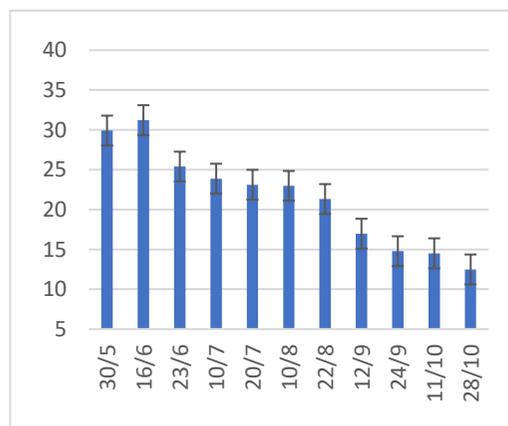
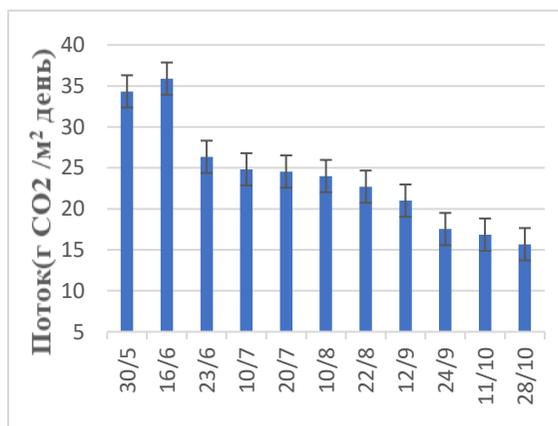
Б) Средняя нагрузка

В) Сильная нагрузка

2021



2022



Месяцы и даты

Рисунок 5.4.2. Изменение почвенных потоков СО<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) на средней части склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

## 5.5 Изменение содержания гумуса исследуемых почв и почвенных потоков CO<sub>2</sub> на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

Результат мониторинговых исследований пространственно-временной изменчивости содержания гумуса исследуемых дерново-подзолистых почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки в ходе основного сезона вегетации 2021 и 2022 годов показал наиболее ярко и устойчиво выраженную в исследованных почвах профильную дифференциацию содержания гумуса их гумусово-аккумулятивных, аккумулятивно-элювиальных и верхней части элювиальных горизонтов: с повышенным содержанием гумуса (до 3,3%) в горизонте А1 (0-5 см) и перепадом его значений на площадке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки от 1,0 до 1,3% (рис. 5.5.1).

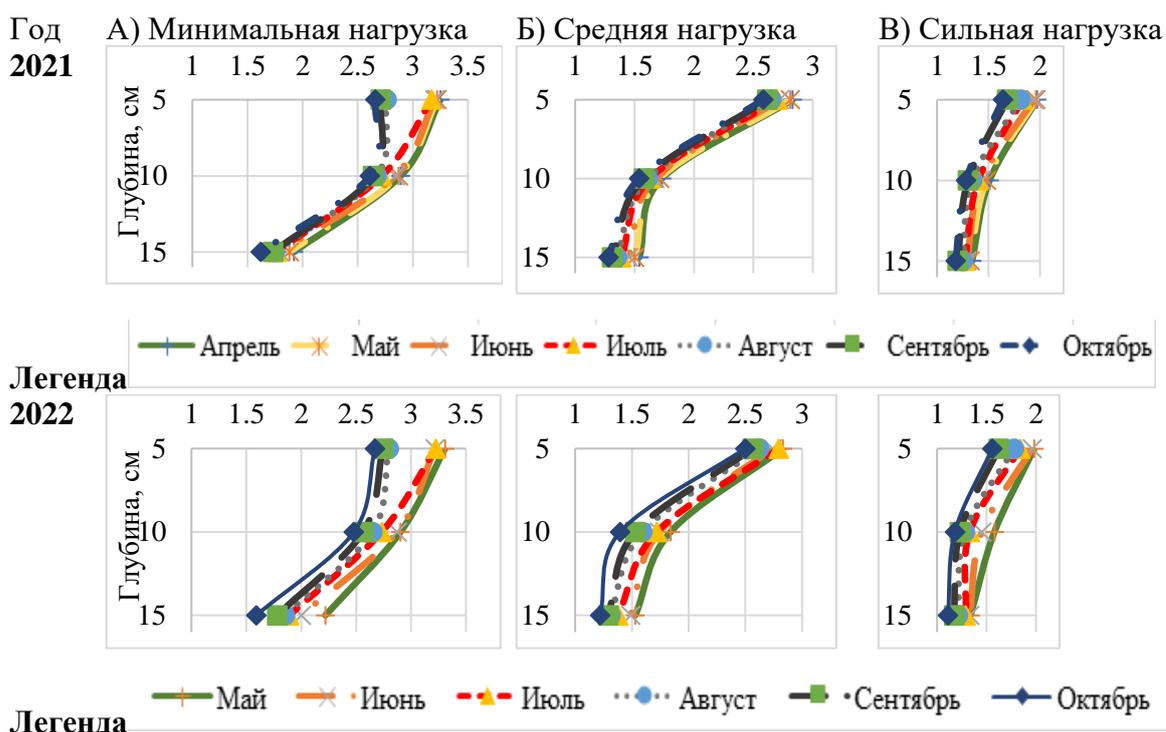


Рисунок 5.5.1. Изменение содержания гумуса исследуемых почв на подошве склона юго-западной экспозиции с увлечением рекреационной нагрузки

Сезонная динамика содержания гумуса, в большинстве случаев, существенно ниже почв на подошве противоположного склона: с общим перепадом от 0,2 до 0,7% во всех исследуемых горизонтах (рис. 5.5.1).

С возрастанием рекреационной нагрузки до среднего и сильного уровня содержание гумуса быстро падает: в гумусово-аккумулятивных горизонтах – на 0,5–1,3% (рис. 5.5.1).

В условиях сезона 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемноголетних значений количеством осадков минимальные значения содержания гумуса в гумусово-аккумулятивных и аккумулятивно-элювиальных горизонтах устойчиво незначительно выше их содержания в сезоне 2022 года с близким к среднемноголетнему количеству осадков, при меньшем диапазоне сезонной динамики гумуса во всех исследуемых горизонтах (рис. 5.5.1).

Общий уровень почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  и характер ее сезонной динамики (рис. 5.5.2) очень близки почвам на подошве противоположного склона (см. рис. 5.3.2). Отличаются от них более плавными изменениями почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в летние месяцы и более резким снижением эмиссии с наступлением осени (рис. 5.5.2), что хорошо согласуется с сезонной динамикой влажности и температуры почв как доминирующих лимитирующих экологических факторов их микробиологической активности, соответственно, в летние и осенние месяцы.

Средние значения почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в условиях сезона 2021 года с повышенным количеством осадков в летние и осенние месяцы, как правило, на 3–7 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки выше аналогичных значений 2022 года с близким к среднемноголетнему количеству осадков (рис. 5.5.2), что еще раз подтверждает лимитирующую роль влажности в летней микробиологической активности исследуемых дерново-подзолистых почв.

С увеличением уровня рекреационной нагрузки до сильного уровня наблюдается лучше выраженное, чем на противоположном склоне, но менее устойчивое по сезону снижение уровня почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  по сравнению с площадкой минимального уровня нагрузки: на 7–15 г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в сутки (рис. 5.5.2).

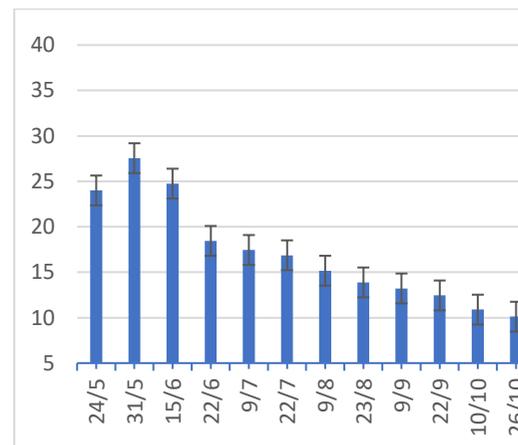
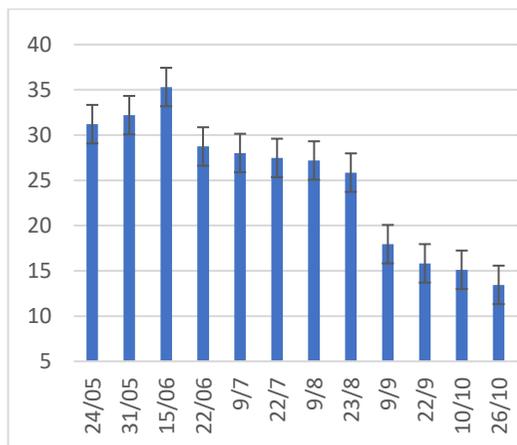
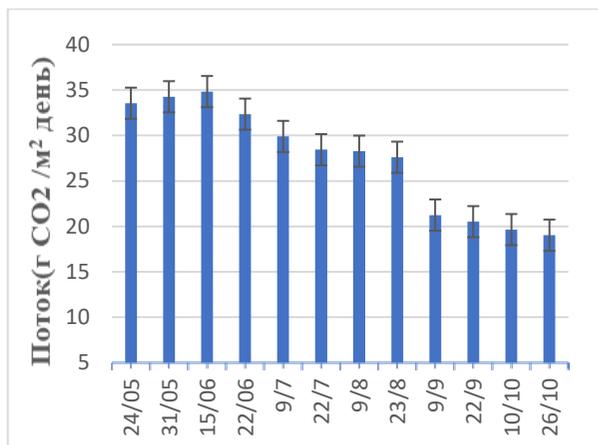
Год

А) Минимальная нагрузка

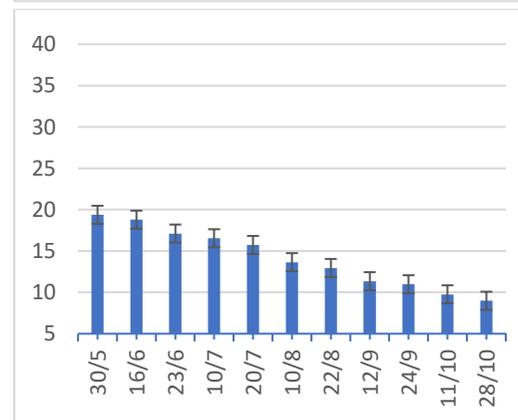
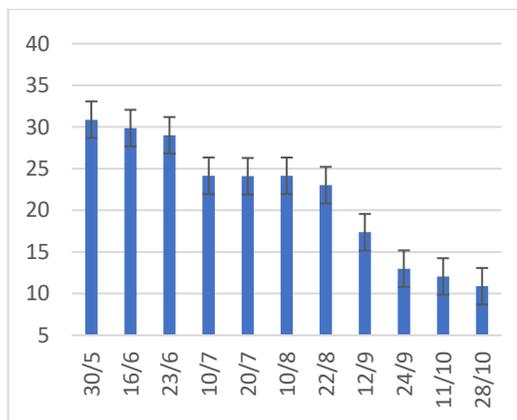
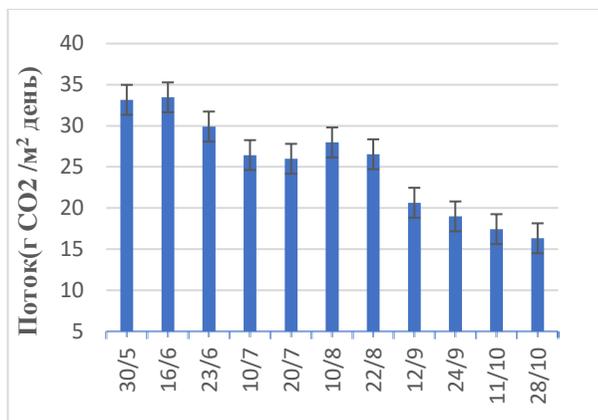
Б) Средняя нагрузка

В) Сильная нагрузка

2021



2022



Месяцы и даты

Рисунок 5.5.2. Изменение почвенных потоков CO<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) на подошве склона юго-западной экспозиции с увеличением рекреационной нагрузки

## 5.6. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на сезонную динамику запасов органического углерода и эмиссионных потоков CO<sub>2</sub> исследуемых почв

Мониторинговые наблюдения, проведенные в условиях 2021 года с повышенным на 20% относительно среднеголетних значений количеством осадков и 2022 года с очень близким к среднеголетним значениям количеством осадков, показали четко выраженную пространственную дифференциацию сезонной динамики запасов органического углерода в верхних горизонтах и эмиссионных потоков CO<sub>2</sub> исследуемых дерново-подзолистых почв по их позиции на склоне, экспозиции (и формы склона) и уровню рекреационной нагрузки (табл. 5.6.1 - 5.6.3).

Таблица 5.6.1. Экологическая оценка влияния склонного мезорельефа и рекреационной нагрузки на запасы органического углерода (C<sub>org</sub>, кг м<sup>-2</sup>) в верхней части (0–15 см) профиля дерново-подзолистых почв ЛОД

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

Весенние месяцы (апрель – май) характеризуются максимальными по сезону запасами органического углерода. Последующий тренд постепенной некомпенсируемой минерализации, как правило, продолжается до августа или сентября, с последующим, в различной степени выраженным, осенним накоплением органического углерода в верхних горизонтах минерального профиля исследуемых дерново-подзолистых почв (табл. 5.6.1).

Максимальными запасами органического углерода отличаются почвы с минимальным уровнем рекреационной нагрузки на более длинном слабовогнутом склоне юго-западной экспозиции (табл. 5.6.1) с устойчивым по сезону уровнем повышенного увлажнения (см. разделы 3.4 и 3.5). Для них же характерны минимальные диапазоны сезонной динамики запасов углерода среди почв с минимальным уровнем нагрузки. В наибольшей степени среди них сезонная динамика запасов углерода выражена на вершине моренного холма с минимальным запасом органического углерода и наиболее аэробными автоморфными условиями (табл. 5.6.1).

Возрастание уровня рекреационной нагрузки сопровождается ускоренными потерями запасов органического углерода в почвах сначала средней части склонов (при среднем уровне нагрузки), а затем и на подошве склонов (при сильном уровне нагрузки). Одновременно значительно возрастает диапазон сезонной динамики запасов органического углерода в почвах вершины и склонов моренного холма, при его сокращении на подошве склонов (табл. 5.6.1).

Отмеченные закономерности пространственной изменчивости, сезонной и межсезонной динамики запасов органического углерода хорошо согласуются с особенностями пространственно-временной изменчивости эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  с поверхности дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склонах северо-восточной и юго-западной экспозиции (табл. 5.6.2, 5.6.3).

**Таблица 5.6.2** Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики потоков CO<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) с поверхности дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне северо-восточной экспозиции.

Почвенных потоки CO <sub>2</sub> , г/м <sup>2</sup> по месяцам и неделям наблюдений													
Год	Нагрузка	На вершине моренного холма											
		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
		1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-31
2021	Минимальная	27.65±1.33	30.73±1.22	33.39±1.52	24.7±1.33	22.57±2.22	21.56±2.74	20.25±2.31	19.23±1.14	15.48±1.41	13.25±1.65	12.34±1.74	14.11±2.39
	Средняя	25.32±1.29	29.24±1.04	26.78±1.41	22.07±2	17.42±2.23	16.26±1.87	15.5±2.22	13.62±2.19	12.8±2.02	11.6±1.08	10.46±2.01	12.45±1.86
	Сильная	17.86±2.22	19.25±2.22	17.84±2.22	15.27±2.22	11.45±1.99	11.31±1.79	9.29±2.67	8.82±1.66	6.67±1.98	6.6±1.74	6.45±2.88	7.71±1.92
2022	Минимальная		33.84±1.11	29.78±2.21	24.09±1.97	23.78±1.78	22.77±2.09	16.8±1.33	15.78±1.89	13.59±1.45	11.36±0.88	9.99±1.45	11.33±0.44
	Средняя		33.38±1.09	24.88±2.23	20.46±2.17	19.13±2.09	18.41±1.78	13.25±2.21	11.99±1.08	11.88±2.22	10.75±1.11	9.01±0.22	10.54±1.19
	Сильная		23.36±1.48	16.23±2.88	14.66±1.98	13.66±2.11	12.52±2.48	5.84±0.88	5.37±2.75	4.78±1.17	4.71±2.22	5.06±2.35	6.44±2.22
На средней части склона													
2021	Минимальная	32.17±2.11	32.88±1.78	35.4±2.21	27.19±1.24	26.44±2	24.97±2	22.5±1.14	21.42±2.22	19.35±2.02	19.2±1.87	18.85±0.88	20.15±2.11
	Средняя	28.24±2.05	29.28±1.41	31.33±1.85	25.22±1.49	23.07±1.78	21.56±2.04	19.93±1.33	19.76±1.67	16.34±1.79	15.21±1.13	14.12±1.10	15.02±1.77
	Сильная	16.75±1.98	19.62±1.65	21.6±2.97	13.54±2.66	12.61±2.01	10.82±2.77	9.66±2.35	8.56±2.19	8.29±1.95	8.02±2.03	7.45±1.13	8±2.88
2022	Минимальная		35.99±0.85	31.79±2.3	27.07±0.89	28.65±1.93	27.18±0.65	19.05±0.72	17.97±0.23	17.46±1.15	17.31±1.11	15.47±0.87	16.25±1.28
	Средняя		33.54±1	28.22±1.95	24.87±1.11	25.48±2.10	24.17±1.11	17.53±1.21	17.47±0.8	15.55±0.82	14.46±2.31	13.72±1.04	13.53±0.95
	Сильная		24.73±2.11	18.99±2.77	13.93±2.45	13.82±2.12	12.03±2.78	8.21±2.88	8.11±2.45	7.4±2.33	7.13±2.74	7.04±2.18	7.78±2.77
На подошве склона													
2021	Минимальная	34.32±2.11	36.46±2.14	37.61±3.41	30.47±2.88	28.85±1.23	28.89±3.45	28.8±1.21	28.54±2.34	22.15±2.12	21.54±1.65	20.23±1.68	22.84±3.45
	Средняя	31.21±2.35	31.49±1.75	34.31±2.85	30.02±1.65	27.74±1.85	26.48±2.74	26.19±1.74	24.85±3.44	16.95±1.68	14.83±1.38	14.12±1.87	15.45±2.11
	Сильная	21.53±1.99	23.2±1.89	23.75±3.01	16.56±1.45	13.77±3.22	12.25±1.32	12.62±2.03	12±2.14	11.86±2.12	10.65±2.45	9.89±1.23	12.66±2.55
2022	Минимальная		38.21±2.3	33.77±1.54	31.66±2.48	30.74±2.4	30.78±2.49	25.54±2.11	25.86±2.11	20.26±1.42	19.65±1.6	18.34±2.45	20.95±1.48
	Средняя		36.31±2.22	33.45±2.02	30.66±1.85	28.95±1.65	28.69±1.54	23.44±2.1	23.41±2.31	16.06±1.11	13.99±2.0	13.13±2.67	14.44±1.24
	Сильная		27.31±1.88	20.14±1.78	16.11±2.45	15.98±2	14.46±1.66	11.17±1.69	10.55±1.48	9.97±1.32	8.76±1.18	8±1.88	11.22±1.43

\*\* при измерении 2 раза на месяц

**Таблица 5.6.3** Статистический анализ ( $\mu \pm \sigma$ ) сезонной динамики потоков CO<sub>2</sub> (г/м<sup>2</sup> в сутки) с поверхности дерново-подзолистых почв на ключевых участках экологического мониторинга ЛОД в условиях разного уровня рекреационной нагрузки на склоне юго-западной экспозиции.

Почвенных потоки CO <sub>2</sub> , г/м <sup>2</sup> по месяцам и неделям наблюдений													
Год	Нагрузка	На вершине моренного холма											
		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
		1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31
2021	Минимальная	27.65±1.33	30.73±1.22	33.39±1.52	24.7±1.33	22.57±2.22	21.56±2.74	20.25±2.31	19.23±1.14	15.48±1.41	13.25±1.65	12.34±1.74	14.11±2.39
	Средняя	25.32±1.29	29.24±1.04	26.78±1.41	22.07±2	17.42±2.23	16.26±1.87	15.5±2.22	13.62±2.19	12.8±2.02	11.6±1.08	10.46±2.01	12.45±1.86
	Сильная	17.86±2.22	19.25±2.22	17.84±2.22	15.27±2.22	11.45±1.99	11.31±1.79	9.29±2.67	8.82±1.66	6.67±1.98	6.6±1.74	6.45±2.88	7.71±1.92
2022	Минимальная		33.84±1.11	29.78±2.21	24.09±1.97	23.78±1.78	22.77±2.09	16.8±1.33	15.78±1.89	13.59±1.45	11.36±0.88	9.99±1.45	11.33±0.44
	Средняя		33.38±1.09	24.88±2.23	20.46±2.17	19.13±2.09	18.41±1.78	13.25±2.21	11.99±1.08	11.88±2.22	10.75±1.11	9.01±0.22	10.54±1.19
	Сильная		23.36±1.48	16.23±2.88	14.66±1.98	13.66±2.11	12.52±2.48	5.84±0.88	5.37±2.75	4.78±1.17	4.71±2.22	5.06±2.35	6.44±2.22
На средней части склона													
2021	Минимальная	28.74±2.33	31.15±2.41	28.37±2.12	27.99±2.28	27±3.24	25.2±1.99	24.46±2.14	22.54±2.49	19.88±2.22	18.02±1.74	16.27±2.11	17.85±2.12
	Средняя	26.64±1.48	29.31±1.1	24.03±1.74	23.92±2.18	20.43±3	18.45±2.22	17.21±1.98	15.96±1.72	14.27±2.04	13.87±2.10	10.04±1.41	11.48±1.74
	Сильная	19.31±1.59	20.63±1.22	18.75±1.09	15.22±1.07	14.02±2.49	13.6±2.09	12.06±1.99	10.48±1.08	9.95±0.97	9.89±1.05	8.02±1	9.49±2.01
2022	Минимальная		32.26±2.32	26.56±2.31	26.08±3.11	28.33±2.23	26.58±2.41	21.01±2.78	19.09±1.49	17.99±2.44	16.13±1.11	14.68±2.12	16.22±1.11
	Средняя		26.87±1.66	20.49±2.48	23.12±2.28	20.43±3.12	19.66±1.86	13.61±1.14	12.33±1.23	11.31±1.74	11.28±1.32	9.22±0.59	10.87±2.12
	Сильная		22.74±1.72	17.14±1.98	15.12±2.79	14.43±2.77	14.41±2.12	8.61±1.88	9.03±1.11	8.06±1	7.22±0.98	6±0.88	7.29±0.94
На подошве склона													
2021	Минимальная	32.55±2.11	33.86±1.98	34.31±1.78	31.35±1.44	28.9±1.81	27.44±1.77	27.27±2.11	26.61±1.11	20.25±0.85	19.52±1.18	18.65±0.59	19.09±1.01
	Средняя	30.76±2.09	31.17±2.03	32.95±1.11	29.69±1.08	27.58±0.98	24.69±1.65	24±1.64	23.26±1	13.4±1.78	13.14±1.47	12.11±1.06	13.21±1.55
	Сильная	21.32±2.66	22.38±1.98	19.82±0.95	17.89±1.22	14.41±2.52	13.85±0.68	13.02±0.75	12.44±1.14	11.74±0.44	10.41±1.57	10.48±0.42	11.23±1.78
2022	Минимальная		36.97±2.22	35.7±0.52	30.74±1.52	29.11±1.11	28.65±1.2	23.82±1.23	23.16±1.03	18.36±2.10	17.63±1.62	16.44±1.74	17.33±1.08
	Средняя		32.26±2.16	33.56±0.44	26.08±2.47	28.33±1.45	25±2.11	21.01±1.45	19.09±2.95	17.99±0.74	16.13±2.45	14.68±1.32	16.22±2.07
	Сильная		23.49±2.12	19.21±0.45	16.44±1.12	15.62±0.49	14.99±1.08	9.57±1.23	11.35±2.14	9.85±0.78	8.76±1.23	8.27±0.68	9.99±0.79

\*\* при измерении 2 раза на месяц

Различия по элементу рельефа (включая разницу в экспозиции склона) и степени рекреационной нагрузки в большинстве случаев статистически достоверны и в условиях 2022 года с очень близким к среднемуголетним значениям количеством осадков и в условиях 2021 года с повышенным на 20% относительно среднемуголетнего количеством осадков (табл. 5.6.2 и 5.6.3).

Среди сезонно изменяющихся лимитирующих экологических факторов почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в проведенных с мая по октябрь 2021 года мониторинговых наблюдениях наибольшую значимость показали влажность, температура верхних горизонтов почвы, запасы в них органического углерода и температура воздуха (рис. 5.6.1). Статистическая достоверность влияния микроклиматических факторов существенно возрастает при их дифференцированном анализе по положению почв в мезорельефе и сезонам года (табл. 5.6.4).

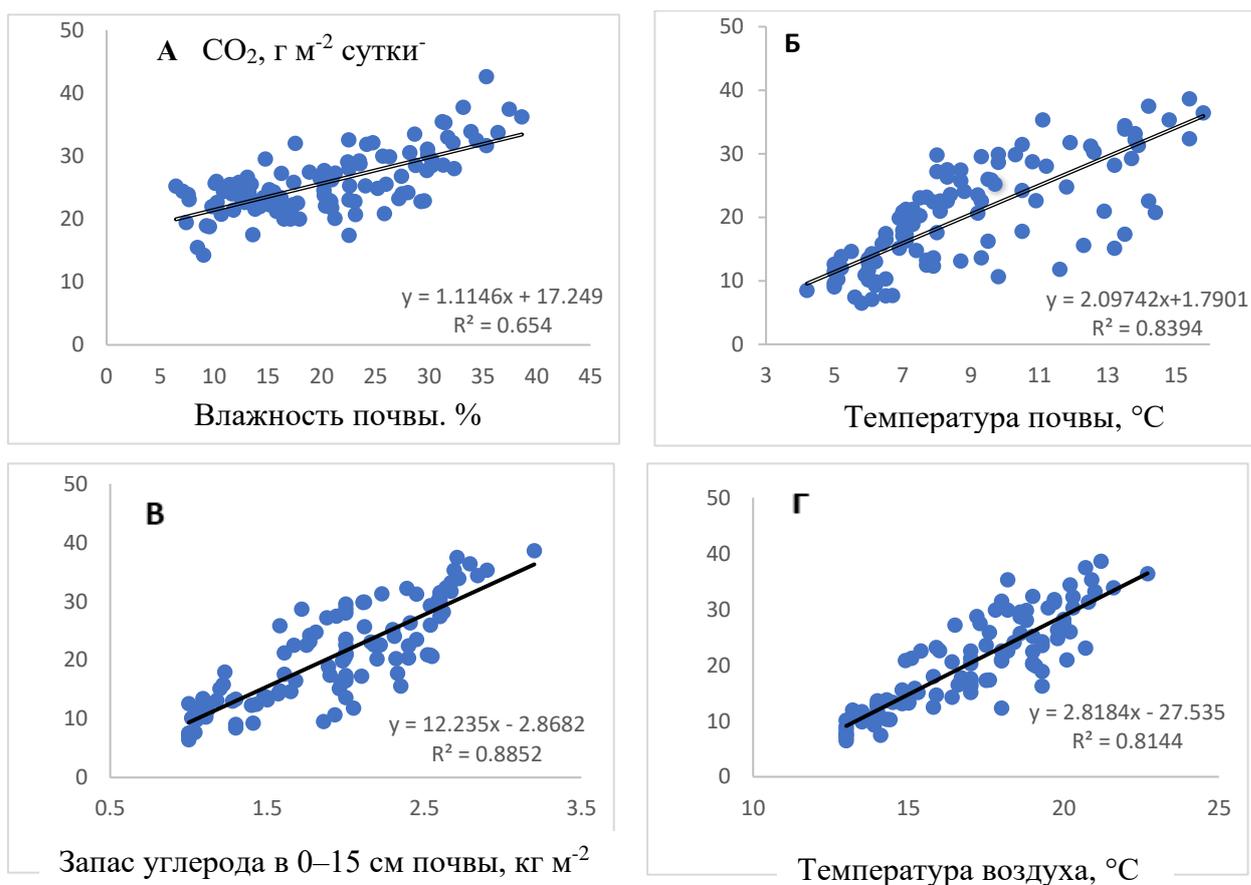


Рис. 5.6.1. Регрессионные зависимости влияния на почвенную эмиссию CO<sub>2</sub> лимитирующих экологических факторов влажности (А) и температуры почвы (Б), запаса углерода в верхней части почвы (В) и температуры воздуха (Г).

По данным дифференцированных по сезонам года корреляционных зависимостей почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> наиболее значимо влияние влажности почвы – с варьированием от 0,911 до 0,999 (табл. 5.6.4). Корреляционные зависимости почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> от температуры почвы и воздуха значительно менее значимы и однородны, варьируя от 0,616 до 0,999 в случае температуры почвы и от 0,661 до 0,998 в случае температуры воздуха – с минимально достоверными зависимостями в осенний период, для которого характерна более контрастная динамика 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 5.6.4. Коэффициенты корреляции интенсивности почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> на склоне северо-восточной экспозиции с лимитирующими экологическими факторами влажности почвы, температуры почвы, запаса углерода в верхней части почвы (0–15 см) и температуры воздуха по сезонам 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 склона северо-восточной экспозиции	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**
Подошва склона северо-восточной экспозиции	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).

Отмеченные закономерности позволяют уточнить роль мезорельефа городских лесных экосистем северной части Москвы и уровня оказываемой на них рекреационной нагрузки в пространственной дифференциации и сезонной

динамике запасов органического углерода и эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  исследуемых зональных дерново-подзолистых почв, которые в значительной мере определяют уровень выполнения почвами экологических функций аккумуляции углерода, регулирования состава атмосферы, функционирования почвенной микробиоты и плодородия почв.

Проведенные в весенне-летне-осенних сезонах 2021 и 2022 годов мониторинговые наблюдения за сезонной динамикой запасов органического углерода и эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  дерново-подзолистых почв контрастных элементов представительной склоновой катены лесных экосистем с различных уровнем рекреационной нагрузки в условиях Северного округа Москвы показали их повышенную пространственно-временную изменчивость, в значительной мере определяемую положением почвы в склоновом мезорельефе (включая экспозицию склона), уровнем рекреационной нагрузки (диагностируемой по выраженности неорганизованной тропиной сети) и погодными условиями текущего сезона (годовой суммой осадков):

1. Проведенные исследования выявили ярко выраженную сезонную динамику почвенных потоков  $\text{CO}_2$  и содержания гумуса (органического вещества почв) в верхних горизонтах исследованных почв – с четкой дифференциацией ее по формам склонового мезорельефа и уровню рекреационной нагрузки.

2. Летние максимумы потоков  $\text{CO}_2$  достигают 35–40 г/м<sup>2</sup> в сутки, а к концу октября падают до 3–5 раз. Средняя интенсивность почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  увеличивается вниз по склону на 5–7 г/м<sup>2</sup> в сутки и снижается с возрастанием рекреационной нагрузки, в среднем, на 5–10 г/м<sup>2</sup> в сутки: на участках с сильной рекреационной нагрузкой – на 5–17 г/м<sup>2</sup> в сутки.

3. Максимальные различия с фоном отмечаются для почв подошвы склона и летнего периода наблюдений, для которых характерны максимально высокие уровни почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  фоновых почв с минимальной рекреационной нагрузкой.

4. Среди сезонно изменяющихся лимитирующих экологических факторов почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в проведенных мониторинговых наблюдениях наибольшую значимость показали влажность, температура верхних горизонтов почвы, запасы в них органического углерода и температура воздуха.

5. Статистическая достоверность влияния микроклиматических факторов на почвенную эмиссию  $\text{CO}_2$  существенно возрастает при их дифференцированном анализе по положению почв в мезорельефе и сезонам года: коэффициенты корреляции почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  с влажностью почвы при этом варьируют от 0,911 до 0,999.

6. На пологой склоновой катене наблюдается постепенное увеличение содержания гумуса от вершины выположенного холма к подошве склона – до 1,5-кратного. При возрастании рекреационной нагрузки, наоборот, наблюдается поэтапное снижение содержания гумуса на 10–20 относительных процентов – по сравнению с фоновыми участками минимальной рекреационной нагрузки.

7. Содержание гумуса в верхних горизонтах исследуемых дерново-подзолистых почв (A1 – A1A2 – A2) анализируемой мощности в 15 см в большинстве случаев значительно снижается (на 0,5–0,7%) по сезону от апрельского максимума к сезонному минимуму в августе.

8. Наблюдаемое на исследованных участках последовательное увеличение диапазона сезонной динамики содержания гумуса верхних горизонтов дерново-подзолистых почв при возрастании рекреационной нагрузки свидетельствует о значительном снижении при этом устойчивости функционирования почв, что хорошо согласуется с данными сезонной динамики поступления почвенного  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

9. Максимальное сезонное снижение почвенных запасов органического углерода в слое 0-15 см отмечается в наименее увлажненных и лучше прогреваемых почвах моренного холма: от 0,5 кг м<sup>-2</sup> на участке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки до 0,75 кг м<sup>-2</sup> – при сильном уровне (соответственно, от 25 до 38% относительно запаса органического углерода в апреле).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в весенне-летне-осенних сезонах 2021 и 2022 годов на контрастных 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 положением почвы в склоновом мезорельефе (включая экспозицию склона), уровнем рекреационной нагрузки (диагностируемой по выраженности неорганизованной тропиной 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. В летние месяцы наблюдается качественное снижение влажности верхних горизонтов почв, с высушиванием гумусово-аккумулятивного горизонта на склоне до минимальных отличий в 2% от почвы моренного холма. Нижележащие горизонты проявляют более высокую устойчивость к высыханию, при возрастании дифференциации профиля влажности в верхних горизонтах дерново-подзолистой глееватой почвы на подошве склона до 1,8–2 раз. Сезонная динамика влажности верхних горизонтов почв с выраженной рекреационной нагрузкой близка фоновой, при их устойчиво более низкой влажности, с ее выраженным снижением уже в мае и заметном осеннем увеличении только в октябре.

2. Плотность сложения большинства верхних горизонтов почв при среднем уровне рекреационной нагрузки на 0,1–0,2 г/см<sup>3</sup> выше их плотности при минимальной нагрузке. При максимальной плотности в наиболее сухой почве вершины холма наблюдается ее «пошаговое» снижение примерно на

0,05 г/см<sup>3</sup> 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/см<sup>3</sup>) – 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 сентябрьских 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-восточной склоне устойчиво кислее их аналогов на юго-западном склоне. Различия максимально выражены на площадках с минимальным уровнем рекреационной нагрузки 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. Почвы характеризуются

общим трендом очень значительного (от 1,4- до 4-кратного), но не всегда статистически достоверного снижения содержания аммония и нитратов при возрастании рекреационной нагрузки. Содержание обменного аммония устойчиво ниже в почвах склонов. В почвах слабовогнутого 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 подошве склонов.

6. Пространственное распределение нитратов четко дифференцировано по экспозиции склона. На северо-восточном склоне, в большинстве случаев, их содержание 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 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.

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 при максимальном содержании в почвах на подошвах склонов с минимальной нагрузкой. Почвы северо-восточного склона, как правило, богаче подвижными формами фосфора и калия аналогичных почв на слабовогнутом юго-западном склоне.

8. Летние максимумы потоков  $\text{CO}_2$  достигают 35–40 г/м<sup>2</sup> в сутки, а к концу октября падают до 3–5 раз. Средняя интенсивность почвенной эмиссии

CO<sub>2</sub> увеличивается вниз по склону на 5–7 г/м<sup>2</sup> в сутки и снижается с возрастанием рекреационной нагрузки, в среднем, на 5–10 г/м<sup>2</sup> в сутки, а на участках с сильной рекреационной нагрузкой – на 5–17 г/м<sup>2</sup> в сутки. Максимальные различия с фоном отмечаются для почв подошвы склона и летнего периода наблюдений. Среди сезонно изменяющихся лимитирующих экологических факторов почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> существенно возрастает при их дифференцированном анализе по положению почв в мезорельефе и сезонам года: коэффициенты корреляции почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>-2</sup> на участке с минимальным уровнем рекреационной нагрузки до 0,75 кг м<sup>-2</sup> – 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авилова, А.А. Влияние рекреационной нагрузки на накопление и распространение тяжелых металлов в почвах и растительном покрове лесных рекреационных территорий (на примере ЛОД РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) / А.А. Авилова // Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем / Под общей редакцией И.И. Васенева, Р. Валентини. – Москва: Скрипта Манент, 2015. – С. 82–84.
2. Апарин, Б. Ф. Проблемы оценки деградации почв мира / Б. Ф. Апарин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. Биология. – 2006. – № 1. – С. 70–80.
3. Арустамов, Э.А. Природопользование: Учебник/ Под ред. Э.А. Арустамова. – 4-е изд. – М.: Издательский дом «Дашков и Ко». – 2002. – 276 с.
4. Базилевич, Н.И. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2008. – 376 с.
5. Бахмет, О.Н. Структурно-функциональная организация органофильей почв лесных экосистем Северо-Запада России: специальность 03.02.08 "Экология (по отраслям): Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Бахмет Ольга Николаевна // Петрозаводск. – 2015. – 48 с.
6. Башкин, В.Н. Биогеохимические основы экологического нормирования / В. Н. Башкин, Е.В. Евстафьева, В.В. Снакин и др. // М.: Наука. – 1993.– 304 с.
7. Беднова, О.В. Биоразнообразие в лесных экосистемах: зачем и как его оценивать / О.В. Беднова // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2003. – №2. – С. 149-155.

8. Брындина, Л.В. Микоризообразующие грибы в формировании биогеоценозов: аналитический обзор / Л.В. Брындина, Ю.И. Арнаут, О.И. Алыкова // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 45, №1. – С. 5–20.
9. Букварева, Е.Н. Оптимизация разнообразия надорганизменных систем как один из механизмов их развития в экологическом, микроэволюционном и эволюционном масштабах / Е.Н. Букварева, Г.М. Алещенко // Успехи современной биологии. – 2010. – Т. 130, №2. – С. 115–129.
10. Вадюнина, А.Ф. Методы исследования физических свойств почвы / А.Ф., Вадюнина, З.А. Корчагина // Изд. третье, перераб. и доп. 1986. – 416 с.
11. Васенев, В.И. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) / В.И. Васенев, А.П. Ауденховен, О.Н. Ромзайкина, Р.А. Гаджиагаева // Почвоведение. – 2018. – №10. – С. 77–95.
12. Васенев, И.И. Ветровал и таежное почвообразование (режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий) / И.И. Васенев, В.О. Торгульян // М.: Наука. – 1995. – 247 с.
13. Васенев И.И., Щербаков А.П., Васенева Э.Г., Дегтева М.Ю. Базовый агроэкологический мониторинг // Методическое пособие и нормативные материалы для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия. – Курск. – 2001. – С. 143–152.
14. Васенев, И.И. Структурно-функциональная организация почвенно-экологического мониторинга Лесной опытной дачи РГАУ МСХА / И.И. Васенев, В.Д. Наумов, Т.В. Раскатова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2007. – №4. – С. 19–22.
15. Васенев, И.И. Почвенные сукцессии / И.И. Васенев. – М.: ЛКИ. – 2008. 320с.
16. Васенев, И.И. Пространственно-временная изменчивость основных параметров фонового экологического мониторинга дерново-подзолистых почв Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА / И.И. Васенев, Т.В. Раскатова //

- Вестник Марийского государственного технического университета: Лес Экология, Природопользование. – 2009. – №2. – С. 83–91.
17. Васенев И.И., Гераськин М.М., Макаров О.А., Куликов А.А. Кадастровая оценка, учет и регистрация земель. – М.: РГАУ-МСХА. – 2010. – 260 с.
  18. Васенев И.И. Особенности пространственно-временной изменчивости содержания и накопления тяжелых металлов в почвах и растительном покрове в условиях лесной рекреационной территории / Васенев И.И., Авилова А.А., Багина Б.В. // Плодородие. 2015. № 2 (83). С. 44–49.
  19. Васенев, И.И. Экологическая оценка сезонной динамики почвенных потоков CO<sub>2</sub> и содержания гумуса дерново-подзолистых почв на склоновой катене лесопарка при разных уровнях рекреационной нагрузки / И.И. Васенев, С.М. Мелесе, А.О. Малахов // АгроЭкоИнфо. – 2022. – №4. – С. 10–15.
  20. Ведрова, Э.Ф. Биогеохимическая оценка лесных экосистем / Э. Ф. Ведрова, Л. В. Мухортова // Сибирский экологический журнал. – 2014. – Т.21, №6. – С. 933-944.
  21. Вернадский, В.И. Об участии живого вещества в создании почв / В.И. Вернадский // Доклады по экологическому почвоведению. – 2007. – Т.1, №5. – С. 82-116
  22. Визирская, М.М. Экологическая оценка почвенных потоков парниковых газов лесных подзолистых почв мегаполиса / М.М. Визирская, М.В. Тихонова, А.С. Епихина, И.М. Мазиров // Материалы по изучению русских почв, Сб. науч. докл. – 2014 – Т.35, №8. – С. 228–231.
  23. Владимиров, В.В. Урбоэкология: Конспект лекций. – М.: Изд-во МНЭПУ, 1999. – 204 с.
  24. Гаджиев, И.М. Эволюция почв южной тайги Западной Сибири / И.М. Гаджиев // Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. – 1982. – 278 с.
  25. Гераськина, А.П. Влияние морфо-экологических групп дождевых червей на аккумуляцию углерода в лесных почвах / А.П. Гераськина, А.И. Кузнецова, Н.Е. Шевченко и др. // Лесные почвы и функционирование

- лесных экосистем: материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием. – Москва: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2019. – С. 221-224.
26. Гогмачадзе, Г.Д. Агроэкологический мониторинг почв и земельных ресурсов Российской Федерации / Г.Д. Гогмачадзе. – Москва: МГУ, 2010. – 592 с.
27. Голубева, Е.И. Экологическое состояние Природно-исторического парка «Битцевский Лес» / Е.И. Голубева, С.Н. Жаринов // Сборник статей восьмой международной научно-технической интернет-конференции «Леса России в XXI веке». – 2011. – 50 с.
28. Гольдберг Е.Л. Декадно-разрешенная летопись отклика Восточной Сибири на резкие климатические изменения в Атлантике за последний ледниково-межледниковый цикл / Е. Л. Гольдберг, М. А. Федорин, Е. П. Чебыкин и др. // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 421, № 4. – С. 542–545.
29. Горячкин, С.В. Экологические функции почвенного покрова в северотаежных ландшафтах Европейской части России / С.В. Горячкин // No. 96-04-49287. Российский фонд фундаментальных исследований, 1998. – С. 1-9.
30. Даденко, Е. Методы биодиагностики наземных экосистем / Е. Даденко, Ю. Акименко, С. Колесников, К. Казеев // Почвоведение. – 2022. – С. 2–23.
31. Девятова Т.А. Методика экологических исследований: Учебное пособие для вузов. / Девятова Т.А., Крамарева Т.Н. – Воронеж: Издательский дом ВГУ. – 2014. – 130 с.
32. Денисов В. В. Экология города / Денисов В.В., Курбатова А.С, Денисова И.А., Бондаренко В.Л., Грачев В.А., Гутенев В.В., Нагнибеда Б.А. М.: Ростов н/Д. – 2008. – 832 с.
33. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. – М.: URSS. – 2023. – 334 с.
34. Добровольский, В.В. Роль органического вещества почв в миграции тяжелых металлов / В.В. Добровольский // Природа. – 2004. – № 7. – С. 35–39.
35. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экологические функции почв. М., 1986.

36. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах: экологическое значение почв. – М.: Наука. – 1990.
37. Добровольский Г.В., Карпачевский Л.О., Никитин Е.Д. Проблемы охраны природы и Красная книга почв // Деградация и восстановление лесных почв. – М.: Наука. – 1991. – С. 5–12.
38. Добровольский, Г.В. Глобальный характер угрозы современной деградации почвенного покрова: Структурно-функциональная роль почвы в биосфере. – Москва/ Г.В. Добровольский // Издательство ГЕОС. – 1999. – 278 с.
39. Добровольский, Г.В. Почвенный покров охраняемых территорий. Состояние, степень изученности, организация исследований / Г.В. Добровольский, О.В. Чернова, Е.П. Быкова, Н.П. Матекина // Почвоведение. – 2003. – №6. – С. 645–654.
40. Добровольский, Г.В. Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / Г.В. Добровольский, И.П. Бабьева, Л.Г. Богатырев и др. – М.: Наука. – 2003. – 364 с.
41. Добровольский, Г.В. Экологическая роль почвы в биосфере и в жизни человека / Г.В. Добровольский // Доклады по экологическому почвоведению. – 2007. – Т.2, №6. – С. 1–16.
42. Добровольский, Г.В. Деградация почв – угроза глобального экологического кризиса / Г.В. Добровольский // Век глобализации. – 2008. – №2. – С. 54–65.
43. Добровольский, Г.В. Роль и значение почв в становлении и эволюции жизни на Земле / Г.В. Добровольский // Палеопочвы, природная среда и методы их диагностики. – Новосибирск: Офсет. – 2012. – С. 7–14.
44. Добровольский, Г.В. Почвы в биосфере и жизни человека / Г.В. Добровольский, Г.С. Куст, И.Ю. Чернов и др. // Москва: МГУЛ. – 2012. – 584 с.
45. Добровольский, Г.В. О некоторых методологических проблемах классификации и географии почв: к истории дискуссии 1960-х гг. в почвоведении /

- Г.В. Добровольский // Пространство и Время. – 2013. – №11. – С. 149-154.
46. Дорст Ж. До того как умрёт планета / Ж. Дорст // М.: Прогресс. – 1968. – С. 13-16.
47. Заварзин, В.В. Условия и возможности проведения лесной сертификации в России / В. В. Заварзин // Лесной вестник. – 2001. – №2. – С. 230-232.
48. Заварзин, Г.А. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский, А.В. Борисов, П.Ю. Воронин, В.А. Демкин, Т.С. Демкина, И.В. Евдокимов, Д.Г. Замолотчиков, Д.В. Карелин, А.С. Комаров, И.Н. Курганова, А.А. Ларионова, В.О. Лопес де Гереню, А.И. Уткин, О.Г. Чертов // – М.: Наука. 2007. 315 с.
49. Захаров, С.Г. Тропа и рекреационная нагрузка: новый метод определения уплотнения почв на тропах / С.Г. Захаров, И.В. Кулик // Географический вестник. – 2017. – Т.41, №2. – С. 109-117.
50. Зинковская, Т.С. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой глееватой почвы к пятому году использования компоста многоцелевого назначения при двустороннем регулировании водно-воздушного режима / Т.С. Зинковская, В.Н. Зинковский, В.А. Сорокина, Л.А. Шапаронян // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – Т.46, №4. – С. 37-39.
51. Зубкова, Т.А. Почва как фактор здоровья человека / Т.А. Зубкова, Л.О. Карпачевский, Ю.Н. Ашинов // Пространство и время. – 2013. – Т.12, №2. – С. 207-218.
52. Казанская, Н.С. Рекреационные леса: состояние, охрана, перспективы использования / Н.С. Казанская, В.В. Ланина, Н.Н. Марфенин // Лесная промышленность. – 1977. – 96 с.
53. Карпачевский, Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе / Л.О. Карпачевский. – М. Изд-во МГУ. – 1977. – 270 с.

54. Карпачевский, Л.О. Почвенный покров и парцеллярная структура лесного биогеоценоза / Л.О. Карпачевский, Т.А. Зубкова, Л.Н. Ташнинова, Р.Н. Руденко // Лесоведение. – 2007. – №6. – С. 107-113.
55. Карпачевский, М.Л. Изменение свойств почв в связи с сукцессионной динамикой таежных экосистем после пожаров и рубок: специальность 03.00.27: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Карпачевский Михаил Львович. – М. – 1996. – 24 с.
56. Касимов А.М. Методическое и информационное обеспечение комплексной оценки природно-техногенных объектов / А.М. Касимов, Т.В. Козюля, Д.И. Емельянова, М.М. Козуля // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 58–63.
57. Катаров, В.К. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты / В.К. Катаров, В.С. Сюнев, Е.И. Ратькова, Ю.Ю. Герасимов // Resources and technology. – 2012. – Т.9, №2. – С. 73–81.
58. Качан, А.С. О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2006 году. Информационный выпуск / Под редакцией А.С. Качан, Н.Г. Рыбальского, Е.Д. Самоотесова, А.Р. Барсова. – М: НИИ-Природа. – 2007. – 314 с.
59. Клевенская, И.Л. Микрофлора почв Западной Сибири / И.Л. Клевенская, Н.Н. Наплекова, Н.И. Гантимурова // – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. – 1970. – 222 с.
60. Коломыц, Э.Г. Количественная оценка функциональной устойчивости лесных экосистем / Э.Г. Коломыц, Л.С. Шарая // Экология. – 2015.– №2. – С. 83–94.
61. Кудеяров, В.Н. Эмиссия углекислого газа почвенным покровом России / В.Н. Кудеяров, Ф.И. Хакимов, Н.Ф. Деева, А.А. Ильина, Т.В. Кузнецова, А.В. Тимченко – Почвоведение. 1995. №1. С.33-43.
62. Кудеяров, В.Н. Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, общие оценки / В.Н. Кудеяров, И.Н. Курганова // Почвоведение.

- ние. – 2005. – №9. – С. 299–311.
63. Кудреватых И.Ю. Химические и микробиологические свойства дерново-подзолистой почвы в лесах Вологодской и Костромской областей / И.Ю. Кудреватых, Н.Д. Ананьева, С.В. Сушко, Е.А. Иванищева // Лесоведение. – 2021. – № 1. – С. 93–106.
64. Куликова, А.Х. Экологические функции почвы / А.Х. Куликова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2007. – Т. 4, №1. – С. 3–7.
65. Кульбачевский, А.О. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2010 году» /под ред. А.О. Кульбачевского – М.: Спецкнига. – 2012. – 178 с.
66. Курбатова, А.С. Экологические функции городских почв / А.С. Курбатова, В.Н. Башкин, Ю.А. Баранникова, С.Г. Герасимова, Е.В. Никифорова, Е.В. Решетина, В.А. Савельева, Д.С. Савин, А.В. Смагин, А.Л. Степанов – М.– Смоленск: Маджента. – 2004. – 232 с.
67. Курганова, И.Н. Оценка скорости минерализации органического вещества почв в лесных экосистемах внутриконтинентального умеренного, средиземноморского и тропического муссонного климата / И.Н. Курганова, В. О. Лопес Де Гереню, Х. Ф. Галлардо Ланчо, К. Т. Ем // Почвоведение. – 2012. – №1. – С. 82-85.
68. Лесные экосистемы и урбанизация. Сборник статей. – М.: Товарищество научных изданий КМК. – 2008. – 227 с.
69. Лукина, Н.В. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва-растительность / Н.В. Лукина, М.А. Орлова, Л.Г. Исаева // Лесоведение. – 2010. – №5. – С. 45-56.
70. Лукина, Н.В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований / Н.В. Лукина, А.П. Гераськина, А.В. Горнов, Н.Е. Шевченко, А.В. Куприн, Т.И. Чернов, С.И.

- Чумаченко, В.Н. Шанин, А.И. Кузнецова, Д.Н. Тебенькова, М.В. Горнова // Вопросы лесной науки. – 2020. – №3 – С. 1–90.
71. Лысиков, А.Б. Влияние рекреации на почву лиственных насаждений Серебряноборского опытного лесничества. / А.Б Лысиков, Т.Н. Судницына // Лесоведение. – 2008. – №3 – С 47-56.
72. Макаров, О.А. Почему нужно оценивать почву? / О.А. Макаров – М. Изд-во Московского университета. –2003 – 259 с.
73. Мамась, Н.Н. Мониторинг агрономических показателей состояния почвы при внесении сложного компоста / Н.Н. Мамась, В.В. Ковтун, Д.Б. Габараев // Сборник научных трудов по материалам V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ, Краснодар. – 2017. – С. 759-764.
74. Мелесе, С.М. Сезонная динамика влажности и плотности дерново-подзолистых почв на склоновой катене ЛОД РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева при различных уровнях рекреационной нагрузки / С.М. Мелесе, И.И. Васенев // АгроЭкоИнфо. – 2022. – Т 50, №2. – С. 14–17.
75. Методика агроэкологической типизации земель в агроландшафте / Васенев И.И. и др. – Москва: РАСХН. – 2004. – 120 с.
76. Мешалкина Ю.Л. Математическая статистика в почвоведении: Практикум. // Ю.Л. Мешалкина, В.П. Самсонова. – М.: МАКС Пресс. – 2008. – 84 с.
77. Мишвелов, Е.Г. Состояние лесных экосистем особо охраняемых природных территорий Кавказских Минеральных Вод в условиях рекреационного воздействия / Е.Г. Мишвелов, А.А. Гранкина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – С. 1689.
78. Мозолевская, Е.Г. Мониторинг состояния зеленых насаждений и городских лесов Москвы / Е.Г. Мозолевская, Н.К. Белова, Е.Г. Куликова, Т.В. Шарапа, В.А. Липаткин // Методы оценки состояния деревьев и насаждений. Экология большого города. Альманах. – 1997 – №2. – С. 16–59.
79. Мозолевская, Е.Г. Концепция мониторинга состояния зеленых насаждений

- и городских лесов Москвы / Е.Г. Мозолевская // Лесной вестник. – 1998. – №2. – С. 5-14.
80. Мосина, Л.В. Антропогенное изменение лесных экосистем в условиях мегаполиса Москва: специальность 03.00.16: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Мосина Людмила Владимировна. – Москва, 2003. – 48 с.
81. Мосина, Л.В. Уплотнение почвы как фактор экологического риска в рекреационных лесных ландшафтах мегаполиса Москва (на примере ЛОД РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) / Л.В. Мосина, Н.М. Грачёва - Докл. ТСХА / РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2007. – Вып. 279, ч. 2. – С. 349–351.
82. Мотузова, Г.В. Уровни и природа варьирования содержаний микроэлементов в почвах лесных биогеоценозов / Г.В. Мотузова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем – 1992. – Т.14. – С. 57-68.
83. Наумов, А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности / А.В. Наумов – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 207 с.
84. Наумов, В.Д. Почвенно-геоморфологическая характеристика территории Лесной опытной дачи МСХА / В.Д. Наумов, П.И. Гречин, А.Н. Поляков, Известия ТСХА. – 2001. – Вып. 1. – С. 83–101.
85. Наумов, В.Д. Экологическая оценка состояния древостоя на территории Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева/ В.Д. Наумов, О.Г. Бардачева – Известия ТСХА. – 2008. – Вып.2.
86. Наумов, В.Д. 145 лет Лесной опытной даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева/ В.Д. Наумов – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2009. – 511 с.
87. Неведров, Н.П. Сезонная динамика эмиссии CO<sub>2</sub> из почв города Курска / Н.П. Неведров, Д.А. Саржанов, Е.П. Проценко, И.И. Васенев // Почвоведение. – 2021. – №1. – С. 70–79.

88. Нерешенные экологические проблемы Москвы и Подмосковья. – М.: Медиа-ПРЕСС. – 2012. – 400 с.
89. Никитин, Е.Д. Экология почв и учение о почвенных экофункциях / Е.Д. Никитин // Почвоведение. – 2005. – №9. – С. 1044-1053.
90. Никитина З.И. Бактериальная и мицелиальная биомасса в почвах таежных экосистем Прииртышья / З.И. Никитина, А.М. Антоненко // Биологические науки. – 1982. – №7. – С. 70-76.
91. Овсянников, Ю.А. О единстве процессов фотосинтеза, азотфиксации и почвообразования / Ю.А. Овсянников // Аграрный вестник Урала. – 2022. – Т.216, №1. – С. 39-46.
92. Околелова, А.А. Экологическое почвоведение и законы экологии / А.А. Околелова, В.Ф. Желтобрюхов, Г.С. Егорова // Проблемы современного педагогического образования. – 2016. – №6. – С. 150–161.
93. Орлов, Д.С. Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв / Д.С. Орлов, В.Д. Васильевская – М.: МГУ. – 1994. – 272 с.
94. Поляков, А.Н. Таксационно-лесоводственная и почвенная характеристика пробных площадей Лесной опытной дачи МСХА/ А.Н. Поляков, В.Д. Наумов // Известия ТСХА. – 2003. – Выпуск №3. – С 156–176.
95. Полякова, Г.А. Парки Москвы: Экология и флористическая характеристика / Г.А. Полякова, В.А. Гутникова – М.: ГЭОС. – 2000. – 405 с.
96. Попова, А.А. Значение леса в природе и жизни человека / А.А. Попова // Экология региона: проблемы и пути их решения. – 2021. – С. 44-46.
97. Почечун, В.А. Региональный геоэкологический анализ природно-техногенной геосистемы горно-металлургического комплекса Среднего Урала: специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)": Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Почечун Виктория Александровна. – Томск, 2014. – С 22 –48.
98. Рагимов, А.О. Роль почвы в жизни общества Владимирской области / А.О. Рагимов, Т.А. Зубкова, М.А. Мазиров // Вестник Алтайского государ-

- ственного аграрного университета. – 2014. – Т.116, №6. – С. 88-94.
99. Рамазанова, Р.Х. Особенности почвообразования в лесных экосистемах / Р.Х. Рамазанова, Б. Жумабек // Почвоведение и агрохимия. – 2016. – №1. – С. 89-103.
100. Романовский, М.Н. Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов. Теория и эксперимент / Под ред. М.Н. Романовского – М.: КМК. – 2009. – 354 с.
101. Рысин, Л.П. Мониторинг лесов на урбанизированных территориях/ Л.П. Рысин, Л.И. Савельева, С.Л. Рысин // Экология. – 2004. – №4. – С.243- 248.
102. Рожков, В.А. Лесной покров России и охрана почв / В.А. Рожков, Л.О. Карпачевский // Почвоведение. – 2006. – №10. – С. 1157–1164.
103. Савич, В.И. Почвы мегаполисов и их создание / В.И. Савич, Е.А. Романчик, В. Ортега и др. // Известия ТСХА. – 2003. – №3. – С. 3–28.
104. Савич В.И. Почвы мегаполисов, их экологическая оценка, использование и создание/ В.И. Савич, Ю.В. Федорин, Е.Г. Химица, Г.П. Тощева, А.В. Шевченко, А.Ю. Щербаков/ Учебное пособие – М.: Агробизнесцентр. – 2007. – 660 с.
105. Селивановская, С.Ю. Деградация почв: методы отбора и подготовки проб для физико-химического и биологического анализа: учебно-методическое пособие. / С.Ю. Селивановская, Р.Х. Гумерова, П.Ю. Галицкая, Ю.В. Медянская // Минск: БГУ. – 2011. – С. 6–100.
106. Синькевич, С.М. Роль почв в региональном балансе углерода в сосновых лесах Карелии / С.М. Синькевич, О.Н. Бахмет, А.А. Иванчиков // Почвоведение. – 2009. – №3. – С. 290–300.
107. Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф. Экологическая роль ветровалов. – М.: Лесная промышленность. – 1983. – 192 с.
108. Смагин, А.В., Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий / А.В. Смагин, Н.А. Азовцева, М.В. Смагина, и др. – Почвоведение. 2006. №5. С. 603–615.

109. Столбовой, В.С. Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России / В.С. Столбовой // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева // Лесоведение. – 2022. – №11. – С. 5–29.
110. Стольберг Ф.В. Экология города: учебник /Под ред. Ф.В. Стольберга. – Киев: Либра. – 2000. – 467 с.
111. Строганова, М.Н. Почвы Москвы и экология города / М.Н. Строганова, А.Д. Мягкова, Т.В. Прокофьева, И.Н. Скворцова // М.: ПАИМС. – 1998. – С. 6-11.
112. Строганова, М.Н. Разработка теоретических основ экологической оценки почв урбанизированных экосистем/ М.Н. Строганова, А.Д. Мягкова, Т.В. Прокофьева // Российский фонд фундаментальных исследований –1996. – С. 10–38.
113. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере / Под ред. Г.В. Добровольского. – М.: ГЕОС. – 1999. – 278 с.
114. Сусьян, Е.А. Микробный углерод в профиле лесных почв южной тайги (заповедник «Калужские засеки» и Звенигородская биостанция МГУ) / Е.А. Сусьян, Н.Д. Ананьева, Е.Г. Гавриленко, О.В. Чернова, М.В. Бобровский // Почвоведение. – 2009. – № 10. – С. 1233–1240.
115. Тембо А. Агроэкологический мониторинг почвенных потоков закиси азота в природных и агрогенно измененных черноземах Центрально-черноземного заповедника / А. Тембо, М. Самарджич, Д. В. Морев и др. // Агрохимический вестник. – 2014. – № 5. – С. 19–24.
116. Теория и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. – М.: Гриф и К. – 2007. – 616 с.
117. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.Ф. Воробьевой. – М.: ГЕОС. – 2006. – 400 с.
118. Тимофеев, В.П. Природа и насаждения Лесной опытной дачи ТСХА за 100 лет / В.П. Тимофеев – М.: Изд-во «Лесная промышленность». – 1965. – 168 с.

119. Трофимов, С.Я. Регуляторная роль почвы в функционировании ненарушенных южнотаежных биогеоценозов / С.Я. Трофимов // Почвоведение. – 2010. – №9. – С. 1029–1037.
120. Тырлышкин, В.Н. Методическое пособие по разработке менеджмент-планов (планов управления) для особо охраняемых природных территорий / Авт.– сост. В.Н. Тырлышкин, М.С. Стишов, Н.И. Троицкая – Москва: МСОП - Всемирный Союз Охраны Природы. – 2002. – с. 111.
121. Уланова, Н.Г. Механизмы сукцессий растительности сплошных вырубок в ельниках южной тайги / Н.Г. Уланова // Актуальные проблемы геоботаники. III Всероссийская школа-конференция. Лекции. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2007. – С. 198–211.
122. Умарова, Ш.З. Возможности мониторинга городских лесов по спутниковым данным / Ш.З. Умарова // Научный прогресс. – 2021. – №2. – С. 152–155.
123. Федорец, Н.Г. Методика исследования почв урбанизированных территорий: учебно-методическое пособие для студентов и аспирантов эколого-биологических специальностей / Н.Г. Федорец, М.В. Медведева, О. Н. Бахмет. – 2009. – С. 5–72.
124. Хазиев, Ф.Х. Почва и биоразнообразие / Ф.Х. Хазиев // Экология. – 2011. – №3. – С. 184–190.
125. Хайриддинов, А.Б. Влияние растительного покрова на температурно-влажностный режим почвы в теплице / А.Б. Хайриддинов // Аграрная наука. – 2019. – №5. – С. 41–45.
126. Хомяков Д.М. Почва-незаменимый компонент биосферы и глобальной продовольственной системы (критическая оценка ситуации) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2020. №4. – 3–16.
127. Чекмарев, П.А. Мониторинг калийного режима чернозёмов ЦЧР. / П.А. Чекмарев, С.В. Лукин, Ю.И. Сискевич, Н.П. Юмашев, В.И. Корчагин, А.Н. Хижняков // Достижения науки и техники АПК. – 2011. –Т.8. – С. 7–14.

128. Шентерова, Е.М. Лабораторный практикум по дисциплине / Е.М. Шентерова, А.Н. Рожкова // *Общая биология*. – 2015. – С. 51-62.
129. Широких, И. Г. Микробные сообщества кислых почв Кировской области / И.Г. Широких, А.А. Широких. – Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого. – 2004. – 332 с.
130. Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем / Под ред. И.И. Васенева, Р. Валентины. – Москва: Скрипта Манент, 2015.
131. Яшин, И.М. Почвенно-экологические исследования в ландшафтах / И. М. Яшин, Л.Л. Шишов, В.А. Раскатов // М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2000. – 560 с.
132. Яшин, И.М. Исследование барьеров миграции в почвах Лесной опытной дачи РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева / И.М. Яшин, П.В. Кузнецов, Б.В. Буринова. – *Известия ТСХА*. – 2010. – Вып. 3.
133. Яшин И.М. Экологическое состояние почв в условиях полевых и лесопарковых экосистем Московского мегаполиса / И.М. Яшин, Л.П. Когут, И.С. Прохоров, И.И. Васенев// *Агрехимический вестник*. – 2014, №2. – С. 17–21.
134. Яшин И.М. Экогеохимия ландшафта / Яшин И.М., Васенев И.И., Рамазанов С.Р. // Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2017. – 94 с.
135. Яшин И.М. Экологическая роль водорастворимых органических веществ в гумусообразовании и миграции в почвах таежно-лесной зоны / Яшин И.М., Атенбеков Р.А., Черников В.А., Васенев И.И. // *Известия ТСХА*. – 2018. – № 4. – С. 32–45.
136. Яшин И.М. Путеводитель научных почвенно-экологических экскурсий в лесных и аграрных ландшафтах ЦЛГПБЗ и мегаполиса Москвы / Яшин И.М., Васенев И.И., Белопухов С.Л. // Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2018. – 154 с.
137. Яшин И.М. Миграционные потоки, баланс и функции водорастворимых

- органических веществ в почвах таежных экосистем / Яшин И.М., Черников В.А., Белопухов С.Л. // *Агрохимия*. – 2020. – № 8. – С. 13–21.
138. Allison, S.D. Nitrogen fertilization reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal ecosystems / Allison, S.D., Hanson, C.A. and Treseder, K.K. // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2007. – 39(8). – P. 1878-1887.
139. Arnold, R.W. Soil geography and factor functionality: interacting concepts / Arnold, R.W. // *Factors of soil formation: A fiftieth anniversary retrospective*. – 1994. – V. 33. – P. 99-109.
140. Arnold, R.W. Conceptual basis for soil classification: lessons from the past / Arnold, R.W. and Eswaran, H. // *Soil Classification*. – CRC Press. – 2002. – P. 27-42.
141. Artiola, J. Environmental monitoring and characterization. / Artiola, J., Pepper, I.L. and Brusseau, M.L. eds. – Academic Press. – 2004.
142. Balzan, M.V. Assessing urban recreation ecosystem services through the use of geocache visitation and preference data: a case-study from an urbanized island environment. / Balzan, M.V. and Debono, I. // *One Ecosystem*. – 2018. – 3. – P. e24490.
143. Bašić, F. The soils of Croatia / Bašić, F. – Dordrecht: Springer. – 2013. – 179p.
144. Blum, W.E. Functions of soil for society and the environment. Reviews in Environmental Science and Bio / Blum, W.E. // *Technology*. – 2005. – N4. – P. 75-79.
145. Bossio, D.A. The role of soil carbon in natural climate solutions. / Bossio, D.A., Cook-Patton, S.C., Ellis, P.W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., Wood, S., Zomer, R.J., Von Unger, M., Emmer, I.M. and Griscom, B.W. // *Nature Sustainability*. – 2020. – 3(5). – P. 391-398.
146. Bronson, K.F. Carbon and nitrogen pools of southern high plains cropland and grassland soils. / Bronson, K.F., Zobeck, T.M., Chua, T.T., Acosta-Martinez, V.,

- Van Pelt, R.S. and Booker, J.D. // Soil Science Society of America Journal. – 2004. – 68(5). – P. 1695-1704.
147. Bukvareva, E.N. The current state of knowledge of ecosystems and ecosystem services in Russia: A status report. / Bukvareva, E.N., Grunewald, K., Bobylev, S.N., Zamolodchikov, D.G., Zimenko, A.V. and Bastian, O. // *Ambio*. – 2015. – V. 44. – P. 491-507.
148. Carter, M.R. Soil sampling and methods of analysis. / Carter, M.R. and Gregorich, E.G. eds. – CRC press. – 2007.
149. Chiesura, A. The role of urban parks for the sustainable city. / Chiesura, A. // *Landscape and urban planning*. – 2004. – 68(1). – P. 129-138.
150. Dazzi, C. Anthropogenic soils: general aspects and features. / Dazzi, C. and Papa, G.L. // *Ecocycles*. – 2015. – 1(1). – P. 3-8.
151. Doran, J.W. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. / Doran, J.W. and Parkin, T.B. // *Methods for assessing soil quality*. – 1997. – V. 49. – P. 25-37.
152. Dovletyarova, E.A. Soil-ecological characteristic of the Forest experimental station of Russian State Agrarian University of Moscow Agricultural Academy by KA Timiryazev under plantings in the conditions of various anthropogenesis loading. / Dovletyarova, E.A., Mosina, L.V. and Petrovskaya, P.A. // *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. – 2016. – N3. – P. 40-45.
153. Downey, A.E. Soil carbon sequestration in urban afforestation sites in New York City. / Downey, A.E., Groffman, P.M., Mejía, G.A., Cook, E.M., Sritrairat, S., Karty, R., Palmer, M.I. and McPhearson, T. // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2021. – V.65. – P. 127342.
154. Fornal-Pieniak, B. Impact of different levels of anthropogenic pressure on the plant species composition in woodland sites. / Fornal-Pieniak, B., Ollik, M. and Schwerk, A. // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2019. – V.38. – P. 295-304.
155. Führer, E. Forest functions, ecosystem stability and management. / Führer, E. // *Forest Ecology and management*. 2000. 132(1). P. 29-38.

156. IPCC 2013 report on Climate Changes: the Physical Basis // Report of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Paris. 2013.
157. Ilstedt, U. Nitrogen and phosphorus limitations of microbial respiration in a tropical phosphorus-fixing acrisol (ultisol) compared with organic compost. / Ilstedt, U. and Singh, S. // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2005. – 37(7). – P. 1407-1410.
158. Kapusta, P. Species diversity and spatial distribution of enchytraeid communities in forest soils: effects of habitat characteristics and heavy metal contamination. / Kapusta, P., Sobczyk, Ł., Rożen, A. and Weiner, J. // *Applied Soil Ecology*. – 2003. – 23(3). – P. 187-198.
159. Karpachevskii, L.O. Forest, soil, and forest soil science. / Karpachevskii, L.O., Rozhkov, V.A., Karpachevskii, M.L. and Shvidenko, A. // *Eurasian Soil Science*. – 1996. – 29(5). – P. 533-544.
160. Kholodov, V.A. Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems in response to the type of their use / Kholodov, V.A., Yaroslavtseva, N.V., Farkhodov, Y.R., Belobrov, V.P., Yudin, S.A., Aydiev, A.Y., ... Frid, A. S. // *Eurasian Soil Science*. – 2019. – V. 52. – P. 162-170.
161. Kimmins, J.P. Forest ecology. / Kimmins, J.P. // *Fishes and forestry. World-wide watershed interactions and management*. – 2004. – P. 17-43.
162. Kolomyts, E.G. Quantitative assessment of functional stability of forest ecosystems. / Kolomyts, E.G. and Sharaya, L.S. // *Russian Journal of Ecology*. – 2015. – V. 46. – P. 117-127.
163. Krishnan, A. Extracellular hydrolase enzyme production by soil fungi from King George Island, Antarctica. / Krishnan, A., Alias, S.A., Wong, C.M.V.L., Pang, K.L. and Convey, P. // *Polar Biology*. – 2011. – V. 34. – P. 1535-1542.
164. Kunah, O.M. The temporal dynamics of readily available soil moisture for plants in the technosols of the Nikopol Manganese Ore Basin. / Kunah, O.M., Zhukov, O.V., Zelenko, Y.V., Fedushko, M.P., Babchenko, A.V. and Sirovatko, V.O. // *Biosystems Diversity*. – 2019. – 27(2). – P. 156-162.

165. Kutiel, P. The effect of recreational impacts on soil and vegetation of stabilised coastal dunes in the Sharon Park, Israel. / Kutiel, P., Zhevelev, H. and Harrison, R. // *Ocean & Coastal Management*. – 1999. – 42(12). – P. 1041-1060.
166. Lednev, S.A. Impact of kerosene pollution on ground vegetation of southern taiga in the Amur Region, Russia. / Lednev, S.A., Semenov, I.N., Klink, G.V., Krechetov, P.P., Sharapova, A.V. and Koroleva, T.V. // *Science of The Total Environment*. – 2021. – V. 772. – P. 144965.
167. Li, Y. Function and application of soil microorganisms in forest ecosystem. *Ying Yong Sheng tai xue bao* / Li, Y., Hu, J. and Wang, S.L. // *The Journal of Applied Ecology*. – 2004. – 15(10). – P. 1943-1946.
168. Liu, L. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China. / Liu, L., Gundersen, P., Zhang, T. and Mo, J. // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2012. – 44(1). – P. 31-38.
169. Liu, S. Estimation of plot-level soil carbon stocks in China's forests using intensive soil sampling. / Liu, S., Shen, H., Zhao, X., Zhou, L., Li, H., Xu, L., Xing, A. and Fang, J. // *Geoderma*. – 2019. – V. 348. – P. 107-114.
170. Lovett, G.M. Who needs environmental monitoring? / Lovett, G.M., Burns, D.A., Driscoll, C.T., Jenkins, J.C., Mitchell, M.J., Rustad, L., Shanley, J.B., Likens, G.E. and Haeuber, R. // *Frontiers in Ecology and the Environment*. – 2007. – 5(5). – P.253-260.
171. Lugo, A.E. Function, effects, and management of forest roads. / Lugo, A.E. and Gucinski, H. // *Forest ecology and management*. – 2000. – 133(3). – P. 249-262.
172. Lull, H.W. Forest soil-moisture relations in the coastal plain sands of southern New Jersey. / Lull, H.W. and Axley, J.H. // *Forest Science*. – 1958. – 4(1). – P. 2-19.
173. Mäkipää, R. The costs of monitoring changes in forest soil carbon stocks. / Mäkipää, R., Häkkinen, M., Muukkonen, P. and Peltoniemi, M. – 2008.

174. Matveyeva, N. Biodiversity of terrestrial ecosystems. / Matveyeva, N. and Chernov, Y. // *In the Arctic*. – Routledge. – 2019. – P. 233-273.
175. Meklesh, V. Characterization of the colloidal properties of dissolved organic matter from forest soils. / Meklesh, V., Gentile, L., Andersson, E., Bhattacharya, A., de Farias, M.A., Cardoso, M.B., Stålbrand, H., Loh, W., Škerlep, M., Kritzberg, E. and Tunlid, A. // *Frontiers in Soil Science*. – 2022. – N2. – P. 16.
176. Melese, S. M. Impact of overgrown plant deposit on physical-chemical properties of the sod-podzolic soils during the last 60 years in the Central State Biosphere Forest Reserve, Western European part of Russia. / Melese, S.M. and Vasenev, I.I. // *Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure: Proceedings of Smart and Sustainable Cities – 2020*. – Springer International Publishing. – 2021. – P.132-149.
177. Miroshnyk, N.V. Green infrastructure and relationship with urbanization – Importance and necessity of integrated governance. / Miroshnyk, N.V., Likhonov, A.F., Grabovska, T.O., Teslenko, I.K. and Roubík, H. // *Land Use Policy*. – 2022. – V.114. – P. 105941.
178. Nogovitsyn, A. Historical variation in normalized difference vegetation index compared with soil moisture at a taiga forest ecosystem in northeastern Siberia. / Nogovitsyn, A., Shakhmatov, R., Morozumi, T., Tei, S., Miyamoto, Y., Shin, N., Maximov, T.C. and Sugimoto, A. // *EGUsphere*. – 2023. – P. 1-24.
179. Osman, K.T. Biological properties of forest soils. / Osman, K.T. and Osman, K.T. // *Forest Soils: Properties and Management*. – 2013. – P. 77-95.
180. Pickett, S.T. Beyond urban legends: an emerging framework of urban ecology, as illustrated by the Baltimore Ecosystem Study. / Pickett, S.T., Cadenasso, M.L., Grove, J.M., Groffman, P.M., Band, L.E., Boone, C.G., Burch, W.R., Grimmond, C.S.B., Hom, J., Jenkins, J.C. and Law, N.L. // *BioScience*. – 2008. – 58(2). – P. 139-150.
181. Rooney, D.J. A profile cone penetrometer for mapping soil horizons. / Rooney, D.J. and Lowery, B. // *Soil Science Society of America Journal*. – 2000. – 64(6).

- P. 2136-2139.
182. Ros, M. Hydrolase activities, microbial biomass and bacterial community in a soil after long-term amendment with different composts. / Pascual, J.A., Garcia, C., Hernandez, M.T. and Insam, H. // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2006. – 38(12). – P. 3443-3452.
183. Rozhkov, V.A. The forest cover of Russia and soil conservation. / Rozhkov, V.A., Karpachevskii, L.O. // *Eurasian Soil Science*. – 2006. – 39(10). – P. 1041.
184. Rysin, L.P. Natural aspects of the recreational use of forests. / Rysin, L.P. – 1987.
185. Rysin, L.P. Forest monitoring in urbanized areas. / Rysin, L.P., Savel'eva, L.I. and Rysin, S.L. // *Russian journal of ecology*. – 2004. – V. 35. – P. 209-213.
186. Sarzhanov D.A. Carbon stocks and CO<sub>2</sub> emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic Region of Russia / Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Vasenev I.I., Morin T., Sotnikova Y.L., Ryzhkov O.V. // *Catena*. – 2017. – V. 158. – P. 131-140.
187. Schoenholtz, S.H. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. / Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H. and Burger, J.A. // *Forest ecology and management*. – 2000. – 138(1-3). – P. 335-356.
188. Shanin, V.N. Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes. / Shanin, V.N., Komarov, A.S., Mikhailov, A.V. and Bykhovets, S.S. // *Ecological Modelling*. – 2011. – 222(14). – P. 2262-2275.
189. Stroganova, M. Urban soils classification for Russian cities of the taiga zone. / Stroganova, M. and Prokofieva, T. // *Soil Classification*. – 2001. – P. 153-156.
190. Sujetovienė, G. Impact of visitors on soil and vegetation characteristics in urban parks of central lithuania. / Sujetovienė, G. and Baranauskienė, T. // *Environmental Research, Engineering and Management*. – 2016. – 72(3). – P. 51-58.

191. Svirejeva-Hopkins, A. Urbanized territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. / Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H.J. and Pomaz, V.L. // *Ecological Modelling*. – 2004. – 173(2-3). – P. 295-312.
192. Toivio, J. Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland. / Toivio, J., Helmisaari, H.S., Palviainen, M., Lindeman, H., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M. and Uusitalo, J. // *Forest ecology and management*. – 2017. – 405. – P. 22-30.
193. Trautvain, S.A. Assessment of ecological state of the Chogray reservoir using remote sensing of the Earth (Stavropol Territory, Russia). / Trautvain, S.A., Iliukh, M.P., Drup, V.D., Zelenskaya, T.G., Stukalo, V.A. and Stepanenko, E.E. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020.– Vol. 579. No.1. – P. 012146).
194. Turner, M.A. Land use regulation and welfare. / Turner, M.A., Haughwout, A. and Van Der Klaauw, W. // *Econometrica*. – 2014. – 82(4). – P. 1341-1403.
195. Ullo, S.L. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. / Ullo, S.L. and Sinha, G.R. // *Sensors*. – 2020.– 20(11). – P. 3113.
196. Valentini, R. The world after Paris 2015: Research perspectives for ecology and food production in Russia. / Valentini, R., Vasenev, I.I. // *Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем*. / Под общей редакцией И.И. Васенева, Р. Валентини. – Москва: Скрипта Манент. – 2015. – С. 82-84.
197. Vasenev, I.I. Comparative analysis of principal factors of spatial-temporal variability of CO<sub>2</sub> emission from Moscow urban soils with various levels of anthropogenic impact. / Vasenev, I.I., Vizirskaya, M.M., Vasenev, V.I., Valentini, R. and Raskatova, T.V. // *Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy*. – 2012. – P. 102-112.
198. Vasenev, I.I. Agroecological issues of soil carbon pools and GHG fluxes analysis in frame of regional ecological monitoring system RusFluxNet. / Vasenev, I.I., Vasenev, V.I. and Valentini, R. // *Агроэкология*. – 2014. – V.1. – P. 8.

199. Vasenev, I.I. Soil and land-use planning. / Vasenev, I.I. // Task Force: Soil Matters–Solutions under Foots/S. Nortcliff edit. – Catena Verlag: Geo Ecology Essays. – 2015. – P. 100-104.
200. Vasenev, I.I. Assessment of within-forest variability in Albeluvisol quality in an urban forest ecosystem for the northern part of the Moscow megalopolis. / Vasenev, I.I., Avilova, A.A., Tikhonova, M.V. and Ermakov, S.J. // Green Technologies and Infrastructure to Enhance Urban Ecosystem Services: Proceedings of the Smart and Sustainable Cities Conference – 2018. – Springer International Publishing. – 2020. – P. 133-144.
201. Vasenev, V.I. How to map soil organic carbon stocks in highly urbanized regions? / Vasenev, V.I., Stoorvogel, J.J., Vasenev, I.I., Valentini, R. // Geoderma. – 2014. – 226. – P. 103-115.
202. Vasenev, V.I. Urban soil's functions: Monitoring, assessment, and management. / Vasenev, V.I., Smagin, A.V., Ananyeva, N.D., Ivashchenko, K.V., Gavrilenko, E.G., Prokofeva, T.V., Patlseva, A., Stoorvogel, J.J., Gosse, D.D. and Valentini, R. // Adaptive soil management: from theory to practices. – 2017. – P. 359-409.
203. Vasenev, V. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. / Vasenev, V. and Kuzyakov, Y. // Land Degradation & Development. – 2018. – 29(6). – P. 1607-1622.
204. Vasenev, V.I. The ecological functions and ecosystem services of urban and technogenic soils: From theory to practice (A review). / Vasenev, V.I., Van Oudenhoven, A.P.E., Romzaykina, O.N. and Hajiaghaeva, R.A. // Eurasian soil science. – 2018. – V. 51. – P. 1119-1132.
205. Vasenev, V.I. Land-use change in New Moscow: First outcomes after five years of urbanization. / Vasenev, V.I., Yaroslavtsev, A.M., Vasenev, I.I., Demina, S.A. and Dovltetyarova, E.A. // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – 12(4). – P. 24-34.

206. Walkiewicz, A. How can litter modify the fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from forest soils? A mini-review. / Walkiewicz, A., Rafalska, A., Bulak, P., Bieganowski, A. and Osborne, B. // *Forests*. – 2021. – 12(9). – P. 1276.
207. Wong, V.N. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation. / Wong, V. N., Dalal, R. C., & Greene, R. S. // *Applied Soil Ecology*. – 2009. – 41(1). – P. 29-40.
208. Yimer, F. Soil property variations in relation to enclosure and open grazing land use types in the Central Rift Valley area of Ethiopia. / Yimer, F., Alemu, G. and Abdelkadir, A. // *Environmental Systems Research*. – 2015. – N 4. – P. 1-10.
209. Yorkina, N. Analysis of the spatial organization of *Vallonia pulchella* (Muller, 1774) ecological niche in Technosols (Nikopol manganese ore basin, Ukraine). / Yorkina, N., Maslikova, K., Kunah, O. and Zhukov, O. // *Ecologica Montenegrina*, – 2018. – V. 17. – P. 29-45.
210. Yorkina, N. Ecological niche packing and spatial organisation of the urban park macrofauna community. / Yorkina, N.V., Kunakh, O.M. and Budakova, V.S. // *Agrology*. – 2019. – 2(4). – P. 209-218.