

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОДСТИЛОК ГОРОДСКИХ ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИХ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ В Г. МОСКВЕ

© 2024 г. О. В. Семенюк^a (<https://orcid.org/0000-0003-0910-6111>),

В. М. Телеснина^{a, *}, Л. Г. Богатырев^a, В. А. Кузнецов^a, А. И. Бенедиктова^a

^aФакультет почвоведения, МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: vtelesnina@mail.ru

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

Изучены свойства лесных подстилок искусственных насаждений лиственницы европейской в пределах особо охраняемой природной территории “Измайловский парк” г. Москвы. Объектами исследования послужили два участка лиственничных насаждений 100–120 лет на дерново-элювоземах типичных супесчаных на опесчаненных отложениях, подстилаемых мореной (Leptic Cambisols). Один из участков являлся контролем, а другой подвергается типичному для парковых территорий антропогенному воздействию в результате рекреации. Предложена группировка показателей структуры и трансформации подстилок, которая позволила оценить поэтапное изменение органического вещества, соответствующее различным временным периодам функционирования подстилок. В сезонной динамике для контрольных насаждений выявлено равномерное уменьшение запасов в течение года, тогда как для нарушенных отмечается наиболее существенное снижение запасов в период ноябрь–июнь. В годичном цикле установлено значительное снижение запасов активной фракции, что свидетельствует об интенсивном биологическом круговороте в исследуемых лиственничниках. Выявлены различия в динамике запасов фракций подстилок. Рекреационная нагрузка в лиственничных насаждениях определяет уменьшение депонирования органического вещества подстилки и оказывает влияние на динамику этого процесса. Установлено значимое уменьшение мощности и запасов подстилок в ходе рекреации в 2 раза, с существенным упрощением строения и изменения типологии подстилок, что особенно ярко выражено на приствольных участках. Показатели структурно-функциональной организации подстилок лиственничников являются информативными критериями, характеризующими особенности биогеохимических циклов органического вещества, и могут быть использованы и в других типах насаждений, как природных, так и в условиях мегаполиса.

Ключевые слова: урбоэкосистемы, наземный детрит, рекреационное воздействие, лиственница, биологический круговорот

DOI: 10.31857/S0032180X24I20069, **EDN:** JDHOCH

ВВЕДЕНИЕ

Бореальные леса занимают 13.7 млн км² – 15% всей поверхности суши. В пределах Российской Федерации в подстилках сосредоточено до 145 ГтС, что следует рассматривать как важнейший пул органического вещества [3]. Роль лиственничников на территории Российской Федерации чрезвычайно велика. Так, если общая площадь хвойных насаждений составляет 514741×10^3 га, то на лиственничники приходится почти 50%, что соответствует

36% от всех лесных земель [34]. Это касается запасов углерода, составляющих 1.7 ГтС – почти 30% от всех запасов углерода, сосредоточенного во всех лесных насаждениях нашей страны [34].

В связи со значительными запасами органического вещества, сосредоточенными в различных компонентах экосистем лиственничных насаждений, трудно переоценить роль лиственничников в решении вопросов глобального изменения климата. Одно из ведущих направлений в исследованиях лиственничников принадлежит установлению

закономерностей поглощения углерода лесными экосистемами [34], в частности, предложено рассчитывать соотношение между фактическими и прогнозируемыми запасами углерода в древостое. Признано, что горные леса являются хорошей моделью по изучению влияния климата на процессы разложения [33]. Изучаются углеродные бюджеты подстилки и почвы на основе использования различных моделей [40].

Анализ запасов подстилок различных лиственничников показал, что они варьируют в широких пределах. Высокие запасы подстилки отмечены в лиственничниках центральной Эвенкии. Для кустарничково-залежных лиственничников они составляют до 7.5 кг/м^2 при общих закономерностях увеличения этих показателей с возрастом [25]. При мощном слое сфагновых и зеленых мхов запасы подстилок оцениваются около 5.0 кг/м^2 , тогда как в среднем эти величины составляют около 4.0 кг/м^2 [25]. Запасы подстилок в лиственничниках Средней Сибири составляют от 2.6 кг/м^2 , это ниже, чем в сосновых насаждениях (3.5 кг/м^2) [20]. По данным авторов [6], запасы подстилок лиственных насаждений оцениваются около 2.5 кг/м^2 , что в 1.5 раза ниже запасов других хвойных пород.

Однако по запасам горизонта L лиственница уступает только сосне, а запасы горизонта F у нее меньше, чем у всех остальных хвойных пород. Запасы горизонта H составляют незначительную часть подстилки и уступают лишь ели и сосне, но больше, чем у кедра [6, 26].

Пространственные особенности распределения запасов подстилок могут быть обусловлены рядом факторов [38], в том числе таких, как степень увлажнения местообитаний и расположением в рельефе. Влияние рельефа проявляется через экспозицию склона: на северных склонах запасы подстилки в лиственничниках несколько выше по сравнению с южными склонами [2], что объясняется снижением скорости разложения наземного детрита. Для лиственничников бассейна Нижней Тунгуски запасы подстилок в зависимости от микрорельефа могут изменяться до 30% [9]. На уровне биогеоценоза неоднородность свойств подстилок детерминирована деревьями-эдикаторами [14, 22].

Изучение особенностей разложения подстилок лиственничников показало, что подстилки этих насаждений характеризуются более высокой скоростью разложения органического вещества по сравнению с подстилками других типов хвойных лесов. Так, в подстилках лиственничников потеря углерода составляет 30%, тогда как в подстилках ельников и сосняков эта величина оценивается в 4 и 9% соответственно [6]. На синтез гумусовых веществ в почве из освободившегося растительного материала в условиях лиственничников приходится

до 25%, тогда как в условиях еловых и березовых насаждений всего лишь 9–10% в год [26]. Доля новообразованных гумусовых веществ в составе общего органического вещества, участвующего в процессах разложения, в лиственничниках составляет 0.1%, сближаясь в этом отношении с еловыми насаждениями, тогда как в целом эта величина для различных подстилок не превышает 0.8% [7].

Одним из важнейших направлений является изучение динамики запасов подстилки во времени в зависимости от различных факторов. В первую очередь отметим, что запасы подстилки и интенсивность освобождения из нее химических элементов признаны важным критерием оценки устойчивости экосистем [23]. Анализ имеющихся публикаций показывает, что данные по динамике запасов подстилки неоднозначны. Так, для лесных экосистем Приморья установлено, что максимум запасов приходится на период ноябрь–апрель, тогда как начиная с марта до начала осени потери в весе могут достигать 20% за счет минерализации [12]. Результаты исследования в южно-таежных ландшафтах показывают, что несмотря на колебания запасов подстилки в течение вегетационного периода различия за сезон не столь существенны. На этом основании делается вывод, что система органического вещества подстилки стабильна и характеризуется динамическим равновесием [35]. В других работах подчеркивается зависимость запасов подстилки от специфических условий года [10]. При проведении экспериментальных исследований показано, что за год снижение запасов подстилки может составлять от 30 до 50%, в случае лиственничника доля легкоминерализуемой фракции органического вещества без подстилки в суммарном потоке углекислого газа составляет до 65% против 31–40% в случае подстилки и почвы из кедровника и сосняка [26].

Динамика запасов подстилки различна для хвойных и лиственных насаждений. В частности, для южно-таежной зоны удалось установить, что мощность подстилки под хвойными насаждениями с мая по октябрь остается неизменной, а под лиственными увеличивается в сентябре–октябре на 1–3 см [21]. Сравнение пространственной и временной изменчивости для заболоченных березняков показало, что высокая пространственная изменчивость гораздо выше, чем временная [11].

Детальные исследования по биотрансформации лесной подстилки [4, 5] показали, что преобладающими в составе подстилок хвойных экосистем являются подгоризонты ферментации для всех типов лесов. В методическом отношении получены результаты по тесной зависимости между запасами подстилки и сомкнутостью крон, включая утверждение о важности учета парцеллярного строения напочвенного покрова [27]. Кроме того, постулируется необходимость учитывать запасы

органического вещества в системе сопряженных подгоризонтов подстилки [36].

В городских условиях лиственница используется в качестве декоративной культуры в линейных, аллейных и групповых посадках. В отличие от еловых и сосновых насаждений, составляющих около 3.5% от породного состава городских насаждений [41], данные по долевого участию лиственницы отсутствуют так же, как результаты исследований по характеристике подстилок городских лиственничников. Однако лиственница может рассматриваться как перспективная порода для озеленения городской среды так как по сравнению с другими хвойными она устойчива к влиянию городской среды, являясь листопадным деревом. Кроме того, лиственница в плане биологического круговорота занимает промежуточное положение между зимнезелеными хвойными породами и лиственными породами. С одной стороны, хвоя имеет принципиально иной биохимический состав, чем листья, с другой — ежегодный прирост ассимиляционных органов в тот же год превращается в опад, как это свойственно лиственным породам. Следовательно, годовая и сезонная динамика показателей подстилок в насаждениях лиственницы должна отличаться как от хвойных, так и от лиственных фитоценозов.

Цель работы — изучение динамики органического вещества подстилок городских хвойных насаждений на примере лиственничников, характеризующихся разной степенью рекреационной нагрузки, с использованием показателей структурно-функциональной организации подстилок.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования расположены на территории природно-исторического парка “Измайлово” г. Москвы и представляют собой ненарушенный и рекреационно нарушенный лиственничники.

Территория Москвы соответствует умеренно-континентальному климату — среднегодовая температура составляет +5.8°C, годовое количество осадков 600–800 мм [18]. Восток и северо-восток Москвы, в том числе Измайловский парк, относятся к окраине Мещерской низменности, на изучаемой территории рельеф носит однородный плоский характер. Измайловский парк расположен на участке, характеризующемся небольшой мощностью четвертичных водно-ледниковых и аллювиальных отложений, под которыми залегают глины [8]. Доступными для корней древесной растительности материнскими породами, в основном, являются моренные отложения, залегающие сплошным слоем и состоящие из грубого суглинка, иногда супесей.

В 18-м квартале парка произрастают искусственные насаждения лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) возрастом 120 лет с кленовым подростом, формула древостоя 10Л. Высота лиственниц составляет 30–35 м, диаметр ствола от 44 до 70 см. Полнота древостоя — 800–900 деревьев/га. Почвы по классификации 2004 г. [17] соответствуют дерново-элювоземам типичным супесчаным на опесчаненных отложениях, подстилаемых мореной (Leptic Cambisols по классификации WRB). Почвы были описаны на обоих изучаемых участках, но профили практически не различаются. Выявлено, что для почвы в целом характерна хорошо развитая подстилка мощностью до 5–7 см, особенно в условиях приствольного повышения. Почва сформирована на легких, пылеватых супесчаных отложениях, подстилаемых довольно резко на глубине 90 см красно-бурой тяжелосуглинистой опесчаненной мореной с включением редкой дресвы. В пределах почвенной части профиля одной из характерных черт является хорошо выраженный гумусово-аккумулятивный горизонт темных тонов, легкосуглинистый, пылеватый, с характерной мелкокомковатой, но непрочной структурой, мощностью до 15 см. Для всего почвенного профиля характерна довольно слабая тенденция к формированию по элювиально-иллювиальному типу. Только в пределах горизонта Е и горизонта ЕВ отмечается слабая оподзоленность, диагностируемая исключительно по легкой осветленности. Никаких других признаков оподзоленности, которые обычно присутствуют в почвах подзолистого типа, например, плитчатости, мелких орштейнов или железо-марганцевых примазок не отмечено. В иллювиальном горизонте ярких признаков иллювиального процесса не отмечено, за исключением появления более буроватых тонов по сравнению с переходным горизонтом ЕВ.

Выделено два лиственничника, характеризующихся разной степенью нарушения в результате рекреационной нагрузки: лиственничник кислично-зеленчуковый (ненарушенный или контрольный) и лиственничник недотрогово-крапивно-зеленчуковый (нарушенный). В результате описания живого напочвенного покрова определили степени дигрессии [13]. Лиственничнику кислично-зеленчуковому соответствует 1 стадия дигрессии, тогда как лиственничнику недотрогово-крапивно-зеленчуковому — 3–4 степень (доля сорно-рудеральных видов — 42%).

В лесном фитоценозе, особенно хвойном, дерево-эдификатор детерминирует внутреннюю пространственную структуру фитоценоза, единицей которого является тессера — совокупности приствольного, подкоронового и междоронового пространств [16]. Подстилки отбирали по подгоризонтам в соответствии с положением в тессере (ствол—крона—окно) с площади 25 × 25 см, в каждом

фитоценозе было выбрано 10 тессер. Приствольное пространство составляет примерно 50 см от ствола, подкрановое — около 2 м, под окном понимали участок, где проекция кроны на землю отсутствует.

В поле определяли мощность подстилок, в камеральных — запасы и фракционный состав подгоризонта L (хвоя, ветки, шишки, кора, семена, листья, детрит). Под детритом понимали сильно разложенные растительные остатки, происхождение которых сложно определить. В связи со сложностью разделения фракций хвои и детрита данные компоненты разделяли с помощью сит диаметром 3 и 1 мм. В полученной фракции более 3 мм оставался крупный детрит. Фракция 1–3 мм визуализировалась как хвоя, однако в ней незначительно присутствует детрит, отделение которого было затруднено. Фракция меньше 1 мм представлена мелким детритом. Расчет долевого участия каждой фракции и запасов подстилок велся на абсолютно-сухую

навеску (г/м^2) после высушивания образцов в сушильном шкафу при температуре 105°C . Пересчет на органическое вещество проводили с учетом зольности образцов, которую определяли методом сухого озоления в муфельной печи при 450°C .

Для характеристики динамики подстилок на основе их структурно- функциональной организации предлагается группировка показателей, характеризующих свойства подстилок и их изменения на различных этапах разложения органического вещества в разные промежутки времени (табл. 1). К базовым показателям относятся тип подстилки, общая мощность и запасы подстилок. Это наиболее простые для оценки и измерения показатели, характеризующиеся высокой информативностью. С увеличением запасов подстилок снижается скорость биологического круговорота органического вещества и увеличивается его депонирование.

Таблица 1. Система показателей для оценки структуры и функционирования лесных подстилок

Базовый показатель	Показатель структуры	Показатель циклов функционирования			
		сезонный	годовой	кратковременный	долговременный
Тип подстилки	Система генетических подгоризонтов	Оценка свойств подгоризонта L с сезонной периодичностью: запасы подстилки и ее фракций (г/м^2) изменение запасов фракций как разница между запасами предыдущего и последующего сроков отбора	Запас ежегодно реализуемого органического вещества подстилок ($\text{г/м}^2/\text{год}$)	Активная фракция — запас (г/м^2) и доля (%) от общего запаса подгоризонта L	Отношение мощности нижележащих подгоризонтов к мощности подгоризонта L
Мощность, см	Фракционный состав подгоризонта L, %		Доля ежегодно реализуемого органического вещества от общего запаса подгоризонта L подстилки (%)	Легко разлагаемые компоненты — запас (г/м^2) и доля (%) от запаса подгоризонта L	Отношение запасов нижележащих подгоризонтов к запасам подгоризонта L
Запасы, г/м^2				Фракция детрита — запас (г/м^2) и доля (%) от запаса подгоризонта L Отношение запаса легко разлагаемых компонентов к запасу фракции детрита в подгоризонте L	

Показателями структуры являются система генетических подгоризонтов, количество которых определяет строение и классификационную принадлежность подстилок. Типологию подстилок определяли на основе классификации подстилок Богатырева [1]. Подстилки изучаемых объектов представлены тремя основными типами. Выделяли деструктивные маломощные подстилки, морфологически состоящие из растительных остатков прошлых лет (единственный подгоризонт L), что свидетельствует о высокой скорости переработки органического вещества. При снижении скорости разложения формируются подстилки более сложного строения ферментативные (L–F) и гумифицированные (L–F–H), которые включают в себя соответственно подгоризонт опада (L), ферментативный (F) и гумифицированный (H), различающиеся по степени разложения органического вещества. Последние характеризуются наибольшей мощностью и запасами, что свидетельствует об активном депонировании органического вещества в экосистеме и позволяет оценить интенсивность биологического круговорота зеленых насаждений [31].

К показателям структуры фракционный состав подгоризонта L который представлен свежим опадом, слабо разложенными частями растений (ветками, хвоей, плодами, ветошью, листьями и т.д.) и детритом, и определяется особенностями дерева-эдификатора.

Показатели функционирования представлены следующими группами: циклы сезонные, годовые, краткосрочные и долгосрочные, позволяющие оценивать изменение подстилок в различные временные сроки. Для оценки изменения подстилок в сезонном, годовом и краткосрочном циклах функционирования используют показатели подгоризонта L как наиболее динамичного по отношению к нижележащим подгоризонтам подстилки.

В основе изучения сезонного цикла функционирования лежит периодический отбор образцов с любыми временными промежутками, определяемыми задачами исследования. В данном исследовании отбор подстилок проводили в три срока: в ноябре после полного листопада, в июне следующего года и в сентябре перед началом следующего листопада. Оценку поэтапного изменения свойств подстилок проводили путем расчета разницы запасов подстилки, отобранной в предыдущий и следующий за ним срок отбора образцов.

Показателем функционирования в годовом цикле преобразования растительного опада в условиях древесных насаждений является объем ежегодно реализуемого органического вещества (РОВ) [31]. Объем ежегодно реализуемого органического вещества в подстилке рассчитывали по разности запасов легкоразлагаемых компонентов [29], представленной суммой листьев и ветоши после

листопада и в период минимальных значений запасов в годовом цикле. Долю РОВ рассчитывали от запасов подгоризонта L после листопада. Для удобства оценки трансформации органического вещества в годовом цикле введено понятие “реализация подстилок”. Период реализации подстилки (или каких-либо их компонентов) – временной период, в настоящем случае 1 год, в течение которого оценивается уменьшение запасов. Таким образом, величина реализации измеряется путем вычисления разности запасов фракций (ЛРК, активной фракции), определенных в летний и осенний периоды, и измеряется в г/(м² год).

Согласно Карпачевскому [15], выделяли активную и пассивную фракции подгоризонта L. Активная фракция включает листья и хвою, которые преобразуются в процессе деструкции относительно быстро, а пассивная фракция состоит из долго разлагаемых веток, шишек, коры и т.д.

Используются также характеристики таких фракций, как легкоразлагаемые компоненты (ЛРК), в данном случае представленные только листьями клена из подлеска, и детрит. Запас и доля легкоразлагаемых компонентов – это наиболее доступная для разложения часть подстилок, которая в первую очередь вовлекается в биологический круговорот. Фракция детрита представлена мелкими по размеру остатками, морфологическую принадлежность которых определить не представляется возможным. Наличие детрита свидетельствует о неполном разложении органического вещества подстилок. Увеличение его запасов и доли связано со снижением скорости биологического круговорота в экосистеме. Соотношение запасов ЛРК и детрита отражает активность и глубину разложения ежегодно поступающего опада. Оценку краткосрочного цикла функционирования проводили на данных, полученных в июньский срок отбора подстилок.

Оценка долговременного цикла функционирования основана на свойствах, которые характеризуют весь профиль подстилок. Мощность (запасы) суммы подгоризонтов F и H относят к мощности (запасам) подгоризонта L, представленного преимущественно опадом текущего года и являющего собой 0-момент начала преобразования подстилок. Чем больше значение данного показателя, тем больше активность депонирования органического вещества в нижележащих подгоризонтах. Мощность и запасы подстилок (общие и по подгоризонтам) определяли в июне, поскольку этот месяц соответствует наиболее стабильным условиям для изменения подстилок по причине отсутствия листопада.

Полученные результаты исследования подстилок лиственных насаждений рассматриваются на основе блоков, представленных в вышеприведенной табл. 1.

Статистическую обработку полученных данных и расчет основных показателей описательной статистики проводили с помощью программы Statistica. В качестве одного из методов использовали метод главных компонент. Его результаты послужили основой для выделения наиболее важных факторов, которые объясняют наибольшую долю изменчивости характеристик подстилки на нарушенных и ненарушенных участках в разные периоды опробования. Для описания статистической зависимости между различными характеристиками фракционного состава подстилки использовали непараметрический коэффициент корреляции Спирмена, который устойчив к наличию нетипичных значений и не требует, чтобы данные имели нормальное распределение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Базовые показатели и структура подстилок. В исследованных насаждениях встречаются деструктивный, ферментативный и гумифицированный типы подстилок в зависимости от положения в тессере. Для некоторых подстилок был выделен промежуточный подгоризонт FH — ферментативно-гумифицированный, в котором присутствовали признаки сразу двух подгоризонтов.

Лиственница как дерево-эдификатор определяет пространственную неоднородность распределения подстилок в пределах тессер. В приствольных пространствах контрольного лиственничника преобладают гумифицированные подстилки (табл. 2), тогда как в приствольных пространствах нарушенного — ферментативные. Эта закономерность выявлена и для подкроновых пространств, занимающих наибольшую долю территории парка. В окнах нарушенного лиственничника все подстилки представлены деструктивным типом. Это свидетельствует о снижении депонирования органического вещества в подстилках под влиянием рекреационной нагрузки.

При сравнении результатов по ненарушенным и рекреационным ельникам Битцевского парка г. Москвы [33] отмечено упрощение строения подстилок во всех элементах тессер.

Мощность подстилок значительно уменьшается в ходе рекреации (рис. 1), что особенно выражено для приствольных пространств. Следует отметить, что рекреационное воздействие существенно нивелирует различия мощности подстилок между приствольными пространствами и остальными компонентами тессеры. Снижение мощности подстилок происходит за счет исчезновения гумифицированного и существенного уменьшения ферментативного подгоризонтов.

То же можно сказать о запасах органического вещества подстилок (рис. 2) — изменение в результате рекреационного воздействия носит не такой отчетливый характер, как изменение мощности, однако прослеживается как тенденция. При этом запасы органического вещества подстилок разных компонентов тессер в результате рекреации стали еще ближе друг другу, чем показатели мощности — в приствольных повышениях, под кронами и в окнах запасы практически одинаковы. Запасы органического вещества горизонтов L в подстилках нарушенного насаждения выше, чем в контроле, в то время как запасы органического вещества подгоризонта F, напротив, существенно ниже. Таким образом, снижение мощности и запасов органического вещества подстилок в результате рекреационного воздействия происходит, главным образом, за счет упрощения их строения в результате ускорения минерализации под влиянием рекреационного нарушения. Похожие закономерности обнаружены ранее по общим запасам подстилок [32], однако при учете только органического вещества различия носят более отчетливый характер.

Анализ фракционного состава подгоризонта L подстилок показал, что доминирует (до 50%) пассивная фракция. К особенностям фракционного состава можно отнести высокое долевое участие детрита, особенно в нарушенном лиственничнике (до 30%) против доли детрита, например, в подстилках еловых насаждений (5–14%) [30]. Доля хвой также значительна — 10–20% в контроле и до 30% на нарушенных участках.

Исследования показали, что влияние эдификатора проявляется не только в распределении в пространстве типов и запасов подстилок, но и

Таблица 2. Распределение подстилок лиственничников в пределах тессер, %

Тип подстилки	Контрольный лиственничник			Нарушенный лиственничник		
	ствол	крона	окно	ствол	крона	окно
Деструктивные	0	0	20	20	0	50
Ферментативные (и ферментативно-гумифицированные)	20	20	40	60	100	50
Гумифицированные	80	80	40	20	0	0

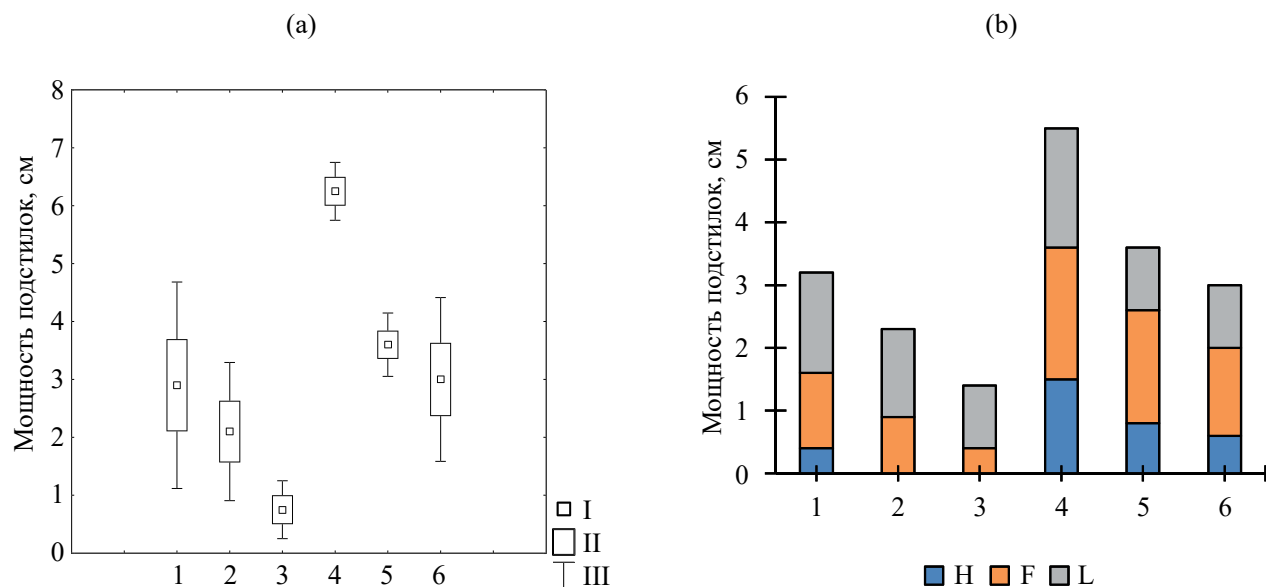


Рис. 1. Мощность подстилок, июнь. (a) — общая, (b) — по подгорizontам. Нарушенный лиственничник: 1 — ствол, 2 — крона, 3 — окно. Контрольный лиственничник: 4 — ствол, 5 — крона, 6 — окно. I — среднее, II — стандартная ошибка, III — стандартное отклонение

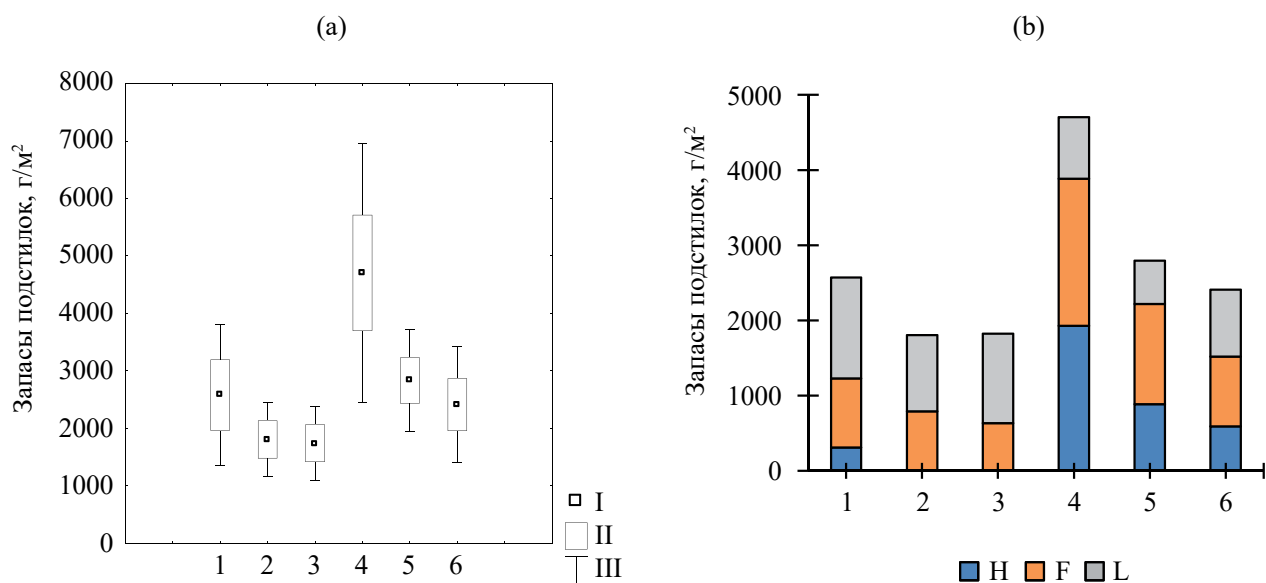


Рис. 2. Запасы органического вещества подстилок, июнь. (a) — общая, (b) — по подгорizontам. Нарушенный лиственничник: 1 — ствол, 2 — крона, 3 — окно. Контрольный лиственничник: 4 — ствол, 5 — крона, 6 — окно. I — среднее, II — стандартная ошибка, III — стандартное отклонение.

фракционного состава подгоризонта L. Это прежде всего сказывается на фракциях хвои и коры.

Сезонный цикл изменения подстилок. Изучение сезонного цикла изменения свойств подгоризонта L подстилок в три срока (ноябрь, июнь, сентябрь) не установило ожидаемого снижения общих запасов от послелистопадного периода к

концу вегетации следующего года. Разброс величины запасов подгоризонта L составляет от 400 до 1680 г/м² (табл. 4). Сказывается высокая пространственная неоднородность свойств подстилок, и, прежде всего, пассивной фракции, где доминирует тяжелая фракция веток, падение которых на поверхность подстилки носит весьма хаотичный

Таблица 3. Некоторые характеристики подгоризонта L подстилок лиственных насаждений (июнь), $n = 5$

Элемент тессеры	Легкоразлагаемые компоненты		Активная фракция		Детрит		Отношение запасов ЛРК к суммарным запасам детрита	Отношение запасов активной фракции к суммарным запасам детрита
	запасы, г/м ²	доля, %	запасы, г/м ²	доля, %	запасы, г/м ²	доля, %		
Контрольный лиственничник								
Ствол	32 ± 23*	4.0	169 ± 51	21.1	235 ± 178	29.3	0.13	0.7
Крона	19 ± 12	3.4	106 ± 25	18.6	81 ± 49	14.2	0.24	1.3
Окно	43 ± 46	5.0	130 ± 44	15.1	120 ± 81	13.8	0.35	1.1
Нарушенный лиственничник								
Ствол	26 ± 26	1.8	263 ± 82	21.8	370 ± 150	27.7	0.1	0.7
Крона	37 ± 41	3.3	281 ± 89	30.1	301 ± 180	31.9	0.1	0.9
Окно	46 ± 57	3.6	377 ± 117	32.9	361 ± 215	30.5	0.1	1.0

* Среднее ± стандартная ошибка.

Таблица 4. Динамика запасов органического вещества некоторых фракций подгоризонта L в течение года, г/м²

Время	Компонент тессеры	Листья	Хвоя	Крупный детрит	Мелкий детрит	Пассивная фракция	Общий запас L
Контрольный лиственный							
Ноябрь	Ствол	19 ± 9*	182 ± 22	97 ± 72	10 ± 5	324 ± 123	631 ± 143
	Крона	79 ± 43	101 ± 31	40 ± 25	4 ± 4	184 ± 168	408 ± 148
	Окно	75 ± 22	128 ± 46	51 ± 27	6 ± 4	146 ± 67	405 ± 114
Июнь	Ствол	32 ± 23	137 ± 56	182 ± 133	53 ± 54	416 ± 416	801 ± 511
	Крона	19 ± 12	87 ± 39	66 ± 35	15 ± 14	396 ± 324	569 ± 324
	Окно	43 ± 46	89 ± 22	104 ± 75	15 ± 11	639 ± 914	863 ± 997
Сентябрь	Ствол	24 ± 25	89 ± 29	120 ± 53	6 ± 3	437 ± 205	633 ± 200
	Крона	33 ± 29	56 ± 30	64 ± 39	10 ± 11	266 ± 101	421 ± 161
	Окно	25 ± 15	70 ± 39	85 ± 46	13 ± 14	308 ± 141	492 ± 219
Нарушенный лиственный							
Ноябрь	Ствол	31 ± 25	354 ± 150	53 ± 27	13 ± 16	494 ± 607	1016 ± 382
	Крона	106 ± 784	450 ± 226	31 ± 30	8 ± 10	478 ± 766	1012 ± 771
	Окно	99 ± 84	269 ± 145	35 ± 39	9 ± 10	216 ± 219	670 ± 835
Июнь	Ствол	26 ± 26	238 ± 82	299 ± 121	75 ± 71	563 ± 428	1201 ± 796
	Крона	37 ± 40	251 ± 101	250 ± 151	55 ± 45	341 ± 372	934 ± 801
	Окно	47 ± 46	330 ± 120	301 ± 200	58 ± 62	410 ± 346	1146 ± 863
Сентябрь	Ствол	8 ± 6	228 ± 142	353 ± 189	46 ± 51	481 ± 299	1087 ± 569
	Крона	11 ± 6	352 ± 214	468 ± 229	108 ± 94	736 ± 422	1680 ± 840
	Окно	11 ± 7	185 ± 132	283 ± 218	53 ± 57	647 ± 363	1172 ± 747

* Среднее ± стандартная ошибка.

характер. По-видимому, именно в июне наблюдается повышенный запас компонентов пассивной фракции в подгоризонте L, поскольку основной отпад веток происходит зимой из-за воздействия снега. Корреляционный анализ показал тесную связь общих запасов подгоризонта L и пассивной фракции ($R = 0.8-0.9$).

Для контрольного участка отмечается уменьшение запасов фракции хвой и увеличение запасов крупного детрита почти в 2 раза по выбранным срокам изучения от ноября к сентябрю следующего года. Аналогичная направленность изменения свойств подстилки проявляется и для нарушенного листовенничника, где увеличение запасов крупного детрита отмечается до 5 раз. Коэффициент корреляции Спирмена между фракциями хвой и крупного детрита составил ($R = 0.9$). Для динамики фракции листьев установлена та же тенденция. Достоверные различия между сроками наблюдений отмечались редко, например, в приствольном пространстве в

подстилках контроля для фракции хвой, а на нарушенном участке для крупного детрита. Динамику свойств подстилки можно охарактеризовать через поэтапное изменение запасов фракций подгоризонта L за периоды наблюдений. Особую информативность приобретают такие фракции, как листья, хвоя, крупный и мелкий детрит. В табл. 5 представлены данные, отражающие направленность динамики органического вещества подстилок.

В контроле в период с ноября по июнь в подгоризонте L снижаются запасы фракции листьев и хвой при увеличении запасов детрита, формирование которого, по-видимому, в значительной мере определяется разложением активной фракции. С июня по сентябрь отмечается снижение запасов почти всех фракций, что свидетельствует об активной фазе трансформации органического вещества включая относительно труднодоступные для микроорганизмов фракции детрита как крупного, так и мелкого. Разложение детрита продолжается с

Таблица 5. Изменение запасов фракций подгоризонта L в разные периоды года, г/м²

Компонент тессеры	Фракция	Контроль			Нарушенный		
		ноябрь—июнь	июнь—сентябрь	сентябрь—ноябрь	ноябрь—июнь	июнь—сентябрь	сентябрь—ноябрь
Ствол	Листья	+13	— 8	—6	—5	—18	+23
	Хвоя	—45	—48	+93	—115	+101	+126
	Крупный детрит	+85	—63	—23	+246	+54	—301
	Мелкий детрит	+43	—47	+3	+62	—30	—33
	Пассивная фракция	+92	+21	—113	+69	—82	+13
Крона	Листья	—59	+13	+46	—69	—27	+95
	Хвоя	—14	—31	+45	—199	+109	+98
	Крупный детрит	+26	—1	—24	+220	+217	—437
	Мелкий детрит	+11	—5	—6	+47	+53	—100
	Пассивная фракция	+212	—130	—82	—137	+395	—258
Окно	Листья	—32	—18	+50	—52	—35	+88
	Хвоя	—39	—18	+57	+61	—145	+84
	Крупный детрит	+54	—120	—34	+266	—17	—248
	Мелкий детрит	+10	—2	—8	+49	—6	—44
	Пассивная фракция	+4933	—331	—162	+195	+237	—432

сентября по ноябрь. В этот период начинается опад хвои, что сказывается на увеличении ее запасов.

В подстилках нарушенного участка в период с ноября по июнь, как и на контроле, в подгоризонте L снижаются запасы активной фракции при увеличении запасов детрита. В летний период уменьшаются запасы фракции листьев, однако изменения других свойств подстилки различаются в зависимости от принадлежности к зонам тессер. В зоне ствола и кроны отмечается активное поступление хвои, что может быть связано с ослабленным состоянием древостоя в условиях рекреации. Увеличение запасов хвои с ноября по сентябрь создает значительный пул активно разлагающихся фракций, которые являются основой для формирования крупного детрита, прибавка которого в этот период составляет более 200 г/м², возможно, в том числе в результате вытаптывания. Изменение свойств подстилки в осенний период сентябрь–ноябрь отражает дальнейшее поступление опада в виде листьев и хвои на фоне резкого снижения запасов детрита. Полевые исследования показали, что нарушенный участок характеризуется малым проективным покрытием живого напочвенного покрова. И в условиях недостаточного количества осадков в летний период наблюдений, наиболее благоприятные условия для жизнедеятельности организмов создаются осенью.

Установлено, что запасы органического вещества разных фракций подгоризонта L в нарушенном и контрольном лиственничнике не одинаковы в разные сезоны. Поскольку листья, хвоя лиственницы и другие фракции поступают на поверхность почвы и разлагаются с разной скоростью, то и их динамика в течение года, а также в разных элементах тессеры отличается, что соответствует литературным данным [34].

Годичный цикл функционирования подстилок. Оценку результирующей динамики свойств подгоризонта L подстилки в годовом цикле проводили с использованием таких показателей, как ежегодно реализуемое органическое вещество и изменение запасов активной фракции (табл. 6).

В подстилках контрольного участка снижение запасов ЛРК, представленных листьями, и

активной фракции, включающей как листья, так и хвою, оценивается величинами одного порядка от 30 до 70 г/м². Как и следовало ожидать, доля реализации ЛРК значительно выше – 60–70% против 20–40% для активной фракции, что определяется биохимическим составом фракции листьев, легко доступных для утилизации микроорганизмами. Такая же тенденция наблюдается и для доли ЛРК и активной фракции подстилки нарушенного лиственничника. В условиях рекреации для активной фракции по сравнению с фракцией ЛРК отмечается более существенное (в 4–10 раз) уменьшение запасов, что в значительной мере определяется повышенными запасами хвои на нарушенном участке. Однако близкие значения доли реализуемого органического вещества свидетельствуют о некотором сходстве и постоянстве скорости разложения органического вещества на контроле и нарушенном варианте.

Кратковременный цикл функционирования подстилок. Для характеристики активности разложения органического вещества подстилок использовали оценку потенциала относительно быстро разлагающихся компонентов и детрита как продукта их неполного разложения. Легкоразлагаемые компоненты (листья) составляют очень низкую долю в составе подстилок (2–4%), поэтому соотношение их запасов к запасам детрита мало показательно. Однако доля активной фракции, куда включается хвоя, весьма значительна – 0–30%. Необходимо отметить, что в отличие от хвои еловых насаждений хвоя лиственницы разлагается достаточно активно [7, 24], что свидетельствует о ее важной роли в оценке потенциала быстроразлагающихся органических веществ в подстилках лиственничных насаждений. Запасы хвои в подгоризонте L значимо выше во всех элементах тессер рекреационного лиственничника, причем эти различия превышают различия внутри биогеоценозов по элементам тессеры.

Что касается суммарного запаса органического вещества детрита, он значимо повышается в межкروновых и подкروновых пространствах нарушенного лиственничника по сравнению с контрольным. Возможно, именно вытаптывание в

Таблица 6. Ежегодно реализуемое органическое вещество (ЕРОВ) и изменение запасов активной фракции в годичном цикле. + увеличение, – потеря

Зона тессеры	Контроль				Нарушенный			
	ЕРОВ		активная фракция		ЕРОВ		активная фракция	
	г/м ²	%	г/м ²	%	г/м ²	%	г/м ²	%
Ствол	+13	–	–32	16	–5	84	–121	31
Крона	–59	75	–74	41	–69	65	–268	48
Окно	–32	57	–74	36	–52	54	+12	–

процессе рекреации вызывает измельчение фракций подгоризонта L до состояния детрита [19], что подтверждается повышенным пространственным варьированием этого показателя во всех элементах тессеры нарушенного листовничника.

Необходимо отметить, что в данном случае такие показатели биологического круговорота, как запас и доля детрита не имеют четкой связи со скоростью разложения органического вещества, определяемого природными процессами, как это было выявлено для естественных насаждений, в том числе хвойных [30]. Однако нужно признать воздействие антропогенного механического измельчения в качестве фактора, ускоряющего биологический круговорот органического вещества в условиях рекреации.

Что касается такого показателя, как соотношение запасов активной фракции и детрита, то его величина составляет около 1, что отражает баланс между поступлением наиболее доступных для разложения компонентов и депонированием продуктов неполного разложения в виде детрита. Существенных различий по данному показателю между контрольным и нарушенным листовничником не наблюдается.

Долговременный цикл функционирования лесных подстилок определяет такие показатели, как отношение суммы мощностей нижележащих горизонтов к мощности подгоризонта L, а также отношение запасов суммы нижележащих горизонтов к запасам подгоризонта L. Данные соотношения указывают на соотношение накопления и деструкции органического вещества. Таким образом, для контрольного листовничника отношение суммы мощностей F и H к мощности L составляет 1.9, 2.6 и 2.0 для приствольных пространств, крон и окон соответственно. То, что показатели больше 1, указывает на существенное преобладание процессов накопления над процессами разложения, что типично для естественных и искусственных хвойных насаждений [28; 30].

Для нарушенного листовничника соотношения мощностей составляют соответственно 0.9, 0.6 и 0.5 — это говорит о снижении депонирования органического вещества подстилками в долговременном цикле, а также о некотором нивелировании строения подстилок в разных компонентах тессер в результате вытаптывания.

Сходные результаты получены и для соотношений запасов подгоризонтов, несмотря на то, что именно в условиях рекреации запасы не всегда соответствуют степени накопления органического вещества, в связи с несколько завышенными значениями запасов подгоризонтов подстилки из-за дополнительного приноса минеральных частиц [32]. Отношение суммы запасов подгоризонтов F и H к запасам подгоризонта L в приствольном, подкроновом и межкроновом пространстве контрольного участка составляет соответственно

6.0, 5.0 и 2.2, тогда как в аналогичных компонентах нарушенного участка — 1.1, 1.1 и 0.6. Таким образом, полученные результаты еще раз подтверждают снижение накопления органического вещества наземным детритом при рекреационном воздействии, что происходит главным образом за счет упрощения строения лесных подстилок.

Методом главных компонент проведен анализ долевого участия различных фракций подстилки, характеризующих ее состояние на ненарушенных и нарушенных участках в периоды до и после листопада: фракции листьев, хвои, детрита и пассивной фракции (шишки, кора, ветки, плоды). Анализ проведен отдельно для разных компонентов тессер — приствольных пространств, подкроновых пространств и окон.

Из табл. 7 видно, что первая компонента (фактор 1) наиболее сильно коррелирует с запасами детрита, а также хвои в подгоризонте L, причем для всех компонентов тессеры — именно эти показатели, таким образом, вносят наибольший вклад в различие фракционного состава подгоризонта L для изученных подстилок. Вторая компонента коррелирует с таким показателем, как запасы фракции листьев в подгоризонте L.

На проекции точек отбора на факторную плоскость (рис. 3) отображается четкое разделение на подстилки нарушенного и контрольного листов-

Таблица 7. Результаты анализа данных методом главных компонент. Факторные координаты переменных на основе корреляций

Фракция	Фактор 1	Фактор 2
Приствольные пространства		
Листья	0.100588	–0.814472
Хвоя	0.956829	–0.116304
Пассивная фракция	0.349567	0.676730
Детрит	0.976771	–0.044385
Подкроновые пространства		
Листья	0.164810	–0.945711
Хвоя	0.940220	–0.213011
Пассивная фракция	0.596827	0.746655
Детрит	0.979450	–0.091357
Межкроновые пространства		
Листья	0.094669	–0.956139
Хвоя	0.926818	–0.281436
Пассивная фракция	0.639629	0.711619
Детрит	0.981596	–0.105762

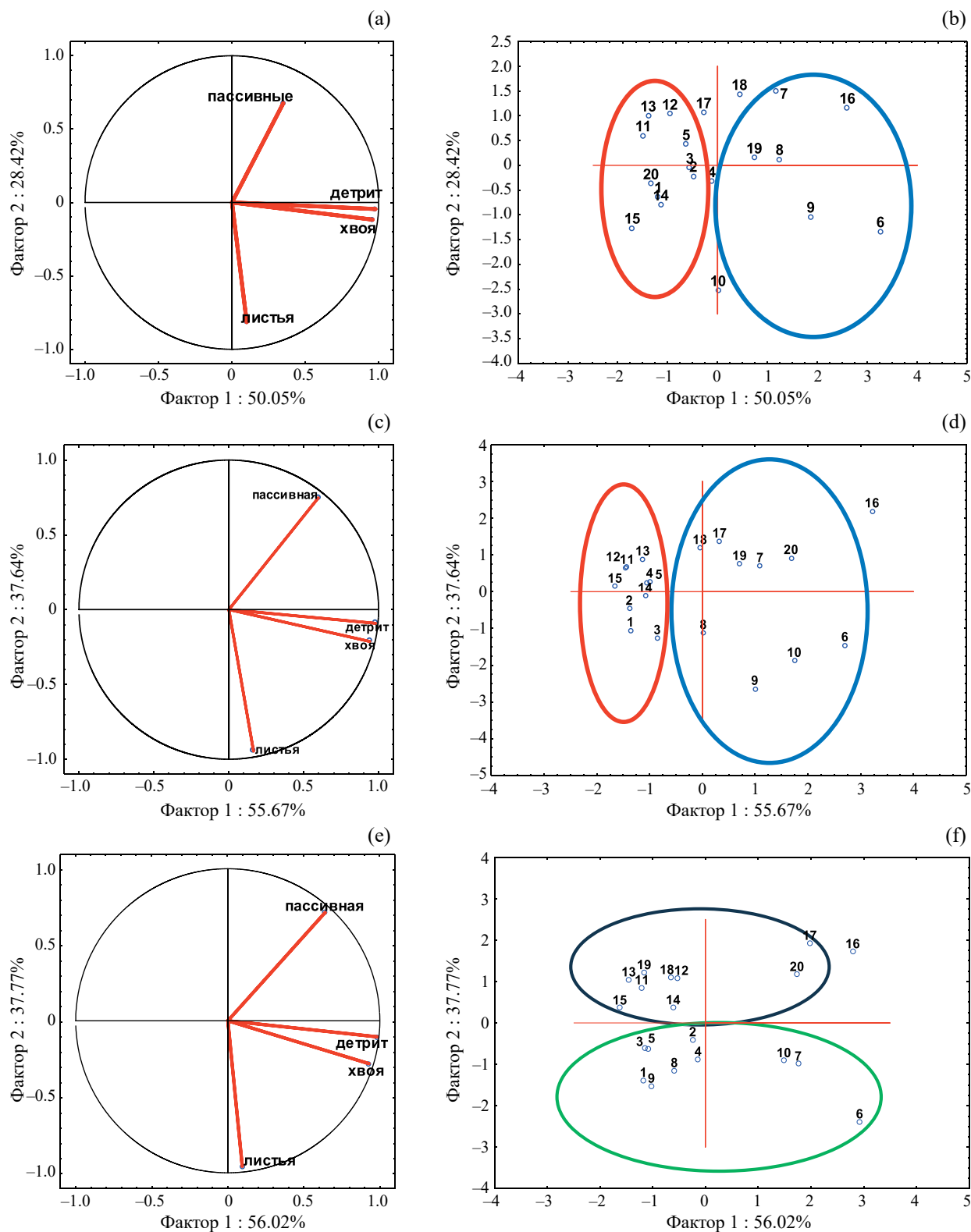


Рис. 3. Проекция выбранных переменных на плоскость двух главных компонент (а) – приствольные пространства, (с) – подкروновые пространства, (е) – окна. Проекция наблюдений (точек отбора) на факторную плоскость. (b) – приствольные пространства, (d) – подкроновые пространства, (f) – окна. 1–5 – контрольный лиственный, время отбора – ноябрь. 6–10 – нарушенный лиственный, время отбора – ноябрь. 11–15 – контрольный лиственный, время отбора – сентябрь. 16–20 – нарушенный лиственный, время отбора – сентябрь. Красным выделены точки отбора на контрольном участке, синим – на нарушенном, зеленым – в ноябре, черным – в сентябре.

ничника применительно к приствольным и подкroновым пространствам, особенно к последним. Для межкroновых пространств ось, соответствующая фактору 2 (в данном случае это запас фракции листьев), делит точки отбора на две группы: отобранные в сентябре и ноябре, при этом четкого разделения на нарушенные и контрольные участки не наблюдается. Таким образом, различия между контролем и рекреационным лиственничником применительно к фракционному составу подгоризонта L обусловлены запасами хвои и детрита, тогда как сезонные различия — запасом фракции листьев.

В рамках изучения общего процесса деструкции весь пул органического вещества подстилок может быть разделен на ближайший резерв — активная фракция (хвоя и листья), потенциальный резерв — пассивная фракция и промежуточный резерв — фракция детрита, накапливающая в течение неопределенного времени материал, уже вовлеченный в процессы активной деструкции. Показатели, характеризующие структурно-функциональную организацию подстилок, информативны для оценки динамики органического вещества подстилок, биологического круговорота и антропогенного рекреационного воздействия в городских древесных насаждениях. В течение года в рекреационном лиственничнике по сравнению с контролем реализуемые запасы активной фракции в 4 раза больше. Однако доля реализуемого органического вещества по отношению к его запасам практически одинакова для исследуемых лиственничников и достаточно велика (до 70%), что свидетельствует о высокой скорости биологического круговорота в годовом цикле и сходстве интенсивности разложения органического вещества. Результаты анализа показателей долговременного цикла функционирования указывают на повышенную интенсивность биологического круговорота в рекреационных насаждениях.

Для изученных лиственничников за зимне-весенний период отмечается снижение запасов хвои и увеличение запасов детрита, а в осенний срок наблюдается обратная тенденция, что подтверждается установленной корреляционной связью между запасами этих фракций. В летний период динамика свойств подстилки контрольного и нарушенного участков различается. На контрольном участке отмечается снижение запасов всех фракций. На нарушенном участке в приствольных и подкroновых зонах установлено значительное повышение запасов хвои, а также фракции детрита, как результат механического размельчения. Скорость преобразования органического вещества подстилок увеличивается, что сказывается на интенсивности биологического круговорота в условиях рекреации. Результаты исследования показали, что характер и интенсивность изменения свойств подстилок могут существенно различаться и в значительной

мере определяются сроками циклов функционирования подстилок. Предложенная система показателей структурно-функциональной организации подстилок может быть использована независимо от типа леса и особенностей типологии подстилок в целях изучения закономерностей их генезиса и эволюции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В городских лиственничных насаждениях встречаются три типа подстилок: гумифицированная, ферментативная, деструктивная. Пространственное распределение типов подстилок, а также их мощности и запаса детерминировано деревом-эдикатором — в пределах тессер мощность различается в 2–3 раза, запасы — в 1.5–2 раз. Рекреационная нагрузка ведет к упрощению строения подстилок, а также нивелированию различий мощности и запасов в разных компонентах тессер. Сезонная динамика запасов отдельных фракций подгоризонта L в течение года, а также различия этих показателей в системе ствол—крона—окно выражены в меньшей степени, нежели различия каждого показателя между контрольным и рекреационным лиственничником. Для подстилок изученных насаждений установлена идентичность закономерностей краткосрочной и годовой динамики. Различия между контролем и нарушенным участком проявляются в сезонном и долгосрочном функционировании и свидетельствуют о повышенной скорости биологического круговорота в нарушенном лиственничнике. Антропогенное рекреационное воздействие приводит к увеличению пространственной и временной изменчивости свойств подстилок, а также повышению запасов фракции хвои и детрита в подгоризонте L, что может быть связано соответственно с более активным опадом хвои ослабленных в условиях рекреации деревьев и ее механическим дроблением до фракции детрита. Механическое измельчение активной фракции выступает в качестве антропогенного фактора, ускоряющего биологический круговорот органического вещества. Анализ полученных данных методом главных компонент показал, что ведущим показателем, связанным с антропогенным воздействием, является запас хвои лиственницы и детрита в подгоризонте L подстилки (проявляется в большей степени для приствольных и подкroновых пространств), а с сезонной динамикой — запас фракции листьев (проявляется для межкroновых пространств). Перечисленные фракции характеризуются выраженными индикаторными свойствами, которые определяются высокой чувствительностью к изменению условий функционирования. Полученные результаты могут быть полезны для инвентаризации степени нарушения подстилок и соответственно почвы в городских насаждениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800321-4 “Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах”), а также в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
2. Богданов В.В., Прокушкин С.Г. Влияние экспозиции склонов на послепожарную трансформацию органического вещества в лиственничниках криолитозоны Средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2015. № 5. С. 3–7.
3. Брянин С.В., Абрамова Е.Р. Опад фитомассы в постпирогенных лиственничниках Зейского заповедника (верхнее Приамурье) // Сибирский лесной журнал. 2017. № 2. С. 93–101.
4. Ведрова Э.Ф. Трансформация растительных остатков в 25-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 1995. № 4. С. 13–21.
5. Ведрова Э.Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.
6. Ведрова Э.Ф., Решетникова Т.В. Масса подстилки и интенсивность ее разложения в 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
7. Ведрова Э.Ф., Мухоморова Л.В., Метелева М.К. Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах // Лесоведение. 2018. № 1. С. 24–36.
8. Волков С.Н., Коршунов П.С., Тугеев Б.Р. и др. Особенности природно-исторического парка “Измайлово” // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2017. № 3. С. 59–64.
9. Волокитина А.В., Софронов М.А. Пространственное варьирование вида и запаса мохово-лишайникового покрова и подстилки в северных лиственничниках // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. XXV. № 3–4. С. 209–215.
10. Домрачева З.Н. Масса подстилки и диаметр стволов в сосняке брусничном // Инженерные кадры-будущее инновационной экономики России. 2019. № 2. С. 30–33.
11. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Строе и пространственно-временная изменчивость накопления подстилки в болотных березняках Западной Сибири // Вестник Томского гос. ун-та. Сер. Биология. 2009. № 2. С. 84–94.
12. Иванов А. В., Черненко В. Е., Хабилов В. Ш. Динамика запасов лесных подстилок в кедрово-широколиственных лесах // Аграрный вестник Приморья. 2017. № 1. С. 47–48.
13. Казанская Н.С., Ланина В.В., Марфенин Н.Н. Рекреационные леса. М.: Лесная промышленность, 1977. 96 с.
14. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
15. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность, 1981. 264 с.
16. Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Ташнинова Л.Н., Руденко Р.Н., Почвенный покров и парцеллярная структура биогеоценоза // Лесоведение. 2007. № 6. С. 107–113.
17. Классификация и диагностика почв России. М.: Ойкумена, 2004. 342 с.
18. Климат, погода, экология Москвы // Под ред. Клинова Ф.Я. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 437 с.
19. Кузнецов В.А., Рыжова И.М., Телеснина В.М., Стома Г.В. Количественная оценка влияния рекреации на растительность, подстилку и плотность почв лесопарков Москвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2015. № 1. С. 21–29.
20. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Ведрова Э.Ф., Анискина А.А., Мухоморова Л.В. Гигроскопические свойства подстилки хвойных и лиственных насаждений Средней Сибири // Сибирский экологический журнал. 2013. Т. 20. С. 695–702.
21. Наумов В. Д., Поветкина Н. Л., Лебедев А. В., Гемонов А.В. Оценка гумусового состояния дерново-подзолистых почв Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. № 4. С. 5–18.
22. Орлова М.А., Лукина Н.В., Камаев И.О., Смирнов В.Э., Кравченко Т.В. и др. Мозаичность лесных биогеоценозов и продуктивность почв // Лесоведение. 2011. № 6. С. 39–48.
23. Попова Н. В. Методы использования данных по скорости освобождения химических элементов из подстилки для диагностики устойчивости

- экосистем // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2007. № 1. С. 19–26.
24. Прокушкин С.Г., Прокушкин Н.Д., Сорокин Н.Д. Интенсивность разложения отдельных компонентов фитодетрита в листовенничниках криолитозоны средней Сибири // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2014. № 1. С. 76–85.
 25. Прокушкин С.Г., Петренко А.Е., Зырянова О.А. Запасы фитодетрита и его биогенных элементов в листовенничниках малого водосборного бассейна центральной Эвенкии // Сибирский лесной журнал. 2022. № 6. С. 34–44.
 26. Решетникова Т.В., Зырянова А.А., Ведрова Э.Ф. Трансформация органического вещества лесной подстилки (экспериментальное исследование) // Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та. 2014. № 6. С. 80–93.
 27. Рыбакова Н.А. Влияние парцеллярной структуры южнотаежных березняков на пространственную неоднородность лесной подстилки // Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 1 (33). С. 26–35.
 28. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Семенюк О.В. Оценка запасов углерода и потенциала продуцирования CO₂ почвами хвойно-широколиственных лесов // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1143–1154. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600713>
 29. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И. Использование особенностей структурно-функциональной организации подстилок для оценки интенсивности круговорота в городских насаждениях (на примере Москвы) // Почвоведение. 2021. № 5. С. 592–605. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050178>
 30. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. и др. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
 31. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Земсков Ф.И. Подстилки городских насаждений как индикатор интенсивности биологического круговорота в условиях мегаполиса // Почвоведение. 2022. № 6. С. 1–14. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060119>
 32. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Баранова О.Ю. Роль зеленых насаждений в адаптации урбоэкосистем к изменениям климата // Лесоведение. 2023. № 4. С. 339–352. <https://doi.org/10.31857/S0024114823040083>
 33. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И. Подстилки еловых насаждений в пределах мегаполиса как объект экологического мониторинга // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2023. № 1. С. 36–45. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-36-45>
 34. Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
 35. Шихова Л.Н., Лисицын Е.М. Динамика запасов органического вещества лесной подстилки южно-таежного биогеоценоза // Вестник Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 24–30.
 36. Шугалей Л.С., Коваленко О.В. Формирование подстилки в лесных экосистемах заповедника “Столбы” // Вестник Красноярского гос/ аграрного ун-та. 2009. № 6. С. 3–9.
 37. Chengfeng S., Mingwei W., Lixue Y. Microbial carbon and nitrogen limitation in *Larix gmelinii* forests along an altitudinal gradient: Evidence from coenzymatic stoichiometry and vector analysis // Appl. Soil Ecol. 2024. V. 195. P. 105–257. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105257>
 38. Johansson M.B. Decomposition rates of Scots pine needle litter related to site properties litter quality and climate // Department of Forest Soils. 1994. P. 1771–1781. <https://doi.org/10.1139/x94-229>
 39. Lingbo D., Xueying L., Zhaogang L. The contributions of stand characteristics on carbon sequestration potential are triple that of climate variables for *Larix spp. Plantations* in northeast China // Sci. Total Environ. 2024. V. 911. P. 168726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168726>
 40. Lun F., Liu Y., Li W. Life cycle research on the carbon budget of the *Larix principis-rupprechtii* plantation forest ecosystem in North China // J. Cleaner Production. 2018. V. 177. P. 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.126>
 41. <http://mosstat.gks.ru/folder/64495>

Assessment of the Organic Matter Dynamics in the Litter of Urban Coniferous Woods Using Indicators of Their Structural and Functional Organization on the Example of the Moscow City

O. V. Semenyuk¹, V. M. Telesnina^{1, *}, L. G. Bogatyrev¹, V. A. Kuznetsov¹, and A. I. Benediktova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: vtelesnina@mail.ru*

The properties of forest litter of artificial plantations of European larch within the specially protected natural area “Izmailovsky park” in Moscow were studied. The objects of the study were two sites of larch plantations 100–120 years old on typical sandy loam sod-eluvzems on sandy deposits underlain by moraine (Leptic Cambisols). One of the sites was a control, and the other was subject to anthropogenic impacts typical of park areas as a result of recreation. A significant two-fold decrease in the thickness and reserves of litter during recreation was established, with a significant simplification of the structure and changes in the typology of litter, which is especially pronounced in the conditions of near-trunk zones. A grouping of indicators of the structure and functioning of litter was proposed, which made it possible to assess the phased transformation of organic matter corresponding to different time periods of litter functioning. In seasonal dynamics, a uniform decrease in reserves of litter during the year was revealed for control plantations, while the most significant decrease in reserves in the November–June period was noted for disturbed ones. In the annual cycle, a significant decrease in the reserves of the active fraction was established, which indicates an intensive biological cycle in the studied larch woods. Differences in the dynamics of stocks of litter fractions were revealed. Recreational load in larch woods determines the decrease in the carbon sequestration of litter organic matter and affects the dynamics of this process. Indicators of the structural and functional organization of larch woods are informative criteria characterizing the features of biogeochemical cycles of organic matter, and can be used in other types of plantings in a megapolis.

Keywords: urban ecosystems, terrestrial detritus, recreational impact, larch, biological cycle