

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

*На правах рукописи*

ЗЕМСКОВ Филипп Иванович

**ДЕТРИТОГЕНЕЗ  
В УСЛОВИЯХ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ  
УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность 03.02.13 — «Почвоведение»

**Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата биологических наук**

Научный руководитель:  
кандидат биологических наук, доцент  
**Богатырев Лев Георгиевич**

Москва — 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК ТЕРМИНОВ, ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>4</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ДЕТРИТОГЕНЕЗА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ).....</b>	<b>14</b>
1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ, БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ .....	14
1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА .....	17
1.3. ЛЕСНАЯ ПОДСТИЛКА КАК ПРИРОДНОЕ ТЕЛО И КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	20
1.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ .....	29
1.4.1. Принципиальные основы изучения процессов разложения.....	30
1.4.2. Примеры исследований разложения стандартизированных образцов различных материалов .....	37
1.4.3. Представление и интерпретация данных .....	42
1.4.4. Лабораторные опыты по разложению детрита.....	43
1.4.5. Выводы о подходах к организации исследований разложения.....	44
1.5. ОСОБЕННОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ И ДЕТРИТОГЕНЕЗА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ .....	45
<b>ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>49</b>
2.1. ГОРОДСКИЕ ТЕРРИТОРИИ В ЗОНЕ СМЕШАННЫХ ЛЕСОВ, МОСКВА.....	53
2.1.1. Лизиметры почвенного стационара МГУ.....	54
2.1.2. Ботанический сад МГУ .....	61
2.2. ЗОНА СМЕШАННЫХ ЛЕСОВ, УОПЭЦ МГУ «Чашниково», МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ .....	71
2.3. ОБЪЕКТЫ ЗОНАЛЬНОГО РЯДА .....	73
2.3.1. Зона широколиственных лесов — лес Тульские Засеки, Тульская обл., с. п. Крапивенское	74
2.3.2. Зона лесостепей — Полибино, Липецкая область .....	76
2.3.3. Южная граница зоны лесостепей, Воронежская область.....	77
2.3.4. Зона сухих степей — сельское поселение Качалинское, Волгоградская область.....	81
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>83</b>
3.1. МЕТОДЫ ОТБОРА И УЧЁТА ОПАДА .....	83
3.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ. МЕТОД СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ.....	88
3.2.1. Основные принципы исследования.....	88
3.2.2. Показатели изменения массы разлагаемого материала .....	93
3.2.3. Термический анализ детрита (дериватография) .....	99

3.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛОК .....	99
3.4. ОБЩИЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	101
3.5. ОБЩИЕ МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	101
<b>ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ .....</b>	<b>103</b>
4.1. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОСТУПЛЕНИЕМ И СОСТАВОМ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА .....	104
4.1.1. <i>Опробование методов отбора и учёта опада .....</i>	<i>104</i>
4.1.2. <i>Поступление опада в фитоценозах лизиметров.....</i>	<i>111</i>
4.1.3. <i>Поступление опада в фитоценозах Ботанического сада .....</i>	<i>119</i>
4.1.4. <i>Сравнение поступления опада в схожих фитоценозах Ботанического сада и лизиметров...124</i>	<i>124</i>
4.1.5. <i>Оценка переноса опада .....</i>	<i>126</i>
4.2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ЗАПАСЫ ПОДСТИЛОК.....	133
4.2.1. <i>Подстилки Ботанического сада МГУ.....</i>	<i>135</i>
4.2.1.1. Структурно-функциональная организация и запасы подстилок (наблюдение 2017 года) 135	
4.2.1.2. Запасы подстилок по оценке 2019 года. Углерод и азот в подстилках .....	143
4.3. НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ГОРОДСКИХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ..	145
4.4. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ПО ОПАДУ И ПОДСТИЛКАМ С ЛИТЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ .....	149
4.5. ДИНАМИКА РАЗЛОЖЕНИЯ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ДЕТРИТА.....	153
4.5.1. <i>Особенности разложения древесины.....</i>	<i>154</i>
4.5.2. <i>Особенности разложения целлюлозы .....</i>	<i>160</i>
4.5.3. <i>Особенности разложения чая.....</i>	<i>167</i>
4.5.4. <i>Особенности разложения нативных материалов.....</i>	<i>172</i>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>186</b>
Выводы .....	189
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>191</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. ДИАГРАММЫ РАЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ</b>	
<b>СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ .....</b>	<b>212</b>

# СПИСОК ТЕРМИНОВ, ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ

**Детрит** — мёртвые органические остатки любой природы и размерности в наземных экосистемах (опад, подстилки, торф, гумус, перегной и т. п.).

**Фракции** опада или подстилок — структурно-функциональные компоненты, выделяемые из массы детрита по морфологической, функциональной и видовой принадлежности: листья, ветки, травы, несортируемый детрит, мелкозём и т. п. В том числе:

**Активные фракции (АФ)** — относительно легкоразлагаемые фракции опада или подстилок: листья, хвоя, семена, травы и т. п. (Карпачевский и др., 1980).

**Неактивные (или грубые) фракции** — относительно трудноразлагаемые фракции опада или подстилок: ветки, шишки и т. п.

**Сырая зола** опада и подстилок — зола, содержащая минеральные примеси (почвенный мелкозём), в отличие от *чистой* золы, содержащей только зольные элементы тканей организмов.

**Стандартизированные образцы** — готовые пробы стандартных, стандартизированных или нативных материалов, помещённые в мешочки из инертного материала, закладываемые в подстилку для исследования процессов их разложения (в общем случае могут не быть помещены в мешочки, и закладываться не в подстилку, а в почву).

**Стандартные материалы** — материалы стандартизированных образцов, не имеющие генетической связи с растительностью исследуемых объектов, и одинаковые на множестве опытных площадок.

**Стандартизированные материалы** — материалы стандартизированных образцов, генетически схожие с растительностью исследуемых объектов, и одинаковые на множестве опытных площадок (пример — сосновая хвоя из одного леса, закладываемая в нескольких сосновых лесах).

**Нативные материалы (НМ)** — материалы стандартизированных образцов, генетически происходящие от растительности исследуемых объектов, то есть, закладываемые в тех же биогеоценозах, где были отобраны.

**Обобщающие параметры разложения** — параметры, приводящие множество значений, полученных для одного разлагаемого материала, заложенного одновременно на одной опытной

площадке, к единственному значению, обобщающему меру изменения параметров (например, массы) в процессе разложения.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

**ОМ** — остаток массы материала в стандартизированном образце, %. В том числе:

$ОМ_T$  — остаток массы материала в стандартизированном образце (%) после  $T$  лет экспозиции;

$\overline{ОМ_T}$  — остаток массы материала в стандартизированных образцах (%) после  $T$  лет экспозиции — среднее значение по нескольким образцам, отобраным одновременно;

$ОМ_{мин}$  — минимальный зарегистрированный остаток массы материала стандартизированных образцов, % (для образцов чая).

**СР** — скорость разложения материала стандартизированных образцов,  $\% \cdot год^{-1}$  (формула 5).

**k** — константа разложения материала стандартизированных образцов,  $год^{-1}$  (формула 6).

**T** — общая продолжительность экспозиции стандартизированных образцов в на момент очередного наблюдения, *годы*. В том числе:

$T_0$  — момент начала экспозиции стандартизированных образцов ( $T = 0$ ), или дата начала экспозиции (напр. « $T_0$  — 16.07.2016»).

$T^{1/2}$  — период полуразложения стандартизированных образцов (*годы*), т. е. время, за которое образцы разлагаются до  $ОМ = 50\%$  (формулы 11 и 12). В том числе:

$T^{1/2}_{(экс.)}$  — период полуразложения, рассчитанный по результатам аппроксимации экспоненциальной функцией.

$T^{1/2}_{(лин.)}$  — период полуразложения, рассчитанный по результатам аппроксимации линейной функцией.

**ПОК** — подстильно-опадный коэффициент, *годы* — отношение запасов подстилки ( $г/м^2$ ) к поступлению опада ( $г/м^2 \cdot год$ ).

**Id** — интенсивность разложения подстилок, определяемая по соотношению запасов подстилок и поступления опада,  $\% \cdot год^{-1}$ .  $Id = 100/ПОК$ .

**n** — объём выборки — число значений, использованных для вычисления каждого представляемого значения (среднего,  $V$ ,  $\sigma$ ,  $R^2$  и др.) или построения аппроксимирующей функции. Если несколько выборок в таблице имеют одинаковый объём,  $n$  указывается один раз в заголовке столбца или строки и обозначает объём каждой из них. Если сравнивается несколько зависимых выборок, то  $n$  также обозначает объём каждой из них.

**N** — общее число наблюдений в описываемом опыте. Может включать несколько отдельных выборок разного объёма.

**$\sigma$**  — стандартное (среднеквадратическое) отклонение (в единицах измерения параметра).

$V$  — коэффициент вариации, %.

$R^2$  — коэффициент детерминации.

$\alpha$  — уровень значимости для статистических параметров. Используется  $\alpha = 0,05$ , если в тексте не указано иного.

$p$  — уровень значимости наблюдаемых различий или параметров.

$\Delta$  — доверительный интервал.  $\Delta = t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ .

## ПРОЧИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$\varnothing$  — диаметр.

пл. — площадь.

**ОУ** — опадоуловитель; **ОУ-16** — опадоуловитель диаметром 16 см; **ОУ-36** — опадоуловитель диаметром 36 см;

$\triangleq$  — равно по определению.

**БГЦ** — биогеоценоз.

**ФЦ** — фитоценоз.

**БС МГУ** — Ботанический сад МГУ (Ленинские горы).

*vs* — «против», «в сравнении с» (от лат. *versus* — «против»).

# ВВЕДЕНИЕ

## АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Термин *детритогенез*, предложенный М. А. Глазовской (1988), обозначает процесс накопления в ландшафтах *детрита* — мёртвого органического вещества, характеризующегося высоким содержанием недоокисленных соединений, и, по сути, может рассматриваться как сумма процессов поступления, трансформации и накопления детрита. Таким образом, к детритогенезу относится поступление растительного опада, его преобразование до простых соединений или до гумусовых веществ, поступающих в почву, и его минерализация с выделением углекислого газа в атмосферу. Последнее является одной из наиболее актуальных и широко обсуждаемых проблем современности, а выбросы углерода, обусловленные естественными процессами, достаточно существенны (Schlesinger, 1997; Prentice et al., 2001), и их объёмами не следует пренебрегать.

Публикуется множество работ, посвящённых тем или иным аспектам детритогенеза и методам их изучения. Например, число работ, посвящённых разложению органического вещества, выросло с 20 за пятилетний период в 1970-х гг. до 2000 публикаций за пять лет к 2009 г. (Prescott, 2010). Вместе с тем, исследования, посвящённые процессам поступления опада и его разложения, имеют довольно долгую историю — первые работы относятся к первой половине XX в. (например — Gustafson, 1943; Jenny et al., 1949). Есть и примеры более ранних работ, в которых уделяется внимание продуктивности лесов с точки зрения их оценки для хозяйственных нужд (Бедемар, 1850). При этом, исследования, сочетающие в едином комплексе оценку поступления опада и наблюдения за его разложением в виде образцов (Pinos et al., 2017), встречаются относительно редко.

В настоящее время имеется потребность в данных для составления моделей, описывающих изменения в процессах разложения детрита, для более полного понимания круговорота углерода и азота в изменяющемся климате (Portillo-Estrada et al., 2016; Jabiol et al., 2013), включая реакцию органического вещества, накопленного на поверхности почвы, на глобальное потепление (Egli et al., 2009; Paré et al., 2006; Ponge et al., 2011). По-видимому, скорость разложения детрита положительно коррелирует с годовым количеством осадков и с температурой (Zhang et al., 2008). При этом изменения климата, как ожидается, выразятся в повышении температуры и снижении увлажнения в южных странах, и в повышении и того, и другого — в северных (Jacob

et al., 2014), и исследования разложения детрита позволяют оценить в географическом аспекте особенности влияния местных климатических условий на эти процессы (Johansson et al., 1995). С этой точки зрения городские БГЦ могут служить хорошим примером для исследования отклика природных процессов на изменение температуры, влажности и других условий среды, имеющих антропогенную природу.

В методологическом отношении важно учитывать особенности детрита, связанные с его происхождением (Gallardo and Merino, 1993; Cornelissen, 1996), такие как химический состав и строение детрита. Разложение контролируется множеством факторов, как внешних, так и внутренних, и понимание их совокупного действия крайне важно для корректной интерпретации наблюдаемых различий в параметрах разложения материалов. Поэтому эксперименты, позволяющие оценить отклик динамики разложения различных материалов на различные параметры среды, представляются полезными для развития этого направления исследований.

Органический опад, прежде всего, растительный, является основным источником поступления питательных веществ в почву (Pedersen, Bille-Hansen, 1999), и в значительной мере определяет не только её свойства, но и многие биогеохимические процессы в экосистеме (Freschet et al., 2012). Растительный опад и лесные подстилки исследуют не только в контексте генезиса почв и круговорота углерода, но и с прикладными целями. Сведения о запасах опада и подстилок используются в оценке лесных насаждений (Смирнов, 1971); для этой же цели предлагается использовать типологию подстилок (Чертов, 1981). В некоторых регионах считается целесообразным (Jaramillo-Botero, 2014) внедрение системы агролесоводства — такой подход может способствовать восстановлению, и даже увеличению плодородия почвы (Mendonça, Stott, 2003), регулированию водного цикла (Giraldo, Jaramillo, 2004), закреплению углекислого газа и увеличению местного биоразнообразия (Perfecto et al., 2005). Важной функцией древесной растительности в системах агролесоводства является продуцирование лесной подстилки (Hairiah et al., 2006), защищающей почву от прямых солнечных лучей, способствующей сохранению влаги и поддержанию круговорота питательных веществ.

В настоящее время выходит множество работ, посвящённых формированию, классификации, загрязнению и другим особенностям почв, находящихся под воздействием антропогенных факторов. Однако, влияние городских условий на наземный детрит и на различные подпроцессы детритогенеза, по-прежнему, слабо освещено в научной литературе, или же эти вопросы имеют в работах лишь подчинённое значение, несмотря на то, что лесная подстилка выполняет ряд экологических функций (Добровольский, Никитин, 1990), в том числе, служит геохимическим барьером на пути следования поллютантов (Гришина, 1983; Прокушкин и др., 1983; Строганова и др., 1997; Попова, 2007-а), а также местообитанием множества организмов, поддерживая их биологическое разнообразие. Подстилка также определяет реализацию экологических

функций почвы, поскольку определяет состав и свойства последней, её богатство гумусовыми веществами, её сохранность и плодородие. Значительные площади поверхности почвы в городах запечатаны и захламлены, а остальные находятся под влиянием специфических антропогенных факторов, среди которых загрязнение атмосферной пылью и различными поллютантами, изменения температурного режима и увлажнения, прямое воздействие человека. Уменьшение площади многих городских биогеоценозов приводит к значительному повышению значения краевых эффектов: с одной стороны — к привносу загрязняющих веществ, а с другой — к безвозвратному выносу опада.

Таким образом, представляется весьма актуальным исследование процессов детритогенеза как в естественных, так и в городских экосистемах, и развитие соответствующих методов и теоретических положений.

## **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ**

**Цель:** изучить влияние городских условий на процессы поступления, трансформации и накопления детрита в модельных лесных биогеоценозах.

**Задачи:**

1. Изучить динамику и среднегодовые величины поступления опада, а также его структурный состав в модельных лесных биогеоценозах.
2. Оценить интенсивность переноса опада между исследуемыми городскими биогеоценозами и за их пределы.
3. Изучить типологию, запасы и структурный состав лесных подстилок в модельных городских биогеоценозах; оценить скорость круговорота органического вещества, а также углерода и азота в его составе.
4. Установить особенности разложения стандартных и нативных материалов в модельных городских биогеоценозах и в условиях лесных биогеоценозов зонального ряда.
5. Охарактеризовать общую специфику процессов детритогенеза в модельных биогеоценозах, находящихся под влиянием городских условий.

## **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

В развитие теории детритогенеза, определение этого термина было уточнено и расширено — определён перечень взаимосвязанных процессов и явлений, составляющих в экосистеме единый комплекс, за которым и предлагается закрепить термин «детритогенез».

Предложена и оценена вариация методики отбора и учёта растительного опада, позволяющая успешно вести режимные наблюдения за поступлением и переносом опада в модельных городских БГЦ небольшой площади, расположенных в тесном контакте друг с другом, из которых неприемлемо изымать для исследований большие количества материала. Получены по-

дробные фактические данные по поступлению опада и его компонентов (фракций), а также описан и количественно оценён перенос опада. Для оценки неравномерности годового поступления опада предложен *коэффициент контрастности* — отношение годового поступления опада к его поступлению в листопадный период.

Получены новые фактические данные по запасам, строению и составу лесных подстилок в модельных БГЦ урбанизированных территорий. Данные о запасах подстилок и о поступлении опада позволили оценить скорости биологического круговорота органического вещества, а также углерода и азота в его составе, и выявить особенности биологического круговорота в модельных городских БГЦ по сравнению с естественными сообществами.

Предложены и опробованы новые вариации методики стандартизированных образцов (the litter-bag technique), используемой для исследования процессов разложения в лесной подстилке или в почве, в том числе, впервые предложено использовать стандартизированную древесину для исследования процессов разложения в географическом аспекте. В ходе многолетних наблюдений выявлены некоторые закономерности разложения материалов в зависимости от климатических условий, запасов подстилок и типов лесной растительности. В частности, отмечено, что скорость разложения древесины в городских БГЦ имеет близкие величины, несмотря на принципиальные различия в флористическом составе фитоценозов и в строении подстилок, а также характеризуется меньшим варьированием по сравнению с фоновыми БГЦ. Получены детализированные данные по динамике разложения стандартных и нативных материалов в БГЦ урбанизированных и фоновых территорий, позволяющие охарактеризовать влияние климатических условий, в т. ч. условий городской среды на этот процесс.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ**

Предложенная вариация методики отбора опада, опробованная в условиях модельных городских БГЦ, может быть применена в различных исследованиях: для получения данных, используемых при моделировании круговорота углерода; для оценки состояния и продуктивности лесных насаждений с точки зрения хозяйственных нужд; для целей экологического мониторинга; для получения репрезентативных проб опада, которые, в свою очередь, могут быть использованы в исследованиях, связанных с его разложением, составом, или иными свойствами и параметрами. Аналогично, предложенные и описанные вариации методики исследования процессов разложения с помощью стандартизированных образцов могут быть использованы в различных исследованиях, посвящённых экологическому мониторингу, круговороту углерода, или различным особенностям разложения детрита.

В работе развивается представление о внутренних и внешних факторах, контролирующих разложение материалов: к внешним относятся параметры среды, а к внутренним — физические свойства и химический состав разлагаемых материалов. Показано, что влияние каждого из

внешних факторов на разложение материалов значительно различается в зависимости от состава и свойств этих материалов, то есть, от внутренних факторов разложения. Это обстоятельство важно учитывать, как при планировании исследований в зависимости от их целей, так и при интерпретации полученных данных, или при сравнении данных, полученных с использованием схожих между собой, но не идентичных материалов. Предлагается уточнённая типология стандартизированных образцов, используемых для исследования разложения, в зависимости от степени генетической связи разлагаемых материалов с растительностью исследуемых БГЦ.

Уточнённая классификация лесных подстилок как интегральная характеристика биологического круговорота может быть использована в классификации лесных земель и почв.

## ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе приводятся статистически обработанные данные; указывается уровень значимости наблюдаемых различий и рассчитанных параметров. Используемые методы исследований являются общепризнанными; новые модификации классических методов опробованы в ходе специальных наблюдений.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Предлагается рассматривать *детритогенез* как совокупность процессов **поступления** детрита на поверхность почвы, его переноса и перераспределения, и процессов **преобразования** детрита, от механического измельчения до гумификации и минерализации, баланс и особенности которых определяют **формирование детритопрофиля** и его дальнейшее развитие.
2. Уменьшение площади, занимаемой лесными городскими биогеоценозами, в сочетании с косвенной антропогенной нагрузкой, не приводит к существенному изменению интенсивности продукционных и деструкционных процессов при современных условиях функционирования биогеоценозов.
3. Мера влияния гидротермических условий на разложение материалов определяется их структурой и химическим составом — внутренними факторами разложения. Для материалов, различных по структуре и составу, разные внешние факторы разложения становятся ведущими. Влияние изменения любого внешнего фактора на разложение различающихся материалов не пропорционально, а в некоторых случаях — даже не однонаправленно.

## ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Фактические данные, приведённые в настоящей работе, получены автором лично, за исключением специально оговорённых случаев, когда наблюдения проводились коллективом исследователей при непосредственном участии автора. Личный вклад автора состоит в планировании опытов и наблюдений, в получении фактических данных в ходе полевых и лабораторных работ,

в обработке и интерпретации полученных результатов, в написании статей, подготовке докладов на конференциях, и в составлении текста диссертации.

В случае использования данных и результатов исследований, полученных не единолично и опубликованных в соавторстве, в сносках к заголовкам соответствующих разделов диссертации приводятся ссылки на совместные публикации, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ им. М. В. Ломоносова, отражены основные результаты, положения и выводы исследования; указывается личный вклад автора. Совместные публикации включены в общий список литературы.

## **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ**

По теме работы опубликовано 10 статей в журналах (из них 6 — из списка RSCI, 1 — из списка SCOPUS), 3 статьи в сборниках, 16 тезисов докладов.

Результаты исследований были доложены на следующих конференциях<sup>1</sup>:

- Международная научная конференция «Докучаевские молодёжные чтения» — СПбГУ, Санкт-Петербург, 2018, 2019, 2020;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», секция «Почвоведение» — Москва, МГУ, 2014, 2015, 2018;
- Первая открытая конференция молодых учёных «Почвоведение: горизонты будущего» — Москва, Почвенный институт имени В. В. Докучаева, 2017;
- VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Гуминовые вещества в биосфере», посвящённая 90-летию со дня рождения Дмитрия Сергеевича Орлова — Москва, МГУ, 2018;
- Всероссийская научная конференция «Научные основы устойчивого управления лесами» — Москва, ЦЭПЛ РАН, 2018.

Работа представлена на заседании кафедры общего почвоведения факультета почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова 02 декабря 2020 года.

## **ОБЪЁМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ**

Диссертация включает список терминов и обозначений, введение, четыре главы, заключение, выводы, список цитируемой литературы из 278 наименований (из них 86 на иностранных языках), и 1 приложение; изложена на 219 страницах (из них 211 с. — основной текст и список литературы, 8 с. — приложение), содержит 40 таблиц и 50 рисунков (из них 41 рисунок в основном тексте и 9 — в приложении).

---

<sup>1</sup> Включая работы, доложенные на конференциях соавторами. Тезисы и статьи в сборниках трудов конференций, по которым не делали устного доклада, в этот список не включены (см. список литературы).

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Л. Г. Богатыреву, а также заведующему кафедрой общего почвоведения М. И. Макарову — за помощь в выборе направления научной работы, за чуткое руководство и содействие на всех этапах проведения и оформления исследований.

Автор также благодарит за помощь научного, технического, или организационного характера: А. Н. Вартанова, А. Н. Демидову, Н. И. Жилина, Ю. А. Завгороднюю, И. А. Ильичева, М. И. Кондрашкину, М. В. Лукина, А. К. Макаренко, М. Н. Маслова, Г. В. Матышака, Н. Г. Прилепского, А. В. Раппопорта, И. С. Рыжикова, И. Е. Смирнову, А. С. Сорокина, В. М. Телеснину.

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ДЕТРИТОГЕНЕЗА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

## 1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ, БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ

В работах В. Р. Вильямса (1950) и И. А. Крупеникова (1979) сущность почвообразования рассматривается как синтез и разложение органического вещества. В связи с этим опад и подстилкам придаётся особое значение в почвообразовательных процессах. Не случайно один из выдающихся исследователей лесных почв Г. Ф. Морозов подчёркивал, что «*весь химизм лесных почв коренится главным образом в свойствах лесной подстилки и условиях её перегнивания*» (Морозов, 1926, с. 176). В развитие этого направления, классик почвоведения и геохимии почв М. А. Глазовская (1988) предложила фундаментальное понятие «детритогенез», обозначающее совокупность процессов поступления, преобразования и накопления в ландшафтах *детрита* — мёртвого органического вещества, включая лесные подстилки, опад, торфа, сухостой, валежник и тому подобное. Рассмотрим более подробно основные понятия, используемые в рамках теории детритогенеза, и особенности их толкования.

### 1.1.1. ДЕТРИТ — ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИНА И ЕГО УПОТРЕБЛЕНИЕ

Термин «детрит» (от лат. *detritus* — «истёртый») используется в литературе, посвящённой почвоведению и смежным дисциплинам, однако авторы, как правило, не дают его точного определения, и его значение может существенно варьировать в зависимости от контекста. Изначально термин *detrit* использовался в геологической литературе для обозначения органогенного материала в осадках или в осадочных породах, образующегося в результате истирания горных пород (Горная энциклопедия, 1984—1991) и позднее нашёл применение в исследованиях, связанных с органическим веществом, обозначая, аналогично, фракцию измельчённых органических остатков, не поддающихся сортировке и идентификации. Нередко такое понимание термина «детрит» (применительно к органическому материалу) используется и в современных работах. В биологии этот термин означает *мёртвое органическое вещество, временно исключённое из биологического круговорота элементов* (Биол. энциклопедич. словарь, 1986, с. 175); детритом также называют взвешенные в воде органоминеральные частицы (Экологический словарь,

1983). Однако в контексте исследования органического вещества в наземных БГЦ этот термин не является вполне устоявшимся в каком-либо единственном значении.

М. А. Глазовская (1988) придаёт этому термину более широкий диапазон значений. Согласно её определению, детрит представляет собой *неразложившиеся и полуразложившиеся остатки растений и животных*, характеризующиеся высоким содержанием недоокисленных соединений, и, включает растительный опад, сухостой, валежник, лесные подстилки, степной войлок, торф, сапропель и гумус. В данном понимании термин «детрит» представляет собой наиболее общую категорию, объединяющую любые виды мёртвого органического вещества, которые можно встретить в биогеоценозах, и может применяться в тех случаях, когда использование терминов «опад», «отпад», «подстилка» и прочих оказывается не вполне корректным.

В англоязычной литературе по схожим направлениям исследований, как правило, используется термин «litter», который означает, в целом, то же самое, что термин «детрит» в определении М. А. Глазовской, если приводится без каких-либо уточнений. Лесная подстилка именуется «forest litter» или «forest floor», причём последний термин более уместен, если речь идёт о лесной подстилке как о компоненте биогеоценоза, в то время как «forest litter» может обозначать детрит на поверхности почвы не как некое природное тело, а как массу органического материала (опада), безотносительно строения и свойств, которыми он характеризуется. Слово «detritus» в англоязычной литературе обозначает измельчённые фракции, не поддающиеся сортировке, хотя иногда может сближаться по значению с термином «litter».

В настоящей работе термин «детрит» используется в широком значении М. А. Глазовской. Мелкая его фракция называется *мелким* или *несортируемым* детритом.

Совокупность всех форм детрита в биогеоценозе образует *детритофиль*. Понятие «детритофиль», таким образом, обобщает лесные подстилки, степной войлок, торфянистые образования и т. п.; соотношение этих понятий будет подробнее обсуждено далее (см. с. 21).

### **1.1.2. ДЕТРИТОГЕНЕЗ — ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИНА И СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕССА**

Термин «детритогенез» предложен М. А. Глазовской (1988), и обозначает процесс накопления детрита в ландшафтах. Однако количество и состояние детрита, наблюдаемое в том или ином биогеоценозе, является следствием не только накопления, а целого комплекса процессов, а именно, формирования детрита как такового, его поступления в виде опада, перераспределения опада по поверхности почвы, процессов преобразования детрита вплоть до его минерализации или трансформации в органическое вещество почвы. Совокупность протекающих одновременно или чередующихся процессов накопления нового детрита и расхода детрита, сформированного ранее, составляет некий баланс, и приводит к общему накоплению или расходу детрита в

биогеоценозе, и к формированию детритопрофиля. Эти процессы весьма динамичны, и указанный баланс может менять знак (с накопления на расход и обратно) в течение года, а также и в более долговременной перспективе — в течение нескольких лет. Поскольку едва ли можно встретить биогеоценоз, где имеет место только накопление детрита без его расхода, хотя бы и минимального, под детритогенезом следует понимать не только общее накопление детрита, но, скорее, совокупность всех процессов, обусловивших его состояние на момент наблюдения. Таким образом, складывается следующее определение:

**Детритогенез** есть совокупность процессов (1) поступления детрита на поверхность почвы, включая его перенос и перераспределение, и (2) преобразования детрита, от механического измельчения — до гумификации и минерализации, баланс и особенности которых определяют (3) формирование детритопрофиля и его дальнейшее развитие.

Указанные три аспекта детритогенеза исследуют соответствующими методами, в зависимости от целей, задач и возможностей — все в комплексе, или некоторые в отдельности. Можно выделить три исторически сложившихся направления исследований, соответствующих трём указанным аспектам детритогенеза: (1) наблюдения за поступлением и составом растительного опада; (2) исследования, посвящённые разложению детрита; (3) исследования, посвящённые строению, запасам и составу лесных подстилок (детритопрофилей) представляющих собой результат совокупного действия подпроцессов детритогенеза.

Детритогенез включает процессы закрепления-высвобождения углерода, связанные с изменением состава атмосферы, и, как следствие — климата. Детритогенез является важным звеном, или этапом биологического круговорота, в значительной степени определяя химический состав почвы, её гумусное состояние, а, следовательно, и плодородие. Таким образом, исследования, связанные с детритогенезом, могут иметь существенное значение для многих областей знания. К настоящему времени накоплен значительный объём знаний и опыта изучения детритогенеза, однако чаще всего внимание авторов сосредоточено на какой-то одной его составляющей. Работы, охватывающие две, или, тем более, три из них, встречаются значительно реже. В то же время, комплексное исследование лесной подстилки должно включать и наблюдения за опадом, и наблюдения за разложением, для наиболее полного понимания процессов её формирования и развития (Земсков и др., 2018-а).

## 1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА

Исследования поступления растительного опада проводятся с разными целями: для оценки продуктивности лесов; для оценки величин поступления опада и его компонентов на поверхность почвы; для оценки лесов с точки зрения хозяйственного использования; на предмет загрязнения биогеоценозов, например, при исследовании динамики радионуклидов. Кроме того, в некоторых исследованиях отобранный в ходе исследований опад используют для создания образцов, на примере которых исследуют разложение (Portillo-Estrada, 2016).

В зависимости от задач и методов исследования определение «опада» несколько варьирует. В. В. Смирнов, в рамках исследования органической массы лесных БГЦ, проведённого с точки зрения нужд народного хозяйства СССР (Смирнов, 1971), рассматривает в качестве опада *«всё отмершее органическое вещество, поступающее на почву (кора, ветви, хвоя, листья, шишки, почечные чешуи, цветки, части травяного и кустарничкового покрова и др.)»* (Смирнов, 1971, с. 14). При этом, в проведённых автором исследованиях травяной, кустарничковый и моховой покровы учитывали отдельно и в собственно опад не включали.

Данные о поступлении опада позволяют оценить скорость биологического круговорота, показателями которой являются подстильно-опадный коэффициент по Л. Е. Родину и Н. И. Базилевич (1964) и скорость круговорота (turnover rate) по Jenny et al. (1949).

Кроме того, эти данные требуются при создании моделей поведения углерода (Shreve, 1951; Matthews, 1997), для отбора листового материала с целью определения индекса листовой поверхности (leaf area index — LAI) (Chen, Black, 1992), который, в свою очередь, используется в различных моделях (Eriksson et al., 2005). Индекс листовой поверхности служит мерой фотосинтезирующей биомассы и равен площади освещённых листьев, приходящийся на единицу площади поверхности почвы (Снакин, 2000). Поскольку поступление листового опада близко к биомассе листы, оно используется в качестве показателя чистой первичной продукции (index of net primary productivity), которая может быть вычислена из поступления опада путём умножения на определённые коэффициенты, специфичные для разных типов леса (Bray, Gorham, 1964). Полезная информация может быть также получена при исследовании компонентного и химического состава опада, которые определяют скорость и производные продукты его разложения.

В настоящей работе уделено особое внимание переносу опада. В экологическом отношении перенос опада рассматривается как явление, наиболее выраженное в городских фитоценозах. В методическом отношении обращает на себя внимание разница между количеством опада, достигающего поверхности почвы, и количеством опада, который остаётся на том же участке после перераспределения ветром, и затем включается в биологический круговорот.

Как будет показано далее, эти параметры могут существенно отличаться, хотя на практике их, как правило, не различают; более того, авторы особо указывают, что опад, накапливающийся в опадоуловителях, не должен выдуваться.

### 1.2.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОТБОРУ И УЧЁТУ ОПАДА

Для исследования поступления опада в лесных ФЦ обычно используются стационарные опадоуловители. В травяных сообществах корректная оценка поступления даже надземного опада представляет собой весьма сложную задачу, и при этом существенная, а часто — бóльшая часть опада производится подземными органами растений. В лесных сообществах опад, сформировавшийся ниже верхнего края ОУ, как правило, не учитывается.

Считается (Bray, Gorham, 1964), что величины поступления опада, определяемые с помощью ОУ с бортами, близки к величинам *продукции* опада, хотя, конечно, это касается только той его части, которая формируется выше верхнего края ОУ. Авторы особо отмечают, что конструкция ОУ должна минимизировать возможность выдувания опада (Newbould, 1967; Базилевич и др., 1978, стр. 75). Интересно, однако, что определённые именно этим способом величины обычно используют для расчёта подстильно-опадного коэффициента — показателя скорости круговорота органического вещества, в то время как часть опада может выноситься, или, наоборот, приноситься ветром по поверхности почвы, в результате чего при оценке скорости круговорота останется неопределённость в том, в какой мере расход вещества обусловлен его разложением, а в какой — выдуванием, или, наоборот, скомпенсирован ветровым привносом.

В литературе описаны различные модификации опадоуловителей. Одним из первых методик описывает М. И. Сахаров (1939). Его опадоуловитель представляет собой деревянный ящик площадью 1 м<sup>2</sup>. В каждом ФЦ устанавливается по десять ОУ. Отбор накопившегося в них опада осуществляется в разные временные интервалы, обусловленные естественными стадиями функционирования ФЦ. Дальнейшая работа с полученными образцами опада включает их фракционирование, определение массы каждой фракции и общей массы каждого образца. Схожих подходов придерживались многие исследователи (Garkoti, 2014; Gautam, 2016 и др.).

В руководстве № 2 Международной биологической программы (Newbould, 1967) рассматривается несколько вариантов ОУ диаметром 40—50 см (пл. 0,13—0,20 м<sup>2</sup>), сделанных из инертных материалов. Дается заключение, что окончательный выбор конструкции ОУ зависит от местных условий, но важно, чтобы опад свободно попадал в ОУ, не выдувался из него, не загрязнялся минеральными частицами с поверхности почвы, и не разлагался слишком интенсивно в период накопления. На одной пробной площадке следует устанавливать не менее 20 опадоуловителей — это может давать приемлемо низкую стандартную ошибку для общего опада, или для общего опада без веток, или для листьев доминирующего вида.

Н. И. Базилевич, Л. Е. Родин и соавторы предлагают несколько вариантов конструкции ОУ, обращая внимание на ограничение выдувания опада, на обеспечение свободного стока воды, который, тем не менее, не должен обуславливать потери опада через предназначенные для этого отверстия, а также на инертность используемых материалов, для обеспечения которой опадоуловители, при необходимости, рекомендуется покрывать краской. Авторы отмечают, что достаточная точность исследования достигается при установке 10 опадоуловителей площадью по 1 м<sup>2</sup> в каждом исследуемом древостое — вероятность ошибки не превышает 7,1 % (Родин и др., 1968; Базилевич и др., 1978, стр. 75). Выщелачивание компонентов из растительного опада накапливающегося в ОУ, также является предметом исследования некоторых авторов (Corrigan, Oelbermann, 2013).

В обобщённом виде эти рекомендации приводятся в Руководстве по комплексному мониторингу (2013, с. 97—98), которое рекомендует использовать по 6—12 ОУ площадью 0,25—0,50 м<sup>2</sup>. Чтобы предотвратить выдувание опада, ОУ должны иметь глубину ~ 50 см; чтобы предотвратить разложение опада они не должны касаться земли, а отбор опада рекомендуется проводить хотя бы ежемесячно.

Специфические условия требуют соответствующей модификации опадоуловителей. Так, для отбора опада низкорослых кустарников, полукустарников и эфемероидов в гетерогенных пустынных экосистемах низкие ОУ  $\varnothing$  10 и 18 см (пл. 0,008 и 0,025 м<sup>2</sup> соответственно) оказываются более эффективными, и отбирают значительно больше опада, чем высокие опадоуловители  $\varnothing$  50 см (пл. 0,20 м<sup>2</sup>), рекомендованные IBP для лесов (Búrques et al., 1999).

Круглые ОУ диаметром около 50 см используются во множестве работ. Eriksson et al. используют этот метод для оценки индекса листовой поверхности (leaf area index, LAI) (Eriksson et al., 2005), и заключают, что такой метод отбора является наиболее пригодным для этой цели, а полученные с его помощью данные рассматривают в качестве истинных значений, в противоположность значениям, полученным другими методами.

Можно также встретить описание ОУ, выполненных в виде плетёных бамбуковых корзин диаметром 1 м (0,785 м<sup>2</sup>) и глубиной 10 см (Jijeesh, 2016), применяемых для изучения поступления опада в бамбуковых фитоценозах. Для изучения объёма продукции опада одним деревом М. М. Sampanha et al. (2004) используют полимерную сетку, помещённую на поверхность почвы. Одна из модификаций этого метода была с успехом применена С. Jaramillo-Botero (2008).

Л. О. Карпачевский и Н. К. Киселева уделяют внимание парцеллярной контрастности древостоев и утверждают, что точность учёта опада может быть увеличена, если отбирать опад по парцеллам, разбивая их на три зоны (Карпачевский, Киселева, 1968).

### 1.3. ЛЕСНАЯ ПОДСТИЛКА КАК ПРИРОДНОЕ ТЕЛО И КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее активным компонентом лесного биогеоценоза является лесная подстилка, в которой под воздействием наиболее деятельной и многочисленной части почвенной биоты происходит преобразование растительного и животного материала в растворимые и нерастворимые субстанции, которые затем определяют состав и строение почвы и особенности биологического круговорота.

Лесным подстилкам, вопросам их классификации и диагностики, а также связанной с ними терминологии, придаётся исключительно большое значение (Богатырев, Земсков и др., 2018). Об этом также свидетельствует проведение всесоюзных совещаний «Роль подстилки в лесных биогеоценозах», посвящённых таким вопросам как строение подстилок и их классификация (Богатырев, Флесс, 1983), особенности их формирования, в том числе — в специфических условиях (Селиванова, 1982), биогеохимическая роль (Костенкова, 1983), а также жизнедеятельность биоты, населяющей подстилки (Бабенко, 1984). В последнее время в контексте экологии и биологического круговорота всё более закрепляется понимание лесной подстилки как центрального элемента экосистем (Попова, 2018).

А. П. Сапожников (1984) указывает на отсутствие единого понимания сущности подстилки, следствием чего являются неопределённые толкования, подмена понятий, и неопределённый статус подстилки в структуре биогеоценоза. Так, в классическом учебнике Ф. Дюшофура, в котором автор развивает учение о типах гумуса (мюллер, модер, мор и т. п.) (Дюшофур, 1970, с. 152), упоминается, что в системе органогенных слоёв L—F—H горизонта  $A_0$  подстилкой является слой L (*там же*, с. 152; 164; 166). Подстилка рассматривается, скорее, как масса материала, а не как естественно-историческое тело или компонент биогеоценоза. В учебных пособиях по почвоведению понятие «подстилка», как правило, вводится без определения; авторы почти не обсуждают сущность и строение подстилки, её роль и место в биогеоценозе, но всё же отмечают различные аспекты влияния подстилки на почву, в т. ч. её почвозащитную роль (Роде, 1955), её значение как источника органических соединений для подзолистых почв (Кауричев, 1982), и подразделяют на подгоризонты или слои (Роде, 1955, с. 318; Почвоведение, 1988, с. 41).

Лесная подстилка учитывается в классификации почв 1977 года как самостоятельный горизонт; органогенные поверхностные образования имеют классификационное значение для разделения болотно-подзолистых почв на типы (Классификация ..., 1977, с. 33). Несмотря на то, что в классификации почв 2004 года подстилка не является диагностическим горизонтом, таковыми являются торфянистые и перегнойные горизонты (Классификация ..., 2004, с. 21—22). В то же время, считается, что формы гумуса отражают стратегию развития лесных экосистем

(Ponge, 2003, *цит. по* Лукина и др., 2008), поэтому В. Jabiol et al. (2013) предлагают внести формы гумуса в Мировую реферативную базу почвенных ресурсов (WRB-FAO), причём имеются в виду не только собственно гумусовые компоненты в органических или органоминеральных агрегатах, но и растительные остатки (листья, хвоя, ветки и пр.), а также компоненты торфов. Авторы предлагают ключ для определения форм гумуса и ряд диагностических горизонтов (Zanella et al., 2011).

### **1.3.1. ЛЕСНАЯ ПОДСТИЛКА И ДЕТРИТОПРОФИЛЬ**

В исследованиях, рассматривающих детрит в широком диапазоне форм его существования, удобно было бы иметь термин, обобщающий различные образования на поверхности почвы, сложенные мёртвым органическим веществом. Термин «подстилка» обычно употребляется с определителем «лесная», и, строго говоря, обозначает опад разной степени разложённости на поверхности почвы именно в лесах, и потому не вполне применим для степного войлока травяных сообществ, или для переходных вариантов. Так, в Классификации почв 2004 года выделяются *лесные подстилки, степной войлок и очёс*, а также несколько перегнойных и торфянистых *горизонтов*. Существует обобщающий термин «мёртвый покров» (Краткий словарь ..., 2005), однако определение «мёртвый» не вполне соответствует лесной подстилке — самому густонаселённому (по численности) компоненту биогеоценоза (Ярошенко, 1953). Т. А. Работнов (1992) вслед за В. Н. Сукачёвым (1964, *цит. по* Работнов, 1992, с. 129) полагает название «подстилка» неудачным, и предлагает термин «опадогенный горизонт», или «опадо-перегнойный горизонт».

Л. Г. Богатырев и коллеги предлагают термин «детритопрофиль», который обозначает *«совокупность органогенных горизонтов, сформированных в результате последовательного преобразования наземного детрита и образующих единый генетический профиль in situ»* (Богатырев, Малинина и др., 2014; Богатырев, Цветнова и др., 2016), по аналогии с термином «органопрофиль», обозначающим *«закономерное сочетание и распределение по генетическому профилю почв различных форм органического вещества»* (Гришина, 1986, с. 147). Соответственно, понятие «детритопрофиль» обозначает распределение детрита по профилю почвы, или — детрит, мысленно извлечённый из почвенного профиля с сохранением его строения и пространственного распределения в профиле. Этот термин объединяет лесную подстилку, степной войлок, а также торфянистые и торфяные образования, равно как и различные переходные варианты, позволяя рассматривать их в рамках единой классификации, не изменяя при этом значение термина «подстилка». Понятие «детритопрофиль» оказывается удобным для описания подстилок и торфов значительной мощности и сложного строения, формирующихся в условиях повышенного гидроморфизма и наличия многолетней мерзлоты (Богатырев, Цветнова и др., 2016; Земсков и др., 2018-б).

Однако, и эта терминология не является исчерпывающей. Например, встречаются случаи, когда детрит, скапливающийся на поверхности почвы и перемежающийся с живыми мхами и лишайниками, образует *инкрустированные* подстилки, или *растительно-детритный покров* (Богатырев, Демаков и др., 2019), который в отношении взаимодействия с почвой иногда уместно рассматривать как единое целое.

### 1.3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДСТИЛОК

Распространены классификации, основанные на типологии гумуса, предложенной П. Е. Мюллером (Müller, 1887) и развитой Ф. Дюшофуром (1970). Классификация, разработанная Н. Н. Степановым (Степанов, 1929, 1932; Ремезов, Погребняк, 1965, с. 139) учитывает характер растительного опада (елового, берёзового и т. п.), формирующего подстилку, и основана на представлении о том, что свойства лесных подстилок генетически проистекают из их состава. Так, *хвоевые* подстилки отнесены к категории *грубогумусных*, а лиственные — к категории *мулевых*. По классификации З. Прусинкевича (*цит. по* Карпачевский, 2005) подстилки подразделяются на три надтипа — мюльль, модер и мор, по наличию соответствующих подгоризонтов О1, О2 и О3; надтипы далее делятся на типы и подтипы по условиям увлажнения и по трофности. До некоторой степени органогенные горизонты и типы гумуса систематизированы в классификациях почв (*см.* с. 20). Одна из наиболее детализированных классификаций типов гумуса лесных почв разработана О. Г. Чертовым (1981).

С. В. Зонн (1964, *цит. по* Зонн, Урушадзе, 1974), отступает от классификации гумуса и предлагает классификационную группировку подстилок, учитывающую не только степень разложения, состав (по видовой принадлежности детрита) и параметры увлажнения, но и биохимические параметры — отношение  $C_{ГК}/C_{ФК}$ , интенсивность гумусонакопления в горизонте А, и характер действия на минеральную часть почвы.

Ещё один подход к классификации подстилок учитывает их морфологическое строение, то есть, наличие того или иного набора типичных подгоризонтов определённого состава и степени разложения, а также режим увлажнения. При этом видовой состав детрита имеет подчинённое значение. Один из вариантов классификации подстилок, применимый к условиям Дальнего Востока, предлагает А. П. Сапожников (1973). В уточнённом виде (Сапожников, 1987) классификация приводится в табл. 1. Предлагается также выделять переходные типы подстилок, например, *опадно-грубо-перегнойная* или *безопасная сильноперегнойная*. Мощность подстилки также рассматривается как классификационный признак, но имеет подчинённое значение. Подстилки предлагается подразделять на три класса по мощности: *маломощные*, *средней мощности* и *мощные*, причём для каждого генетического типа подстилок установлены свои градации мощности. В зависимости от набора подгоризонтов, подстилки подразделяются на *примитивные*, *неполноразвитые*, и *полноразвитые*, включающие один, два и три подгоризонта соответ-

Табл. 1. Классификация лесных подстилок в связи с условиями увлажнения (Сапожников, 1987).

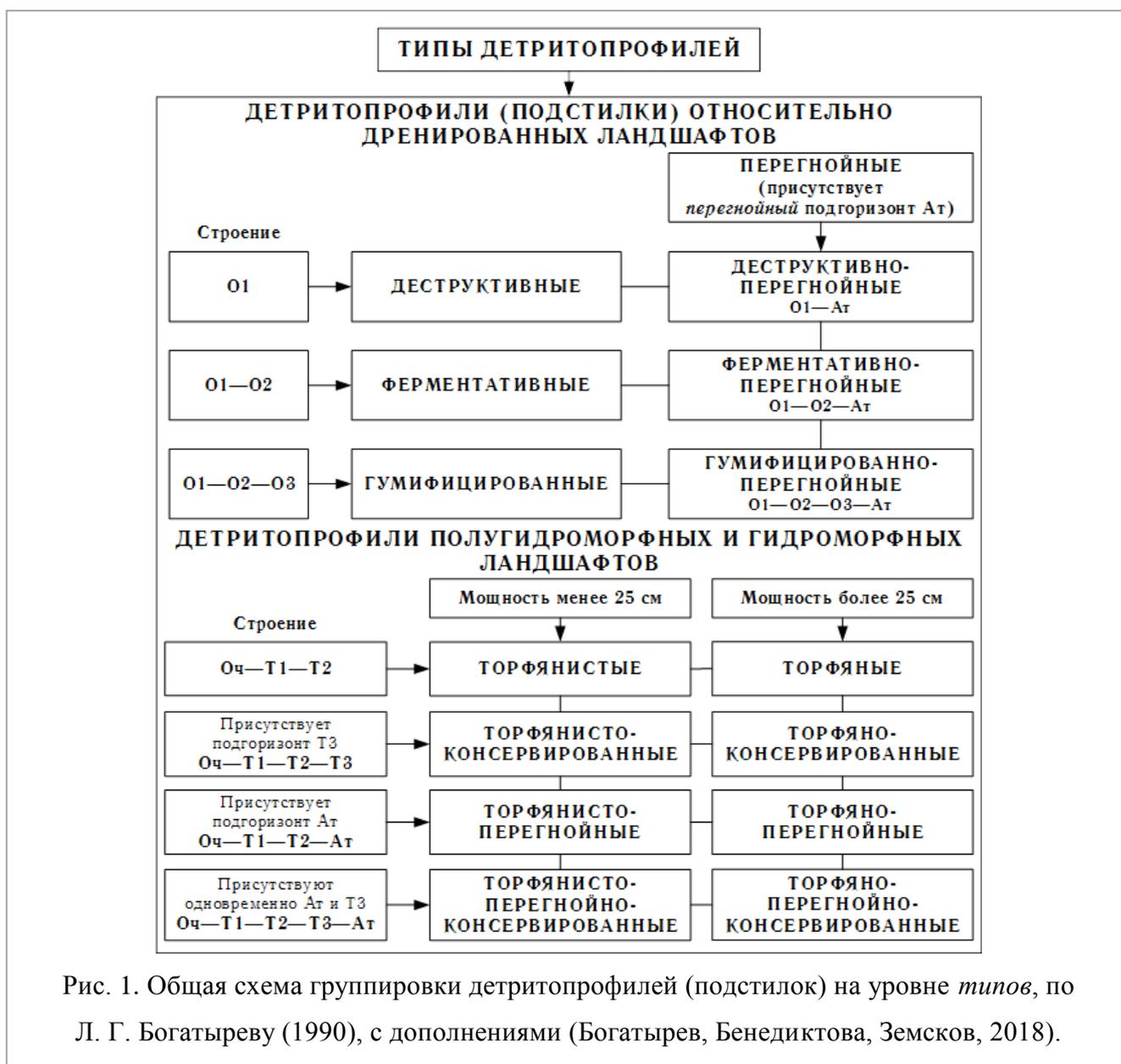
Тип подстилки	Строение	Влажностный режим
Опадная	O1—(O3)	Очень сухой и сухой
Дернинная	O1 <sub>д</sub>	Сухой и свежий
Грубоперегнойная	O1—O2—O3	Влажный
Среднеперегнойная	O1—O2—(O3)	Влажный; периодически свежий
Мягкоперегнойная	O1—O3	Свежий, периодически сухой
Сухоторфянистая	O1 <sub>ст</sub> —O2—(O3)	Влажный, периодически сухой
Оторфованная	(O1)—O2 <sub>от</sub> —(O3)	Влажный, периодически сырой
Торфянистая	(O1)—O2 <sub>т</sub>	Сырой, периодически мокрый
Торфяная	T	Мокрый

Обозначения: ст — сухоторфянистый подгоризонт; от — оторфованный; т — торфянистый. В скобках — возможность формирования данного подгоризонта в качестве эфемерного.

ственно, а также на *сложные*, в которых хотя бы один подгоризонт разделяется хотя бы на два генетически неоднородных слоя (Сапожников, 1987).

В настоящей работе используется классификация подстилок (или *детритопродилей*) по Л. Г. Богатыреву (Богатырев, 1990; Богатырев, Щенина и др., 1993), с соответствующими наименованиями подгоризонтов и типов подстилок. Приведённая схема (рис. 1) содержит дополнение, внесённое по предложению автора данной работы, а именно, *перегнойные* подстилки, в профиле которых есть перегнойный подгоризонт At и серия вышележащих подгоризонтов, предлагается классифицировать, в зависимости от набора последних, на *деструктивно-перегнойные*, *ферментативно-перегнойные* и *гумифицированно-перегнойные* (Богатырев, Бенедиктова, Земсков, 2018).

При дальнейшей детализации классификация учитывает мощность гумусового горизонта, на основании которой выделяются *подтипы*, строение подстилки (набор подгоризонтов), на основе которого выделяются *роды* (от *примитивных* до *полигенетических*), мощность, на основании которой выделяются *виды*, и состав опада, на основе которого выделяются *подвиды* (*хвойные, листовые, моховые, травяные*) (Богатырев, 1990). Данная классификация позволяет рассматривать в единой системе как подстилки относительно дренированных ландшафтов, обычные для лесов умеренного пояса, так и подстилки биогеоценозов с большим участием трав, и детритопродилей сложного строения, формирующиеся в гидроморфных условиях, и имеющие в профиле перегнойные и торфяные подгоризонты.



### 1.3.3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПОДСТИЛКИ

Экологическое значение лесной подстилки как компонента лесного биогеоценоза обусловлено тем, что она, так или иначе, участвует во многих природных процессах, рассматриваемых с точки зрения почвоведения и экологии, геохимии и гидрогеологии, что проиллюстрировано в табл. 2. Подстилка в значительной степени определяет состав и свойства почвы, а, следовательно, и реализацию её экологических функций; кроме того, сама подстилка обладает многими экологическими функциями, свойственными почвам (Карпачевский, 2005). Многие *биогеоценотические* функции почвы из категорий физических, химических и физико-химических, информационных, целостных (по Г. В. Добровольскому и Е. Д. Никитину, 2012) присущи и лесной подстилке как таковой — её, так же, как и почву, можно рассматривать как жилище, депо элементов питания и защитный биогеоценотический экран; подстилка участвует в регуляции численности, состава и структуры биоценозов, в аккумуляции и трансформации веществ и

Табл. 2. Экологические особенности опада и подстилки, по (Богатырев и др., 2011).

ПАРАМЕТРЫ	ОПАД	ПОДСТИЛКА
Время существования	Годичное обновление	Многолетнее обновление
Место в биогеоценозе	Поток	Блок принимающий
Устойчивость	Минимальная	Максимальная
Место в общем блоке питания растений (по А. Д. Фокину)	I очереди	II очереди
Информационное значение	Отражает ежемесячное функционирование наземного покрова	Отражает многолетнее функционирование наземного покрова
Постоянство состава	Эволюционирующий состав	
Этап преобразования природных вод*	Биогенный (взаимодействие с растительностью)	Биогенная метаморфизация (контакт с почвой)
Взаимодействие с почвой	А) Прямое (деструктивные подстилки) Б) Опосредованное (подстилки сложного строения)	Всегда прямое — при любом типе подстилок
Мера соответствия типу леса	Абсолютная	Относительная (в связи с сукцессиями)

\* Имеются в виду этапы формирования состава инфильтрационных вод — *атмогенный, биогенный, литогенный и испарительный* (Шварцев, 1978, *цит. по* Шварцев, 1996, стр. 214).

энергии, создаёт условия для существования и эволюции организмов. Многие, если не все, *глобальные* функции почв, в той или иной мере присущи и лесным подстилкам.

Подстилки могут служить биогеохимическим барьером на пути следования поллютантов. Многие исследователи полагают, что подстилка способна адсорбировать основную массу тяжёлых металлов, поступающих с атмосферными выпадениями (Гришина, 1983; Прокушкин и др., 1983). Это служит основой для исследований подвижности тяжёлых металлов в почвах с должным вниманием к роли лесной подстилки как фильтра для техногенных токсикантов (Чертов и др., 1985). Это обуславливает актуальность исследования подстилок, формирующихся в условиях антропогенного воздействия. Интересно, что детрит водных экосистем также рассматривается с точки зрения аккумуляции тяжёлых металлов и мышьяка (Остроумов, Демина, 2010). Отмечается, что поллютанты, аккумулируемые взвешенным детритом, зачастую выпадают из области наблюдений, посвящённых их содержанию в воде, что приводит к значительной недооценке загрязнения водоёмов. В пресноводных экосистемах взвешенные частицы детрита нередко преобладают по массе над живым веществом планктона и характеризуются высокой сорбционной способностью (Садчиков, Остроумов, 2017).

#### 1.3.4. ЛЕСНАЯ ПОДСТИЛКА КАК КОМПОНЕНТ БИОГЕОЦЕНОЗА

Мёртвое органическое вещество подстилки считается основным элементом экосистемы, отвечающим за её устойчивость. Подстилку можно рассматривать как часть почвенного профиля, или как подсистему почвенной системы, или как самостоятельную систему, или как компонентное связующее звено в системе биогеоценозов, а с геохимической точки зрения — как поч-

венно-геохимический микробарьер (Попова, 2017-а). Л. О. Карпачевский и А. И. Морозов (1994) рассматривают подстилку как *мезострату* (наряду с *фитостратой* и *педостратой*) в вертикальной структуре биогеоценоза. Подчёркивая важность подстилки как одного из компонентов леса, авторы указывают на то, что ей не всегда отводится должное место в теоретических построениях, касающихся структуры биогеоценозов и классификации природных тел (Карпачевский, Морозов, 1994).

В контексте биогеохимии состав опада и подстилки имеет принципиальное значение в отношении преобразования атмосферных осадков и формирования состава природных вод, мигрирующих в пределах почвенного профиля. Так, для подбуров и подзолов под ельниками было показано, что лесная подстилка способствует нейтрализации кислотности стволовых и кроновых вод, причём в различных подгоризонтах доминируют разные механизмы реализации этого процесса (Лукина и др., 2002; Орлова и др., 2012). Поступление элементов с атмосферными выпадениями является важным механизмом компенсации потерь биофильных элементов в бореальных лесах. Поступающие элементы поглощаются мхами и лишайниками, и затем постепенно высвобождаются в процессе разложения их опада (Лукина и др., 2008). О роли биологических процессов в формировании состава природных вод писал ещё В. И. Вернадский (*по* Ковда, 1950), а Г. В. Добровольский (1968) в развитие этой идеи сформулировал положение, гласящее, что *«выносятся преимущественно те элементы, которые не удерживаются в биологическом круговороте»*.

Как результат сложного взаимодействия живого и косного вещества, лесная подстилка представляет собой особый почвенный горизонт в лесных экосистемах. Она активно участвует в процессах почвообразования: способствует накоплению органических и минеральных веществ; определяет кислотность почвы; оказывает большое влияние на водный, тепловой и микробиологический режимы корнеобитаемых слоёв почвы; выполняет почвозащитную и противозерозионную роль (Зонн, 1954; Карпачевский, 1981; Das et al., 1993; Решетникова, 2015, и др.). Запасы и характеристики подстилки, включая скорость её разложения, связаны с количеством и составом поступающего опада, которые, в свою очередь, зависят от типа леса, от состава и плотности древостоя, от характера напочвенного покрова, а также климатических условий.

Отмирание растительных органов, их поступление на поверхность почвы и последующее разложение обуславливают формирование периодически обновляющегося запаса органического вещества, величина которого относительно постоянна (Зонн, 1964; Богатырев, 1997). Верхняя часть лесной подстилки (подгоризонт O1, или L) ежегодно подновляется за счёт опадающих фракций фитомассы, нижняя — последовательно трансформируется в подгоризонты ферментации (O2, или F) и гумификации (O3, или H) (Зонн, 1964; Карпачевский, 1981). Таким образом, лесной опад в процессе жизнедеятельности животных и микроорганизмов превращается в под-

стилку — своеобразный продукт леса, одновременно находящийся в разных стадиях трансформации и оказывающий существенное влияние на другие компоненты БГЦ (Решетникова, 2015). Аккумуляция органического материала и содержащихся в нём зольных элементов и азота формирует *ближний резерв элементов питания* для растительности, а также энергетические ресурсы, «под влиянием которых изменяются как отдельные компоненты биогеоценозов, так и биогеоценозы в целом. Эти изменения происходят в результате постепенного накопления почвами новых признаков и свойств» (Сукачѳв и др., 1964).

### 1.3.5. НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДСТИЛОК

Лесная подстилка неизменно является объектом пристального внимания исследователей, изучающих, как факторы её формирования и развития, так и её влияние на почву и прочие компоненты биогеоценоза. Лесная подстилка является важным объектом исследования в ботанике и биогеоценологии, в морфологии почв и химии почв. В контексте биогеохимии подстилка рассматривается с точки зрения концентрирования и рассеяния элементов. В рамках учения о биологическом круговороте подстилка важна для формирования устойчивых круговоротов вещества и энергии. Изучение процессов, составляющих эти круговороты, а также связанных параметров и показателей, важно для понимания механизма формирования устойчивости экосистемы в целом (Попова, 2007-а; Попова, Михно, 2012). К числу таких показателей относится, в числе прочего, скорость высвобождения элементов из подстилки, а также интенсивность трансформации органического вещества (Попова, 2007-б).

Существует множество **показателей**, характеризующих лесную подстилку (табл. 3). Интересно, что есть не менее пяти практически идентичных по сути показателей, использующих запасы подстилки и годовое поступление опада для оценки скорости преобразования органического вещества. Меньшее число показателей основано на морфологических характеристиках, и только один из приведѳнных является экспериментальным. По этой причине морфологическим характеристикам детрита и экспериментальным методам исследования детритогенеза, в настоящей работе уделено особое внимание.

Отдельным направлением исследований является **пространственная неоднородность** лесных подстилок, например, С. П. Кошельков (1961) исследует парцеллярную структуру подстилок, и отмечает наличие статистической зависимости запасов лесной подстилки от плотности древостоя и от сомкнутости крон. Авторы уже длительное время уделяют самое пристальное внимание исследованию небольших участков лесных экосистем, принадлежащим различным тессерам — окнам, подкроновым и приствольным участкам, в пределах которых можно найти различные по классификационной принадлежности лесные подстилки, а также установить различные тенденции в почвообразовании (Карпачевский, 1977; 1997) — известно, что химические свойства подстилок разных парцелл заметно различаются, что также обуславливает

отличия химических свойств почв (Лукина и др., 2008). Этот вопрос не исчерпан и в настоящее время (Семенюк и др., 2020).

Табл. 3. Показатели, используемые для характеристики лесных подстилок и протекающих в них процессов, *по* (Богатырев, Телеснина, 2010).

<p>На основе запасов</p>	<p><b>Индекс баланса опада</b>, складывающийся в связи с его перераспределением (Богатырев, 1975).  <b>Коэффициент биогеохимического круговорота</b> — отношение запасов подстилки к запасам опада, умноженное на коэф-т активных температур (Башкин, 2004; Кречетов, Черницова, 2006).  <b>Скорость круговорота</b> — отношение годового опада к сумме подстилки и годового опада (Jenny et al. 1949).  <b>Среднегодовая скорость разложения листового опада</b> — по аналогии с предыдущим показателем (Горчаковский, Андряшкина, 1975).  <b>Подстильно-опадный коэффициент (ПОК)</b> (Базилевич, Родин, 1964).  <b>Интенсивность разложения</b> — <math>Id = 100 \cdot ПОК^{-1}</math> (Гришина, 1986).  <b>Опадо-подстильный коэффициент</b> (Глазовская, 1988).  <b>Скорость разложения подстилок</b>, по разности между макс. и мин. запасами (Селиванова, 1983).  <b>Уровень консервации</b> — соотношение мощностей подстилки и гумусово-аккумулятивного горизонта. Косвенно характеризует скорость деструкции растительного детрита. Наиболее общий показатель эффективности плодородия лесных почв (Чертов, 1981).</p>
<p>На основе химического состава</p>	<p><b>Период круговорота элементов</b> — общее время пребывания элементов в системе «фитоценоз— почва» (Казимилова, Морозова, 1973).  <b>Период нахождения элементов в составе органического вещества</b> (в мортмассе или в живом веществе) (Казимилова, Морозова, 1973).  <b>Показатель высвобождения элементов из опада</b> (Пугачев, 1983).  <b>Диакронический показатель</b> — о характерном времени нахождения элемента или органического вещества в горизонтах подстилки (Чернобай, 1985).  <b>Показатель активности мобилизации химических элементов при разложении</b> — соотношение опада прошлых лет и текущего года по запасам элементов (Игнатенко, Пугачев, 1980).  <b>Баланс подстилки</b> — о приходно-расходных статьях по хим. элементам (Фокин и др., 1979).  <b>Индекс плодородия</b> — произведение содержания общ. N и суммы обм. Ca и Mg (Чертов, 1981).  <b>Коэффициенты концентрации элементов в подстилке</b> по отн. к породе (Долобовская, 1975).  <b>Резерв биофильных элементов и органического вещества</b> — для оценки относительной мобильности элементов для сравниваемых типов БГЦ (Богатырев, 1986).  <b>Элементы высокой потребности</b>, запасы которых в подстилке условно могут обеспечить прирост лесных насаждений на несколько лет; <b>элементы исключительной потребности</b>, запасы которых в подстилке условно недостаточны для формирования годичной продукции (Никонов, 1986).</p>
<p>Морфологические</p>	<p><b>Коэффициент накопления</b> — для установления различий скоростей деструкционных процессов профиле подстилки (Чернобай, 1985)  <b>Индекс гомогенности</b> — количественный показатель пространственной структуры БГЦ (Воробейчик, 1986)</p>
<p>Экспериментальные</p>	<p><b>Интенсивность разложения</b> — скорость потери массы растительных образцов, заложенных на поверхности подстилки, по её подгорizontам, или в почве (Переверзев, 1988)</p>

## 1.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ

Исследование процессов разложения в почве или подстилке может проводиться с разными целями и в разном контексте. Например, В. Я. Частухин и М. А. Николаевская подробно описывают опыт исследования процессов распада органического вещества древесных остатков под действием различных организмов-деструкторов, прежде всего — грибов (Частухин, Николаевская, 1948; 1969). Существуют и работы, посвящённые разложению самих микроорганизмов. Например, показано, что бактериальные клетки разлагаются довольно быстро в условиях тундры (Parinkina, 1973; Clarholm et al., 1975). Существуют работы, посвящённые моделированию процессов разложения, так, в работах О. Г. Чертова (1985) и А. С. Комарова (Chertov, Komarov, 1997; Чертов и др., 2007) даётся подробный обзор факторов минерализации детрита, различных подпроцессов, роли участвующих организмов-деструкторов, и предлагается имитационная модель, пригодная для описания минерализации органического вещества в широком диапазоне условий. Многие исследования касаются тех или иных экологических аспектов изучения биогеоценозов: от характеристики степени угнетённости микробного сообщества в одном отдельно взятом биогеоценозе — до масштабных исследований, имеющих целью посредством исследования интенсивности разложения оценить степень закрепления и высвобождения углерода.

Изменения климата в следствие поступления углерода в атмосферу напрямую связаны с процессами разложения органического вещества. Если связь первичной продукции с изменениями климата уже была оценена с использованием достаточно достоверных моделей, то для процессов разложения — первичного источника атмосферного углерода — это ещё не сделано (Adair et al., 2008). Наземные экосистемы могут быть механизмом как положительной, так и отрицательной обратной связи с изменениями климата в будущем (Burke et al., 2003; Weltzin et al., 2003). Глобальные изменения климата связаны с балансом между закреплением углерода растениями и его высвобождением в атмосферу из детрита и почв, и этот баланс реализуется через разложение органического вещества. Ежегодное поступление  $\text{CO}_2$  в атмосферу, обеспечиваемое разложением детрита и органического вещества почв, в десять раз превышает поступление, обусловленное выбросами при сжигании ископаемого топлива и выбросами промышленных предприятий (Schlesinger, 1997; Prentice et al., 2001). Таким образом, даже сравнительно небольшие изменения в скоростях разложения наземного детрита могут оказать большое влияние на содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Исследователи сходятся во мнении, что гидротермический режим и химический состав опада контролируют скорости разложения (Meentemeyer, 1978; Berg, Ågren, 1984; Aber et al., 1990; Hobbie, 2005), именно поэтому представляется важным на примере достаточно больших временных интервалов и широкой географии наблюдений установить, как именно различные

факторы, по отдельности или совместно, определяют скорость разложения. При этом, наиболее часто встречаются исследования, непродолжительные по времени и не охватывающие достаточно большого диапазона условий, а экстраполяция полученных данных на БГЦ другого флористического состава и с другими типами подстилок не всегда приемлема.

Проведение подобных исследований в широком диапазоне условий среды, включая как гидротермические условия, так и специфику растительного и животного мира, и, прежде всего — местной микробиоты, требует метода, позволяющего получать преимущественные данные по различным биогеоценозам, в том числе, по тем, в которых наблюдаются экстремальные условия среды. Здесь возникает несколько важных проблем, в числе которых выбор материала, на примере которого будут проводиться исследования, и выбор режима инкубации образцов, чему, в числе прочего, и посвящено исследование, приводимое в настоящей работе.

#### 1.4.1. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ

Наиболее простые показатели скорости разложения основаны на соотношении поступления опада и запасов подстилки. Н. И. Базилевич и Л. Е. Родин (1964) предлагают использовать *подстильно-опадный коэффициент (ПОК, годы)* — отношение запасов мёртвых растительных остатков к ежегодному поступлению опада, или, при отсутствии данных по *полному* учёту мёртвых растительных остатков, отношение только *подстилки (или степного войлока) к листовому опаду* или к *опаду зелёной части*. Такие соотношения можно рассчитать и для отдельных компонентов или химических элементов и соединений, и охарактеризовать таким образом скорость их высвобождения из растительных остатков. Н. И. Базилевич и Л. Е. Родин (1964), а позже Л. А. Гришина (1986) предлагают собственные системы градаций скорости круговорота (табл. 4), несколько различные в оценках, но основанные на значениях подстильно-опадного коэффициента (*ПОК*) и интенсивности разложения ( $Id = 100/ПОК, \% \cdot год^{-1}$ ).

Ранее схожий параметр — скорость круговорота ( $k$ ) — предложили Н. Jenny et al. (1949):

$$k = \frac{A}{A + F}, \quad (1)$$

где  $F$  — запасы подстилки,  $A$  — сумма опада, поступившего за предшествующий год.

Благодаря относительной простоте и информативности, подстильно-опадный коэффициент широко используется как показатель интенсивности разложения, и, что немаловажно, накопленные исследователями обширные данные пригодны для проведения метаисследований. Так, Н. В. Попова (2007-б; 2012) предлагает методику оценки устойчивости ареалов на основании интенсивности разложения детрита, по специально разработанной шкале. Вместе с тем,

Табл. 4. Показатели интенсивности разложения опада (Родин, Базилевич, 1965, стр. 222; Гришина, 1986, стр. 74).

Обозначения: *ПОК* — подстильно-опадный коэффициент; *Id* — интенсивность разложения ( $Id = 100 / ПОК$ ).

<i>ПОК</i>	<i>Id</i>	Наименование круговоротов по интенсивности разложения (Родин, Базилевич, 1965)	Разложение, степень проявления процесса (Гришина, 1986)
> 20	< 5	Застойные	Застойное
10—20	5—10	Сильнозаторможенные	Сильнозаторможенное
6,7—10	10—15		Среднезаторможенное
5—6,7	15—20		Слабозаторможенное
3,3—5	20—30	Заторможенные	Слабое
2,5—3,3	30—40		Малоинтенсивное
2—2,5	40—50		Интенсивное
1,5—2	50—67		Весьма интенсивное
1—1,5	67—100	Интенсивные	Очень интенсивное
0,2—1	100—500		
0,1—0,2	500—1000	Весьма интенсивные	Бурное
< 0,1	> 1000		

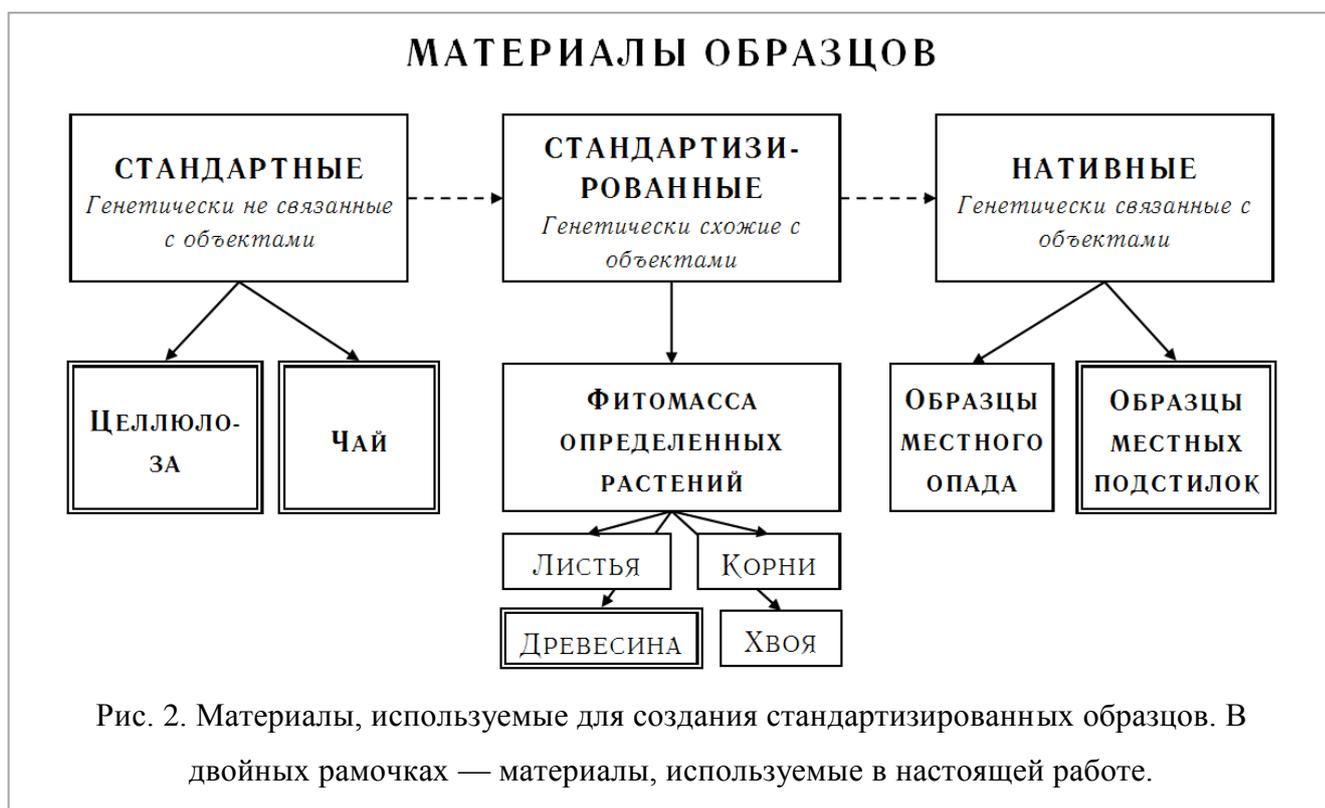
Л. Е. Родин и соавторы указывают, что подобные параметры дают лишь общее представление о скорости разложения и о выщелачивании химических элементов (Родин и др., 1968, стр. 68). Это приводит авторов к выводу о необходимости периодически взвешивать разлагающиеся растительные остатки, что и получило реализацию в виде т. н. *метода мешочков с детритом*.

## МЕТОД СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

«Метод мешочков с детритом» (англ. — *the litter-bag technique*) в большинстве случаев сводится к тому, что образцы тех или иных материалов упаковывают в сетку из инертного материала, закладывают в почву или подстилку, и затем отбирают в определённом режиме.

На практике применяют не только *детрит* в обычном понимании, но и различные образцы промышленного производства, или образцы свежесобранного материала, которые, хотя и являются детритом по формальным признакам, но умозрительно не ассоциируются с отмершими органическими остатками. Кроме того, в случае с древесиной и прочими твёрдыми материалами часто обходятся без упаковки. Принципиальный момент в этом подходе — это «стандартизованность» материала образцов, которая заключается в том, что на множестве объектов используется один и тот же материал, что обеспечивает получение приемственных данных по разным БГЦ. Это включает «стандартизованность» начального состояния образцов, способа их измельчения, упаковки и размещения на местности. Поэтому мы предлагаем обобщённое название «**стандартизированные образцы**», которое и будет употребляться далее.

В развитие терминологии, на рис. 2 систематизированы материалы, используемые для исследования процессов разложения. Под *стандартными* материалами понимаются те, кото-



рые для всех исследуемых объектов одинаковы, не имеют генетической связи с растительностью исследуемых объектов, и представляют собой фабричный продукт, обеспечивающий хорошую воспроизводимость. *Нативные* материалы отбираются непосредственно на исследуемом объекте, и в максимально возможной степени соответствуют местной мортмассе по составу и соотношению компонентов. *Стандартизированные* материалы представляют собой компромисс между стандартными и нативными — это материалы, отобранные в природе, и используемые на объектах, для которых характерно наличие схожих материалов в составе детрита. Пример — использование образцов сосновой хвои в сосновых лесах. Термин «*стандартизированные образцы*» предлагается в качестве обобщённого наименования образцов, изготовленных с использованием этих материалов.

Одно из первых наблюдений за изменением массы материалов, расфасованных в сетку из инертного материала, описывает F. Gustafson (1943). Автор использует крупные образцы массой 600—700 г (в современных работах обычно используют образцы массой порядка 1—10 г), состоящие из листьев нескольких видов растений, из сосновой хвои, а также из смеси того и другого, помещённые в корзины из гальванизированной проволочной сетки с размером ячейки 1,3 см для листового материала и 0,6 см для хвойного. По итогам работы автор отмечает ряд технических сложностей, связанных с загрязнением образцов почвой, с потерей и приносом материала через ячейки. Автору удалось получить кривые изменения массы образцов, хотя и плохо детализированные по времени, а также подтвердить распространённое среди лесников предположение о том, что смесь хвойного и листового опада разлагается быстрее, чем каждый

из них в отдельности. Из приводимых данных также можно сделать вывод, что, в общем случае, лучше работать с бóльшим числом повторностей, но с образцами меньшего размера, чтобы получать более статистически значимые результаты, а также иметь больше возможностей для корректировки режима отбора образцов по мере накопления первичных данных.

Одно из первых достаточно подробных описаний метода стандартизированных образцов в его современном виде относится к 1957 году (Vocock and Gilbert, 1957). В настоящее время вид образцов, описанный в указанной работе — один из наиболее распространённых. Образцы помещают в мешочки размером около 8×15 см (или большего размера) и закладывают в лесную подстилку (либо на её поверхность, либо в почву на определённой глубине) на определённый срок, затем извлекают и исследуют изменение массы и прочих параметров по сравнению с исходным материалом. Подробное описание метода *мешочков с детритом* и получаемых с его помощью результатов приводится в пособии «Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover» (Berg, Laskowski, 2005) и ряде других работ тех же авторов.

При планировании подобных опытов, тем не менее, неизбежно возникает несколько принципиальных вопросов относительно используемых материалов, размещения образцов на местности, продолжительности экспозиции и режима их отбора. Особенности планирования исследований зависят от того, информацию какого рода планируется получить, и какими техническими возможностями располагает исследователь.

## **МАТЕРИАЛЫ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ И ФАКТОРЫ РАЗЛОЖЕНИЯ**

Применение метода стандартизированных образцов часто имеет целью выяснение **отклика** скорости разложения на те или иные параметры среды. Этот отклик проявляется в ускорении или замедлении разложения материала на опытных площадках, на которых наблюдается повышенное или пониженное значение какого-либо параметра. Если в ходе исследования выясняется, что какой-либо параметр разложения материала находится в явной зависимости от какого-либо параметра среды, говорят, что этот параметр *контролирует* разложение данного материала. Такая терминология является вполне устоявшейся и широко употребляется в работах по этой теме (Meentemeyer, 1978; Prescott, 2010 и др.). Продолжительность нахождения образцов в подстилке или в почве обычно называют *продолжительностью инкубации* или *продолжительностью экспозиции*.

Рассуждая о факторах разложения, логично будет выделить *внешние* факторы, к которым относятся климатические параметры среды и специализация местных организмов-деструкторов, и *внутренние* — химический состав, физические свойства, размерность и структура частиц самого материала. Температура, влажность, а также биохимические свойства местного детрита определяют количество и видовой состав организмов-деструкторов (Chertov, Ко-

тагов, 1997), особенности которых, в свою очередь, можно рассматривать как один из факторов разложения материала стандартизированных образцов.

В отношении внутренних факторов разложения следует особо отметить, что скорость разложения детрита определяется особенностями экологической стратегии производящих его растений. Так, наблюдается положительная корреляция между скоростью потери биомассы, потенциальной скоростью роста и способностью к разложению (Лукина и др., 2008).

Разные факторы среды в разной степени контролируют скорости разложения материала. Причём от происхождения материала, определяющего внутренние факторы разложения, зависит, какова будет мера отклика на каждый из внешних факторов. Иными словами, для разных материалов мера отклика на разные внешние факторы будет непропорционально различна. Например, недостаток влаги может приводить к замедлению разложения одного материала, но почти не влиять на скорость разложения другого.

Поскольку разложение осуществляется деятельностью живых организмов, здесь вполне применим закон лимитирующего фактора Ю. фон Либиха. Например, оптимального увлажнения не будет достаточно для интенсивного разложения, если процесс протекает при низких температурах, равно как и повышение температуры не приведёт к ускорению разложения при резком недостатке влаги. На то, что процессы, связанные с почвообразованием, замедлены в жаркие и засушливые периоды, обращал внимание И. П. Герасимов, подчёркивая значение периодов «жаркого покоя» и «холодного покоя» в формировании *коричневых* почв Средиземноморья где фаза наиболее активного почвообразования сдвигается на весенние и осенние месяцы, то есть на периоды не самой высокой обеспеченности теплом, но достаточно высокой влажности. Такой режим почвообразования И. П. Герасимов противопоставляет бореальному климату, где наиболее активное почвообразование происходит в течение умеренно тёплого и влажного лета, и тропическому — с долгим, жарким и влажным периодом почвообразования (Герасимов, 1976, стр. 36). Чередование увлажнения и иссушения также влияет на процессы разложения, и это влияние может быть неодинаковым на разных стадиях процесса (Taylor, Parkinso, 1988). Процессы промораживания-оттаивания также влияют как на общую потерю массы материалов, так и на потерю отдельных компонентов, и это влияние своеобразно для каждого материала (Vogatyrev et al., 1983, Fuzhong Wu et al., 2010).

Получается, что разложение материалов определяется не только значением отдельных факторов среды (т. е. внешних), но и их сочетанием и чередованием, а также взаимодействием со свойствами самого материала, т. е. с внутренними факторами разложения, которые, в свою очередь, непостоянны в течение этого процесса. Закономерно, что это находит отражение и в особенностях лесных подстилок, например, в условиях избыточного увлажнения можно встретить как весьма высокие, так и относительно низкие запасы подстилок, что обусловлено степе-

нью переувлажнения, а также совокупным влиянием увлажнения, температуры и иных факторов накопления и разложения детрита. В то же время при повышении температуры наблюдается явная тенденция к снижению запасов подстилки (Попова, 2018), что при достаточном увлажнении обусловлено повышением скоростей разложения детрита, а при недостаточном увлажнении — понижением продукции растительности.

В большинстве моделей используют температуру и влажность как параметры, контролирующие разложение. При использовании в моделях качества разлагаемого материала, роль последнего сильно варьирует — от моделей, в которых влияние качества материала незначительно, до моделей, в которых материал подразделяется на несколько пулов по особенностям химического состава (Adair et al., 2008). В то же время, в подобных исследованиях могут использоваться образцы, сильно различающиеся по химическому составу и физическим свойствам, поэтому следует учитывать особенности того или иного материала. В метаисследовании W. K. Cornwell et al. (2008) утверждается, что отличия, обусловленные видовой принадлежностью, намного выше, чем считалось ранее, и более значительны, чем те, что обусловлены климатом, а также, что способность детрита тех или иных видов к разложению последовательно коррелирует с их экологической стратегией, что является ключевым моментом для понимания влияния растительности на почву, а также для совершенствования прогнозов глобального круговорота углерода. Таким образом, необходимо учитывать химический состав детрита и особенности, связанные с его происхождением (Gallardo, Merino, 1993), поскольку даже химический состав и строение детрита, произведённого растениями одного и того же биологического вида, но сформировавшимися в разных климатических условиях, могут отличаться, внося дополнительное варьирование в получаемые данные (Cornelissen, 1996).

Если цель исследования — выявить влияние климатических факторов на разложение, исследователи обычно стараются на всех объектах использовать максимально однородный материал, имеющий единое происхождение, и выбирать объекты, отличающиеся только по климатическим параметрам, чтобы минимизировать влияние факторов, которые в данном случае не исследуются. Пример такого подхода — использование образцов сосновой хвои в сосновых лесах, как в работах Б. Берга с соавт. (Berg et al., 1993 и др.).

Однако, не к каждому биогеоценозу можно подобрать аналоги в достаточно широком диапазоне климатических условий. К тому же, стандартизировать материал, отобранный в природе, можно лишь до некоторой степени — рано или поздно подготовленный материал будет израсходован, а заново отобранный материал может отличаться по свойствам; то же касается материала, отобранного в разных локациях. Поэтому некоторые исследователи предпринимают попытки найти такой *стандартный* материал, который был бы в равной степени пригоден для исследования различных растительных сообществ.

В качестве таких стандартных материалов рассматривают, например, целлюлозу, рекомендуемую в Руководстве по комплексному мониторингу (2013), или чай Lipton™ в пакетиках, возможность использования которого рассматривают J. A. Keuskamp et al. (2013). Однако и эти материалы вызывают некоторые сомнения. Чай — материал, не свойственный большинству БГЦ, не вполне соответствующий специализации местной микробиоты. Причём это несоответствие не обязательно повлечёт одинаковые, или хотя бы однонаправленные эффекты в разных БГЦ, что осложняет интерпретацию данных. Можно также предположить, что существует фактор, обусловленный сочетанием физического строения образца и условий его разложения — представляется вполне возможным, что скорость разложения образцов с разной размерностью частиц и разной способностью удерживать влагу, будет *непропорционально* различной в разных условиях. Таким образом, нельзя с уверенностью утверждать, что разложение чая или целлюлозы корректно отражает реальные процессы разложения местного детрита.

Для исследования локальных процессов разложения лучше всего подходит нативный материал, отобранный непосредственно на исследуемом объекте, то есть, материал, процесс разложения которого можно отождествить с процессом разложения местного детрита в естественных условиях. Выделить степень влияния отдельных факторов на разложение такого материала будет затруднительно, однако можно получить наиболее полное представление о фактических процессах разложения на исследуемом объекте. Вместе с тем, создание репрезентативного образца нативного материала является технически сложной задачей: желательно, чтобы видовой, компонентный и структурный состав детрита в образце соответствовал естественному; то же касается и плотности упаковки материала, и способа его размещения на местности.

Из сказанного следует, что, какой бы материал не применялся, имеет место ряд ограничений: на разложение стандартных материалов в различных БГЦ могут влиять неочевидные факторы; использование стандартизированных образцов фитомассы определённого вида растений (например, хвои) целесообразно только на объектах со схожей растительностью; нативные материалы сложны в приготовлении и не позволяют получить информацию по отдельным факторам разложения. Представляется целесообразным использовать одновременно образцы нескольких материалов на каждом объекте, чтобы получить сведения о разных аспектах одной и той же группы процессов. Разложение образцов нативного материала, сформированного в исследуемой локации, будет характеризовать процессы, протекающие в биогеоценозе естественным образом, а разложение прочих образцов, в зависимости от того, какой фактор является ведущим в отношении разложения того или иного материала, позволит выявить локальные отличия в отдельных факторах разложения, характерных для того или иного объекта.

В теоретическом отношении разница между стандартными и нативными материалами весьма существенна. Использование нативных материалов подразумевает попытку исследова-

ния процессов с наименьшим вмешательством в них, а использование стандартных материалов означает инициирование в системе новых процессов. Таким образом, первый случай можно отнести скорее к *наблюдению* интересующего случая в природе, а второй — к *эксперименту*, который определяется наличием искусственно созданного сочетания обстоятельств (Милль, 1914 с. 346, *цит. по* Дынин, 1970, с. 546).

На выбор разлагаемого материала влияет предполагаемая **длительность экспозиции** образцов. Можно выделить два принципиальных подхода к выбору режима экспозиции образцов. Первый вариант — заложить одновременно большое число образцов, и отбирать часть из них через определённые промежутки времени. Так можно получить динамику разложения материала от начальных стадий и до того этапа разложения, на котором в образце уже не останется пригодного для анализа материала. Второй вариант — отбирать образцы через установленные промежутки времени, вне зависимости от того, до какого состояния они фактически успели трансформироваться. Фиксированную продолжительность экспозиции в три месяца предлагают Keuskamp et al. (2013) для образцов чая — в этом случае дата закладки образцов выбирается произвольно, однако обязательно учитывается при интерпретации данных.

## 1.4.2. ПРИМЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ

### СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### **ОБРАЗЦЫ СТАНДАРТИЗИРОВАННОЙ ФИТОМАССЫ**

Образцы растительного материала часто используют для интегральной оценки влияния загрязнения на процессы разложения. Так, в Международной программе комплексного мониторинга применяется «метод стандартной подстилки» — исследование разложения на примере образцов стандартизированной сосновой хвои. Метод предлагается использовать для того, чтобы охарактеризовать нарушения в жизнедеятельности микробиоты, следствием которого должно стать замедление процессов разложения детрита. *«Причиной подобных нарушений может быть аккумуляция загрязняющих веществ в почве. Снижение уровня разложения ведёт к уменьшению потребления биогенных элементов и продукции. Когда продукция стабилизируется на новом уровне, потребление питательных веществ в подстилке снова станет равным расходу»* (Руководство по комплексному мониторингу, 2013). Предлагается собрать хвою из одного древостоя приспевающих хвойных деревьев, поместить их в мешочек из инертного материала с размером ячейки 1 мм, определив влажность для расчёта абсолютно-сухой массы. Затем разместить три мешочка на площадке 10×10 м, в сентябре—октябре, на моховом покрове или опаде. Затем мешочки следует отобрать после одного, двух и трёх лет экспозиции, высушить на воздухе, затем промыть и очистить пробу, чтобы в субстрате осталась только хвоя, высушить и взвесить, затем

рассчитать потерю массы (*там же*). Какое количество хвои следует помещать в мешочек, не уточняется. Следует отметить, что в условиях города могут быть изменены не только микробиологические факторы разложения, но и гидротермические, и это следует учитывать уже на стадии планирования, наблюдений, чтобы получить необходимые фактические данные для корректной интерпретации наблюдаемого различия скорости разложения.

Аналогичный подход используется и для оценки последствий аэротехногенного загрязнения. Показано, например, что в условиях промышленного загрязнения скорость разложения активных фракций заметно снижается, причём для листьев вечнозелёных кустарников и еловой хвои характерно более существенное снижение скорости разложения, чем для листового опада берёзы (Иванова и др., 2019).

В. Berg et al. дают подробное описание данного метода и проводят масштабное исследование на множестве площадок в разных странах Европы и на нескольких площадках в Северной Америке. Наиболее подробно исследование Б. Берга и коллег представлено в работе «Litter mass loss rates in pine forests...» (Berg et al., 1993), а также в ряде других работ (Berg, Ågren, 1984; Staaf, Berg, 1982; Berg, Wesson et al., 1982 и проч.), в том числе в пособии, посвящённом разложению подстилки и круговороту углерода и питательных веществ (Berg, Laskowski, 2005).

Для всех объектов авторы использовали одинаковые образцы хвои, собранной в одном и том же месте в одно и то же время, т. е. стандартизированной. Материал упаковывали в мешочки из териленовой сетки размером 8×8 см, по 0,6—1,0 г в каждый. Мешочки закладывали в подстилку в рандомизированном порядке, в пределах площадки 1×1 м, по 10—25 случайно расположенных площадок в каждой локации. Локации для закладки образцов тщательно выбирали с вниманием к схожести флористического состава, почвообразующих пород и т. п., чтобы исключить влияние каких-либо факторов, кроме климатических. Соответственно, исследование проводили исключительно в сосновых лесах, большинство из которых были монокультурами *Pinus sylvestris*, хвоя которой и использовалась в большинстве образцов.

От одного до шести раз в год мешочки собирали, заменяя их новыми. После отбора образцов хвою очищали от инородного мусора и анализировали на предмет изменения массы и содержания компонентов — водорастворимых и спирторастворимых веществ, некоторых химических элементов и общего содержания золы. Полученные результаты проверяли на предмет наличия функциональной зависимости между *потерей массы за год* и различных параметров климата (в том числе различных их комбинаций), таких как актуальная эвапотранспирация, средняя температура, температура в июле, сумма осадков, содержание водорастворимых веществ, дефицит влаги, а также исследовали, влияет ли на потерю массы образцов качество субстрата — лесной подстилки, в которой разлагаются образцы. Указанные закономерности, или некоторые из них, авторы исследуют как для всей совокупности объектов, так и для отдельных

географических общностей, например, для площадок в Альпах и Карпатах, для площадок в Скандинавии и Северо-Западной Европе, для площадок в Центральной Европе, — и т. п. В работе (Berg et al., 1993) авторы придерживаются подхода, подразумевающего фиксированную продолжительность экспозиции; в некоторых других работах авторы ведут аналогичные наблюдения в динамике (Staaf, Berg, 1982; Berg et al., 1982). В более поздних работах (Berg et al., 2013) авторы наряду с сосновой хвоей используют листовую массу, собираемую с деревьев в период листопада.

## **ОБРАЗЦЫ НАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Нативным материалом предлагается называть опад или подстилку, собранные в той же самой локации, где им предстоит быть заложенными в виде образцов, с сохранением наибольшей возможной степени соответствия материала в образцах материалу в природе. Именно это и отличает такие образцы от образцов *стандартных* и *стандартизированных* материалов. Нативный материал, в идеальном случае, позволяет последить за процессом разложения, протекающим практически так же, как он протекает в данном биогеоценозе естественным образом.

Полученные при таком подходе данные не всегда позволяют выявить отличия факторов разложения в разных БГЦ. На фактор соответствия разлагаемого материала условиям его разложения и специализации местной биоты обращают внимание M. Portillo-Estrada et al. (2016), закладывая в каждом биогеоценозе одновременно образцы местного нативного материала и аналогичные образцы из других биогеоценозов. Встречаются также исследования с большим набором различных материалов, каждый из которых представляет собой один из компонентов местного детрита (древесина, корни, листья и т. п.), например, E. C. Adair et al. (2008) используют девять «стандартных» материалов, покрывающих значительный диапазон отношений C/N. Схожий подход применяли для изучения скорости разложения детрита в множестве проектов по Тундре, выполнявшихся в рамках Международной биологической программы (ИБР), включавшей также измерение дыхания растительного детрита (Flanagan, Veum, 1974), в частности, некоторые исследователи работали с образцами корней, древесины и других частей местных растений (Heal, French, 1974).

## **ОБРАЗЦЫ СТАНДАРТИЗИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

Чаще всего встречаются исследования, основным предметом которых является естественный процесс разложения древесины в тех или иных БГЦ, а не связь параметров разложения с климатическими параметрами по данным с множества локаций. То есть, авторы рассматривают образцы древесины как *нативный материал*, и древесину для каждой опытной локации выбирают исходя из соответствия местной растительности.

В одной из работ (Bradford et al, 2014) утверждается, что, согласно результатам исследования, разложение древесины не контролируется климатическими параметрами. Авторы отмечают, что увлажнение является одним из важных факторов разложения, но в расчётах в качестве основного климатического фактора используют лишь температуру, на том основании, что она, для исследуемых объектов, хорошо коррелирует ( $R^2 = 0,98$ ) с климатическим индексом разложения (*по* Adair et al., 2008), учитывающим температуру и влажность. Однако, в данной работе внимание сосредоточено в основном не на климатических факторах разложения, а на особенностях колонизации образцов грибами и термитами. Образцы, представляющие собой деревянные блоки размером 15×12×2 см, изготовленные из необработанной сосны, закладывали транsekтами, на склонах северной и южной экспозиции, на 13 месяцев. В блоках были сделаны специальные камеры (nesting chambers), закрытые Плексигласом®. Авторы отмечают важность пространственного расположения каждого блока (вертикально, горизонтально, или внаклон), поскольку оно может влиять на микроклимат и другие условия разложения, а, следовательно, и на скорость последнего, что отмечают и другие авторы (Harmon et al., 1986). Метод использовался также и в других исследованиях авторов (Warren, Bradford, 2012), и основан на более ранних работах разных авторов (Moore et al., 1999; Currie et al., 2010), которые, впрочем, посвящены исследованию разложения листового материала, а не древесины.

Важно отметить, что авторы (Bradford et al, 2014) стремятся исключить местные особенности специализации микробиоты в отношении тех или иных пород широколиственных деревьев — сосновая древесина была выбрана авторами потому, что сосна присутствует во всех локациях, но в небольшом количестве.

Образцы древесины могут иметь различные размеры в зависимости от предполагаемой скорости их разложения. Цельные образцы древесины зачастую не упаковывают в мешочки (Rosswall et al., 1975). Показано, что деревянные блоки могут демонстрировать существенное разложение уже в течение одного года (Boddy et al., 1989).

## **ОБРАЗЦЫ СТАНДАРТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Международная программа комплексного мониторинга предлагает определять разложение с помощью  $\alpha$ -целлюлозы в качестве стандартного материала. Отбеленные листы  $\alpha$ -целлюлозы 1×30×50 мм после определения гигроскопической влажности помещаются в мешочек из терилена или нейлона с размером ячейки 1 мм, по четыре листа в каждый. Два мешочка размещаются на пробной площадке горизонтально на поверхности мха или опада, и покрываются опадом. Для исследования слоя 0—5 см три мешочка помещаются под углом 15°. Мешочки закладываются в сентябре—октябре и отбираются через 1, 2 и 3 года, затем осторожно промываются, определяется потеря массы (Руководство по комплексному мониторингу, 2013).

Целлюлоза довольно широко использовалась в 1970-х гг. в рамках Международной биологической программы (IBP), в частности, при изучении разложения в проектах по тундре (Rosswall, 1974). Предполагается, что этот материал должен быть вполне пригоден для сравнительных исследований. Отмечается, что для целлюлозы, в отличие от опада, не свойственно выщелачивание, что избавляет от ряда сложностей (Berg et al., 1975).

Интересно отметить, что в Руководстве по комплексному мониторингу (2013) не даётся даже примерного указания на стандарт или торговую марку используемой целлюлозы, или достаточно подробного описания её свойств, что делает затруднительным для исследователей получение преемственных данных для объединения с данными других исследователей. Однако, в работах, в которых разложение целлюлозы выступает основным предметом исследования, её химический состав и способы приготовления образцов описываются достаточно подробно (Berg, Roswall, 1972).

### **СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ЧАЯ В ФАБРИЧНЫХ ПАКЕТИКАХ**

Joost A. Keuskamp с соавторами предлагает новый вид стандартного образца для исследования скоростей разложения — чай Lipton™ в пакетиках-пирамидках (Keuskamp et al., 2013). По результатам исследования, проведённого с применением этой методики, рассчитывают так называемый *индекс чайных пакетиков* (the Tea Bag Index, TBI). Как заявляют авторы, чай имеет ряд преимуществ перед большинством материалов, которые использовались прежде.

Чай можно приобрести практически в любой стране или заказать в интернет-магазине. Методика предельно проста в исполнении: чайный пакетик используется как полностью готовый образец. Это позволяет принимать участие в эксперименте людям без специального образования, вплоть до школьников младших классов. В рамках программы TBI выпускается специальный картонный флаер (информационный листок), с помощью которого можно взвесить чайный пакетик, закрепив его на флаере и балансируя его на краю стола. Авторы используют принцип краудсорсинга (*англ.* Crowdsourcing) — в эксперименте участвует широкий круг лиц на добровольных началах, что позволяет вовлечь в эксперимент большое число участников и получить данные по разложению в высоком разрешении, крупном масштабе, и за длительные периоды времени. Одну повторность составляют по одному пакету Lipton green tea и Lipton goobos tea, закладываемые в почву на глубине 8 см на срок 90 дней. По окончании экспозиции определяют остаток массы чая, по возможности — зольность при 550°) и рассчитывают фактор стабилизации ( $S$ ) и скорость разложения ( $k$ ) (Stepwise Protocol, 2017<sup>2</sup>).

Из недостатков метода можно отметить, что поскольку используемый материал не свойственен большинству БГЦ, неизвестно, насколько местное микробное сообщество окажется

---

<sup>2</sup> Интернет-ресурс: <http://www.teatime4science.org/method/stepwise-protocol/>

приспособленным к его разложению. Поэтому нельзя с уверенностью утверждать, о различии каких факторов свидетельствуют наблюдаемые различия скорости разложения.

### 1.4.3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

Наиболее простым, и в то же время достаточно информативным параметром разложения материала в стандартизированном образце, и, соответственно, наиболее часто используемым, является изменение массы. В более детальных исследованиях встречаются данные по изменению содержания тех или иных веществ — водорастворимых соединений, каких-либо химических элементов, а также сведения о динамике колонизации образцов организмами-деструкторами. Можно выделить два основных подхода к представлению данных по изменению массы: (1) в виде зависимости остатка (или потери) массы материала от продолжительности экспозиции — для подробного описания динамики разложения данного материала на данной площадке, и (2) в виде обобщающих показателей, которые позволяют меру изменения массы одного материала на одной площадке свести к единственному значению — к таковым относится константа разложения  $k$ , предложенная Н. Jenny et al. (1949).

Эти два подхода, в целом, не противоречат друг другу, и выбор одного из них зависит от целей и задач исследования, а также от технических возможностей. Более подробно показатели разложения будут рассмотрены в главе «Методы исследований» (стр. 87).

### **СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С ПАРАМЕТРАМИ СРЕДЫ**

Достаточно большой массив сопоставимых данных по множеству опытных площадок позволяет проверить наличие корреляции между параметром образца и параметром среды на опытной площадке. В качестве параметра образца чаще всего используют изменение массы после определённого времени экспозиции (например, потерю массы за год), а в качестве параметра среды — температуру, влажность, или иные параметры.

Так, в работе Б. Берга с соавт. (Berg et al., 1993) приводится попытка найти корреляцию между потерей массы хвои за первый год экспозиции и такими климатическими параметрами как средняя температура, среднегодовое количество осадков, актуальная и потенциальная эвапотранспирация, избыток и недостаток влаги, а также другими параметрами и их комбинациями. Кроме того, авторы аналогичным образом представляли потерю массы образца как функцию других его параметров — начальных содержаний азота, фосфора и водорастворимых компонентов. Оказалось, что годовая актуальная эвапотранспирация является основным фактором, контролирующим скорости разложения — средний коэффициент детерминации  $R^2$  составляет 0,489, а по отдельным группам объектов достигает 0,913; комбинация таких пара-

метров как актуальная эвапотранспирация, средняя температура июля и среднегодовая температура объясняет не менее 66 % локальных отличий по потере массы.

Поскольку в каждом БГЦ складывается особый микроклимат, существенно отличный от микроклимата на участках с другой растительностью и положением в рельефе, для корректной интерпретации данных необходимы значения климатических параметров, характеризующие непосредственно исследуемый участок. Их иногда измеряют напрямую, однако это является довольно сложной задачей в исследованиях на большом числе удалённых друг от друга объектов. Иногда используют данные с ближайших метеостанций с поправками на типы биогеоценозов, основанными на литературных данных о влиянии последних на микроклимат. Существуют специальные модели для расчёта актуальной эвапотранспирации на основании температуры и влажности, измеренных на местности (Parton et al., 1994).

#### 1.4.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ОПЫТЫ ПО РАЗЛОЖЕНИЮ ДЕТРИТА

В дополнение к полевым опытам авторы иногда проводят эксперименты по разложению материалов в контролируемых условиях. Наиболее простой метод заключается в наблюдении за потерей массы образца, разлагающегося в лабораторных условиях. В этом случае отличие от полевого метода исследования заключается в том, что можно получить данные по скоростям разложения материалов при контролируемых температуре и влажности, в то время как в полевых условиях эти параметры не только не контролируемы, но и не всегда известны, а также не являются постоянными на каком-либо временном отрезке.

При использовании материалов, которые не были отобраны непосредственно из подстилки, следует позаботиться о том, чтобы снабдить образцы организмами-деструкторами, которые могут быть поселены в образец, например, с использованием вытяжки из почв или подстилок, собранных в различных локациях, и это предоставляет возможность для получения дополнительной информации за счёт использования разных сочетаний организмов и материалов.

Эмиссию  $\text{CO}_2$  как побочного продукта разложения называют *минерализацией углерода* (Hopkins, 2008). Этот процесс является следствием большого числа разнообразных реакций, осуществляемых самыми разными организмами. Несмотря на то, что эмиссия  $\text{CO}_2$  характеризует реальные процессы в несколько упрощённом виде, в силу относительной простоты и информативности, она широко используется в различных исследованиях, связанных с почвой.

D. W. Hopkins (2008) предлагает три основных подхода к улавливанию  $\text{CO}_2$  и определению его концентрации:

(а)  $\text{CO}_2$  накапливается в свободном пространстве (headspace) закрытой камеры, в которой инкубируется образец, и его концентрация определяется инфракрасным газовым анализатором. Этот метод дешёв, прост, хорошо воспроизводим, но в выделение  $\text{CO}_2$  и поглощение  $\text{O}_2$  в

какой-то момент приводит к замедлению деструкции. Метод непригоден для щелочных почв, поскольку  $\text{CO}_2$  будет улавливаться почвенным раствором.

(б) Образец инкубируется в закрытой камере, а  $\text{CO}_2$  улавливается щёлочью или иным способом. Метод подходит как для кратковременных опытов, так и для длительных, но в последнем случае также может возникнуть дефицит кислорода. Недостаток метода в том, что он либо дорог, если  $\text{CO}_2$  улавливается автоматическим многоканальным респирометром, либо трудоёмок, если  $\text{CO}_2$  улавливается щёлочью, которую затем титруют вручную. Этот же метод предлагается в Руководстве по комплексному мониторингу (2013).

(в) Образец инкубируется в открытой камере, при постоянном продувании пространства камеры и определении  $\text{CO}_2$  в потоке воздуха. Метод подходит для любой длительности, однако он дорог, требует сложного оборудования, и трудно воспроизводим (Hopkins, 2008, p. 591).

#### 1.4.5. ВЫВОДЫ О ПОДХОДАХ К ОРГАНИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ

По всей видимости, не существует метода, который позволял бы с равным успехом использовать один и тот же стандартный материал для исследования разложения в широком диапазоне условий. Целлюлоза, чай, и любые другие стандартные материалы отличаются от местного детрита по химическому составу, по физическим свойствам и структуре частиц материала, по степени соответствия специализации местных организмов-деструкторов, из-за чего скорость разложения этих материалов на разных опытных площадках может непропорционально отличаться от скорости разложения местного детрита.

Во многих случаях возникает следующая проблема: остаётся неясным, о различии какого именно фактора свидетельствует наблюдаемое различие в скорости разложения. Решением этой проблемы для исследователя может быть или поиск в литературе данных о ведущих факторах разложения материалов, или самостоятельное получение таких данных в ходе исследований в широком диапазоне климатических условий с использованием нескольких материалов.

Исследования, посвящённые процессам разложения, отчётливо дифференцируются на два принципиальных подхода, в зависимости от целей и задач исследования: 1) *наблюдение* за разложением нативных материалов, протекающим под влиянием всей совокупности факторов, безотносительно того, известны ли они и есть ли возможность оценить влияние каждого из них, проводимое с минимальным вмешательством в естественный ход процессов; 2) *эксперимент* по разложению стандартных или стандартизированных материалов, имеющий целью оценить влияние тех или иных условий среды на их разложение.

Таким образом, принципиальные подходы к организации наблюдений за разложением определяются целями и задачами исследования, а также ограничениями, которые накладываются особенностями исследуемых биогеоценозов, характеристиками разлагаемых материалов, а также возможностью получить необходимые климатические и другие параметры для исследуемых объектов.

## **1.5. ОСОБЕННОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ И ДЕТРИТОГЕНЕЗА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ**

Публикуется большое число работ, посвящённых городским почвам. Развиваются системы методов и показателей для оценки экологического состояния городских почв (Строганова и др., 2003; Сизов и др., 2001 *и прочие*), подходы к классификации городских почв (Прокофьева и др., 2014); выходят работы, посвящённые микробным сообществам (Степанов и др., 2005), оценке риска и ущерба от техногенного загрязнения (Макаров, Макаров, 2016) и многим другим аспектам. Среди недавних работ, посвящённых этой теме, встречаются исследования физико-химических и микробиологических параметров почв общественных зелёных зон в контексте оценки возможного влияния на здоровье жителей (Beroigui et al., 2020), исследования элементного состава почв (Osipova et al., 2014; Foti et al., 2017) и геохимии элементов в городских почвах (Konstantinova et al., 2019; Kaushal et al., 2020), исследования растворённого органического вещества почв и влияния антропогенных факторов на его состав (Tang et al., 2021). Некоторые исследователи изучают влияние различных типов искусственного органического почвенного покрова на поглощение и удержание влаги, и перспективы его использования в городских парковых насаждениях (Zhang et al., 2021). В метаисследовании S. De Silva et al., посвящённом автомобильным выбросам и их влиянию на придорожные почвы, а также обитающую в них биоту и растительность, показано, что потенциально токсичные элементы в придорожных почвах влияют на микробную активность, включая снижение разложения подстилки, азотфиксации, круговорота питательных веществ и синтеза ферментов (De Silva et al., 2021).

Кроме того, исследуются последствия антропогенного воздействия на почвы и подстилки вне городов, в том числе особенности почвообразования на вырубках, включая состояние напочвенного покрова. Так, А. А. Дымов отмечает, что *«существенное влияние на сукцессию растений напочвенного покрова оказывают изменения микроклиматических условий и водного режима почв»* (Дымов, 2017). При этом отмечается, что, в зависимости от дренированности почв или почвообразующих пород, а также от положения в рельефе и других факторов, последствия вырубок могут проявляться как в снижении, так и в увеличении общей мощности подсти-

лок (*там же*). Вместе с тем, работы, посвящённые именно наземному детриту — опаду и подстилкам городских биогеоценозов, встречаются относительно редко.

Изучение городских и искусственных почв способствовало некоторому переосмыслению самого понятия «почва». Часто для описания значительно нарушенных почв городов авторы используют термин «почвоподобные тела» (использование этого термина подробно обсуждает Е. А. Дмитриев, 1996), подчёркивая, что многие городские почвы существенно отличаются от естественных, и не подходят под определение *естественно-исторического тела*. Г. В. Добровольский полагает, что ключевым свойством почвы является не столько плодородие, сколько наличие набора экологических функций (Добровольский, Никитин, 1990) — такой взгляд позволяет вернуться к термину «почва» применительно к почвам городов. Вместе с тем, непонимание специфики городских почв и факторов почвообразования влечёт некорректную оценку почвенных свойств, и, как следствие, непродуктивные попытки их рекультивации (Смагин и др., 2006).

В различных работах (Строганова и др., 1997; Герасимова и др., 2003; Почва, город, экология, 1997; Bullock, Gregory, 1991 и др.) даются исключительно подробные обзоры факторов и особенностей городского почвообразования вообще, и московского в частности, поэтому нет смысла повторять их с избыточной подробностью. Обозначим наиболее важные из них.

Значительные площади поверхности почвы в городах, в частности, в Москве, запечатаны или захлаплены, а оставшиеся участки, всё ещё пригодные для произрастания растительности, испытывают значительное влияние антропогенных факторов. Среди них — подтопление и заболачивание, загрязнение приземного воздушного слоя, поступление загрязняющих веществ, в т. ч. тяжёлых металлов, превышение норм рекреационного использования. Результатом является переуплотнение корнеобитаемого слоя, истощение и нарушение органофилия, уменьшение биоразнообразия микрофлоры и почвенной мезофауны, её структурные изменения, заражение патогенными микроорганизмами, изменение кислотности и щёлочности почв, нарушение биологического круговорота (Строганова и др., 1997). В запечатанных почвах и грунтах парниковый эффект обуславливает недостаточность аэрации и избыточную влажность грунта, что приводит к разрушению фундаментов и к повышению влажности в подвалах (*там же*).

При этом запечатанность почв Москвы, уровень антропогенной нагрузки и степень выраженности последствий этих явлений неуклонно возрастали прежде (О состоянии окружающей природной среды..., 1993), и продолжают возрастать в настоящее время.

Городские почвы развиваются одновременно под влиянием тех же **факторов**, что и зональные, а также под влиянием специфических факторов, связанных с антропогенным воздействием, причём влияние последних варьирует, и зависит от множества различных обстоятельств. Превышение температуры поверхности почв в Москве по сравнению с окружающими тер-

риториями составляет 1—2°C, и может достигать до 10°C. Превышение суточных температур воздуха в городе по сравнению с загородными территориями может достигать 11—14°C, а в центре по сравнению с окраинами — 2,0—2,6°C. Устойчивый снежный покров устанавливается позже, а сход снега происходит раньше, и соответственно длительность вегетационного периода увеличивается. В городе выпадает больше осадков, чем на фоновых территориях, но в почву их попадает меньше (Строганова, Агаркова, 1992; Почва, город, экология, 1997).

Особенностью городских почв является то, что они нередко формируются на культурном слое, или на техногенных отложениях, и почвообразующие породы отличаются неоднородностью даже в пределах небольших участков, а в почвенном профиле встречаются самые разнообразные антропогенные включения (Строганова, Агаркова, 1992; Почва, город, экология, 1997). Более того, в некоторых случаях, когда почва формируется одновременно с накоплением новых техногенных отложений, можно говорить о *синлитогенном* характере почвообразования (Прокофьева и др., 2014). Рельеф в городах подвергается искусственной корректировке — засыпаются овраги, срезаются холмы, в результате чего рельеф в целом несколько сглаживается.

В городских почвах снижается таксономическое разнообразие микроорганизмов и их биологическая активность (Герасимова, 2003; Почва, город, экология, 1997). В городах повышается встречаемость растений, естественные ареалы которых располагаются в более тёплом климате (Sukopp et al., 1978).

Почва выполняет ряд **экологических функций** (Добровольский, Никитин, 1990), из которых для города наиболее важны продуктивность, способность сорбировать загрязняющие вещества, деструкция органических веществ и их соединений, а также предотвращение поступления пыли в городской воздух (Герасимова и др., 2003; Почва, город, экология, 1997). Почва в условиях города приобретает особое значение как биогеохимический барьер на пути следования тяжёлых металлов, пестицидов, нефтепродуктов и т. п. из атмосферы города в грунтовые воды и речную сеть (Строганова и др., 1997). Экологические функции являются ключевым моментом для понимания сущности процессов деградации почв, и характеризующие их показатели могут быть положены в основу нормативно-правовых актов, касающихся оценки, нормирования и охраны почв (Яковлев и др., 2015).

Важная особенность многих городских биогеоценозов, которой до сих пор, по всей видимости, не было уделено должного внимания, — их **малая площадь и протяжённость**, точнее — большое отношение периметра биогеоценоза к его площади. Очевидно, что чем больше периметр биогеоценоза, тем более выраженными будут различные краевые эффекты. Большое отношение периметра к площади наиболее значимые последствия влечёт для древесных насаждений, поскольку к прочим краевым эффектам добавляется ещё и интенсивный вынос опада. Если биогеоценоз соседствует с насаждениями другого флористического состава, следует ожидать

интенсивного обмена опадом, который будет приводить к формированию в БГЦ подстилок нетипичного для них состава, а, следовательно, к нетипичному характеру процессов их разложения. Впрочем, нет основания расценивать эти явления как вредные для экосистемы, но их следует учитывать при интерпретации данных о разложении материалов, о структуре и составе детрита и гумуса в сравнении с фоновыми территориями. Если биогеоценоз соседствует с объектами инфраструктуры (дорогами, тротуарами, предприятиями и т. п.), неизбежен интенсивный некомпенсированный вынос опада, следствием которого будет безвозвратное отчуждение органического вещества и питательных элементов. Неизбежен также и привнос мусора и загрязняющих веществ, мера которого также будет зависеть от отношения периметра к площади.

Кроме того, перенос опада — это явление, с помощью которого реализуется принцип взаимоотношаемых биогеоценозов по Ю. П. Бялловичу (1973), согласно которому сходные БГЦ рассматриваются как резерваты организмов, которые могут поспособствовать восстановлению уничтоженных или нарушенных биогеоценозов. Перенос опада в неоднородных или ограниченных по площади городских древостоях является важным их отличием от естественных. Если в однородных насаждениях большой протяжённости вынос опада на каждом участке будет более или менее скомпенсирован привносом с соседних, то в случае с небольшими по площади ФЦ он или будет скомпенсирован привносом опада иных видов растений, или не будет скомпенсирован вовсе.

Таким образом, изучение специфических и разнообразных факторов и особенностей городского детритогенеза представляет собой перспективное направление для исследований, включая разработку и совершенствование соответствующих методов и подходов.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследование включены объекты в широком зональном диапазоне — от зоны смешанных лесов до зоны сухих степей (рис. 3).

В качестве объектов **урбанизированных территорий** были выбраны модельные биогеоценозы стационарных почвенных лизиметров МГУ им. М. В. Ломоносова и шесть модельных лесных биогеоценозов в Ботаническом саду МГУ. Наиболее детальные исследования проводились в биогеоценозах БС МГУ, и включали исследование поступления растительного опада и его переноса, исследование процессов разложения с использованием стандартизированных об-



разцов, а также изучение запасов и структурно-функциональной организации подстилок. На лизиметрах преимущественно велись наблюдения за растительным опадом.

В качестве объектов, **не испытывающих значительной антропогенной нагрузки**, были выбраны лесные биогеоценозы, расположенные поблизости от УОПЭЦ МГУ «Чашниково», в настоящее время лишь в незначительной степени затронутые антропогенной деятельностью.

Кроме того, исследования проводились в зональных и интразональных БГЦ **по маршруту** ежегодной **зональной практики** студентов второго курса факультета почвоведения МГУ. Основной целью исследований на объектах в зональном ряду было опробование используемой модификации метода стандартизированных образцов и получение преимущественных данных для сопоставления с результатами, получаемыми по основным объектам исследований.

Табл. 5. Основные климатические характеристики объектов исследования (Научно-прикладной справочник по климату, 1990 — вып. 8, 13 и 28).

Группы объектов (номера площадок)	Метеостанция (№ в соотв вып. Справочника)	№ вып. Справочника	Суммарная солн. радиация (Q), МДж/м <sup>2</sup> ·год	Радиационный баланс дежт. по-верхн., МДж/м <sup>2</sup> ·год	Температура воздуха среднегодовая, °С	Температура поверхн. почвы среднегодовая, °С	Отн. влажность воздуха среднегодовая, %	Число дней с отн. влажн. воздуха ≤ 30%	Число дней с отн. влажн. воздуха ≥ 80%	Сумма осадков годовая, мм	Из них жидких осадков, мм	Число дней без осадков
БС МГУ (26—31)	МГУ (5)	8	3685	1263	4,7	5	76	—	—	664	422	—
	обс. им. Михельсона (2)		—	—	4,1	5	76	—	—	644	415	40
	Лосиноостровская (1)		—	—	4,6	5	76	—	—	640	405	48
	ВДНХ (3)		—	—	4,7	5	75	22	9	677	422	52
	<i>Среднее</i>		<b>3685</b>	<b>1263</b>	<b>4,5</b>	<b>5</b>	<b>76</b>	<b>22</b>	<b>9</b>	<b>656</b>	<b>416</b>	<b>47</b>
Чашниково (18—23)	Подмосковная (11)	8	3608	1420	3,7	4	78	—	—	598	402	—
	Ново-Иерусалим (9)		—	—	3,9	5	79	—	—	616	414	39
	<i>Среднее</i>		<b>3608</b>	<b>1420</b>	<b>3,8</b>	<b>4,5</b>	<b>78,5</b>	—	—	<b>607</b>	<b>408</b>	<b>39</b>
Тульские засеки (1—3)	Советск (3)	28	3673	1582	—	—	—	—	—	—	—	—
	Тула (2)		—	—	4,7	5	76	24	113	598	403	50
Полибино (4—7)	Мценск (13)	28	—	—	4,9	6	78	19	119	619	426	44
	Моршанск (4)		—	—	4,6	6	75	33	114	547	371	32
	<i>Среднее</i>		—	—	<b>4,8</b>	<b>6</b>	<b>76,5</b>	<b>26</b>	<b>117</b>	<b>583</b>	<b>399</b>	<b>38</b>
Хреновое; Каменная степь (8—14)	Каменная степь (18)	28	4134	1460	—	—	—	—	—	—	—	—
	Воронеж (16)		—	—	5,6	7	74	38	108	539	389	50
Качалино (15, 16)	Волгоград, СХИ (5)	13	4663	1872	8,0	10	68	73	105	386	246	131
	Фролово (3)		—	—	6,6	9	70	77	87	432	308	31
	<i>Среднее</i>		<b>4663</b>	<b>1872</b>	<b>7,3</b>	<b>9,5</b>	<b>69</b>	<b>75</b>	<b>96</b>	<b>409</b>	<b>277</b>	<b>81</b>
<i>№ табл. в Справочнике</i>			<i>1.10</i>	<i>1.11</i>	<i>2.1</i>	<i>2.22</i>	<i>4.7</i>	<i>4.13</i>	<i>4.15</i>	<i>4.23</i>	<i>4.24</i>	<i>4.31</i>

В табл. 5 приводятся основные климатические характеристики объектов исследования, согласно Научно-прикладному справочнику по климату (1990). Для группы объектов в УОПЭЦ «Чашниково» (Московская обл., зона смешанных широколиственно-еловых лесов) выбраны метеостанции «Подмосковная» и «Ново-Иерусалим» (в наст. время — «Лучинская»), расположенные к западу и северо-западу от Москвы, примерно на том же расстоянии, что и УОПЭЦ «Чашниково». Для группы объектов в **Тульских Засаках** (Тульская обл., зона широколиственных лесов) выбраны метеостанции «Тула» (~ 25 км к северу) и Советск (на той же широте). Для объектов в **Полибино** (Липецкая обл., зона лесостепей) — метеостанции «Мценск» (Орловская обл.) и «Моршанск» (Тамбовская обл.), расположенные примерно на той же широте, но в ~ 160 км к востоку и в ~ 185 км к западу соответственно. Для объектов в **Хреновском бору** и в заказнике **Каменная степь** (Воронежская обл., южная граница распространения лесостепей) приведены данные по метеостанции, расположенной в заказнике, а при отсутствии таковых на этой метеостанции — по метеостанции Воронежского сельскохозяйственного института, расположенной в ~ 60 км к северу. Для объектов в **Качалино** (Волгоградская обл., зона сухих степей) использовали данные по метеостанции «Волгоград» (~ 45 км к югу), или средние значения по метеостанции «Волгоград» и «Фролово» (~ 70 км к северу).

В табл. 6 приведены основные сведения об объектах исследования. Далее будет приведено более подробное описание исследуемых биогеоценозов, включающее как авторские наблюдения, так и некоторые сведения из литературы.

Табл. 6 (окончание на след. стр.). Основные сведения об исследуемых объектах.

Обозначения: «—» — нет данных; \* — почвы близлежащих территорий, схожих по типу растительности и положению в рельефе (для площадок, вблизи которых почвы не описаны).

Географич. положение	№ площадки	Название	Основные растения-эдикаторы	Подстилка	Почва
Зона смешанных (широколиственно-еловых) лесов — Московская обл., Чашниково	18	Переувлажнённый смешанный лес	Ель, клён, берёза	Деструктивная	Дерновая грунтово-глееватая *
	19	Ельник-кисличник	Ель	Гумифицированная	Дерново-подзолистая *
	20	Смешанный лес	Берёза, осина, ель	Деструктивная	Болотно-подзолистая
	21	Лиственный лес	Берёза, клён, липа	Деструктивная	Дерново-подзолистая *
	22	Залежь берёзовая	Берёза (10—15 лет); злаковые травы	Деструктивная (лиственно-травяная)	Дерново-подзолистая (среднесмытая)
	23	Залежь берёзовая			Дерново-подзолистая (слабосмытая)
Зона широколиственных лесов — Тульская обл.	1	Широколиственный лес	Липа; клён, ясень, лещина	Деструктивная	Серая лесная глеевая
	2	Лесополоса берёзовая	Берёза; злаковые травы	Деструктивная	Серая лесная *
	3	Широколиств. лес	Липа; клён, ясень	Деструктивная	Серая лесная

Географич. положение	№ площадки	Название	Основные растения-эдикаторы	Подстилка	Почва	
Зона лесостепей — Липецкая обл.	4	Широколиств. лес	Клён; липа	Деструктивная	Чернозём типичный	
	5	Лесополоса осиновая	Осина	Деструктивная (листв.-травяная)	Чернозём типичный	
	6	Лесополоса липово-кленовая	Клён, липа	Деструктивная (лиственная)	Чернозём типичный *	
	7	Залежь	Злаковые; редкие кустарники	Деструктивная (травяная)	Чернозём типичный	
Южная граница зоны лесостепей — Воронежская обл.	Солонцов. комплекс	8	Осиновый лес	Осина; берёза, клён	Деструктивная, ферментативная	Солодь чернозёмная
		9	Луг разнотравно-злаковый	Злаковые; клевер и др.	Деструктивная (травяная)	Лугово-чернозёмная
	Хреновской бор	12	Смешан. лес в понижении	Сосна, дуб; лещина и др.	Ферментативная, гумифицирован.	Серые лесные или чернозёмовидные на песках *
		13	Редколесье на возвышении	Сосна, злаковые, крапива	Гумифицированная (хвойная)	
		14	Смешанный лес на возвышении	Сосна, дуб	Гумифицированная	
	Каменная степь	10	опытный участок Лесополоса	Широколиственный лес: липа, клён	Деструктивная	Чернозём обыкновенный
11		опытный участок Некосимая степь	Сложные группировки деревьев и кустарников	Деструктивная, ферментативная	Чернозём обыкновенный	
Зона сухих степей — Волгоградская обл.	15	Лесополоса дубовая	Дуб; ясень, смородина	Деструктивная, ферментативная	Каштановая *	
	16	Степь типчаково-полынная	Полынь, типчак	Деструктивная	Каштановая	
Ботанический сад МГУ	Хвойные	27	Лиственничник	Лиственница даурская; клён, рябина и др.	Ферментативная, гумифицированная	Технодерново-подзолистая (на покровном суглинке)
		29	Сосняк	Сосна; ясень, бузина и др.	Деструктивная	Серогумусовая (на техногенных отложениях)
		31	Ельник	Ель сибирская; клён, рябина и др.	Деструкт., фермент., гумифицир.	
	Лиственные	26	Тополёвник	Тополь белый; клён, рябина и др.	Деструктивная	—
		28	Берёзово-кленовая полоса	Клён, берёза	Деструктивная	—
		30	Грабинник	Граб обыкновенный	Деструктивная	—
Лизиметры МГУ	29, 30	Чистый пар	(Отсутствуют)	(Отсутствует)	(Покровный суглинок)	
	31—34	Ельник	Ель; берёза, рябина, вяз, ива и др.	Деструктивная	Слаборазвитые (пелозёмы)	
	35—38	Смешанный лес	Берёза, ель, дуб, клён	Ферментативная		
	39—42	Широколиственный лес	Дуб, клён, берёза, осина и др.	Ферментативная		
	43, 44	Залежь травяно-кустарниковая	Клён, ясень	Деструктивная (лиственная)	Слаборазвитые (пелозёмы гумусовые)	
	45—48	Залежь травяная	Злаковые травы	Деструктивная (травяная)		

## 2.1. ГОРОДСКИЕ ТЕРРИТОРИИ В ЗОНЕ СМЕШАННЫХ ЛЕСОВ, МОСКВА

Несмотря на то, что исследуемые группы объектов — лизиметры и Ботанический сад МГУ — располагаются в непосредственной близости друг от друга, между ними есть принципиальная разница. ФЦ лизиметров, в отличие от фитоценозов БС МГУ, развиваются на очень малой площади (8,27 м<sup>2</sup> каждый) и имеют ограниченное пространство для развития корневых систем. Другое принципиальное отличие состоит в том, что ФЦ лизиметров произрастают на бедных покровных суглинках, а фитоценозы БС МГУ — на выровненных и удобренных почвах. Эти группы объектов отличаются также по степени современного антропогенного воздействия, по возрасту и структурной организации древостоев. Таким образом, БГЦ лизиметров имеют дополнительные антропогенные факторы и свойства, влияющие на особенности их развития.

Общим свойством БГЦ лизиметров и БС МГУ является их малая площадь и протяжённость, и, соответственно, высокое отношение периметра к площади. Это обуславливает повышение значения таких краевых эффектов, как загрязнение от автомобильных дорог и перенос растительного опада, приводящий как к межбиогеоценозному обмену, так и к безвозвратному выносу органического вещества.

Из факторов, влияющих на формирование специфических свойств городских почв, и определяющих «урбанизированность» исследуемых территорий, в настоящее время решающее значение имеют общие особенности городского климата и воздушно-пылевое загрязнение. Городской климат заметно отличается от окружающих территорий. Разница в климате города и окрестностей иногда равнозначна передвижению на 200—300 км к югу (Почва, город, экология, 1997, с. 41). В городской атмосфере создаются очаги тепла и пыли, которые существенно влияют на температуру воздуха и на атмосферные осадки. Разница температур поверхности городской почвы и почвы фоновых территорий может достигать 10°С. В городе происходит ранний сход снега, в отдельные годы снежный покров держится всего 2—3 месяца, следовательно, увеличивается продолжительность вегетационного периода. Повышенная конвективность атмосферы города и её техногенная запылённость приводят к увеличению числа гроз, к росту интенсивности ливневых дождей и общего количества осадков. Годовая сумма осадков в Москве превышена на 25 % и составляет 545—844 мм. Отмечен большой разброс в количестве осадков по сезонам и по годам (Справочник..., 2005, т. 2).

Другой особенностью почвообразования в городе является атмосферно-пылевое загрязнение. Масса пыли, ежесуточно поступающей на поверхность почвы (Воробьёвы горы) составляет 78 мг/м<sup>2</sup>, что в 4—6 раз выше фонового уровня. Пыль содержит много карбонатов Mg и Ca, поступающих с автомагистралей и при выветривании строительного раствора. Поступление

этих элементов можно оценить по следующим данным: выпадения  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  на территориях, прилегающих к городским улицам (75 м от проезжей части) в течение зимы 1998—1999 гг. составили соответственно 863,6 мг/м<sup>2</sup> и 156,7 мг/м<sup>2</sup> (Первова, 2014).

Исследования снежного покрова, проведённые совместно с коллегами<sup>3</sup>, показывают, что в пробах снега Гагаринского района Москвы, взятых в непосредственной близости от автомобильных дорог, обнаруживаются высокие концентрации кальция, магния, натрия, железа, алюминия, стронция и бария, а из анионов — сульфатов, гидрокарбонатов и хлора, а также наибольшие величины плотного остатка по сравнению с объектами подмосковных ландшафтов (Чашниково), а также с лизиметрами почвенного стационара и БГЦ Ботанического сада. Загрязнение городских территорий Гагаринского района тяжёлыми металлами характеризуется как слабое. Снега лизиметров по концентрации большинства элементов занимают промежуточное положение среди всех городских объектов. По сравнению с прочими городскими территориями здесь наблюдается превышение по железу, марганцу, алюминию и стронцию. Биогеоценозы лизиметров и БС МГУ (исследования проводились в основном в тех же биогеоценозах БС МГУ, что и в настоящей работе) характеризуются слабым загрязнением тяжёлыми металлами, а концентрации прочих элементов и анионов не превышают ПДК для природных вод (Нормативы ..., 2016). Биогеоценозы БС МГУ оказались наименее загрязнёнными среди исследованных городских объектов, и по сравнению с лизиметрами демонстрируют превышение лишь по калию, никелю и цинку, а концентрации кадмия и ртути — наименьшие среди исследуемых объектов. Кластерный анализ показывает, что по химическому составу снега биогеоценозы БС МГУ сближаются с БГЦ Чашниково, принятыми за фоновые, в то время как лизиметры и городские территории образуют отдельные группы.

Одна из причин выбора указанных объектов состоит в том, что они расположены на огороженных территориях, что важно с точки зрения сохранности образцов и оборудования, размещаемых на объектах на длительное время.

### 2.1.1. ЛИЗИМЕТРЫ ПОЧВЕННОГО СТАЦИОНАРА МГУ

Лизиметрический эксперимент обычно используют для наблюдения за объёмом и химическим составом вертикального внутрипочвенного стока. Однако возможности такого эксперимента могут быть значительно шире, когда лизиметрические установки имеют большие размеры и

---

<sup>3</sup> В данном абзаце приводятся данные исследований, проведённых при участии соискателя и опубликованных в совместной работе: Богатырев Л.Г., Жилин Н.И., Самсонова В.П., Якушев Н.Л., Кириллова Н.П., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И., Карпунин М.М., Ладонин Д.В., Вартанов А.Н., Демин В.В. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмосковья. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2018. — № 2. — С. 85—96. Личный вклад соискателя 10 %.

фактически являются моделями экосистем, включая почвы, и когда основные параметры функционирования этих экосистем известны. ФЦ лизиметров почвенного стационара МГУ высажены искусственно, и существуют в условиях городской среды, что делает их ценным объектом исследования. Кроме того, исследование особенностей биологического круговорота в БГЦ лизиметров представляет интерес и в контексте основной изначальной цели создания данных лизиметров — изучения начальных стадий почвообразования на покровном суглинке.

Исследования, проводимые на лизиметрах, могут быть интересны с точки зрения достоверности данных, получаемых на небольших пространствах. Выдающийся ботаник и почвовед, академик Б. А. Келлер писал, что участок, выбранный для проведения исследований, *«должен быть достаточно велик (...) и достаточно однороден и по преобладающей на нём растительности, и по условиям внешней обстановки, и с этой точки зрения маленькие участки надёжнее»* (Келлер, 1914, *цит. по* Двадцать пять лет научно-педагогической ... деятельности Б. А. Келлера, 1931).

## **ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКИ**

В комплексе сооружений почвенного стационара МГУ им. М. В. Ломоносова (Ленинские горы, д. 1, с. 28, координаты: N 55°708842, E 37°524067) имеются две открытые лизиметрические площадки, а также две лизиметрические площадки под теплицами (Ленинские горы, д. 1, с. 30А и 30Б). Объектом настоящей работы являются открытые лизиметры №№ 29—48 (Ленинские горы, д. 1, с. 30Б). Лизиметры №№ 5—24 находятся в ведении кафедры физики почв факультета почвоведения МГУ, и в настоящей работе не исследуются. Лизиметры №№ 1—4 и 25—28, расположенные под теплицами, в настоящее время не функционируют.

Лизиметры заложены в 1967 г. под руководством Н. А. Качинского. Площадь поверхности почвы каждого лизиметра 8,27 м<sup>2</sup> (по результатам измерений; не считая бортов и переборок, имеющих ширину около 30 см), глубина 1,5 м. Бункеры их засыпаны бескарбонатным покровным суглинком, взятым из карьера в Подольской обл. с глубины 130—280 см (Винник, Большев, 1972). Стоки лизиметров выводятся в подземную галерею, в которой установлены счётчики лизиметрических вод и ёмкости для накопления проб для анализов.

Лизиметрическая площадка (рис. 4) соседствует по юго-западной стороне с однополосной автомобильной дорогой, а по юго-восточной стороне — с расширением проезжей части той же дороги. Площадка огорожена сетчатым забором на бетонном основании. Со стороны дороги к забору прикреплены пластиковые щиты (с 2013 года) для защиты лизиметров от поступления снега, сбрасываемого с дороги при её очистке (*см. с. 57*).

По северо-восточной стороне площадка вплотную примыкает к территории БС МГУ, а с северо-западной стороны — к теплице, которая в 2017 году была реконструирована, в процессе

чего на лизиметры №№ 29—30 поступало небольшое количество строительного мусора (осколки стекла, штукатурка и т. п.), и почва подвергалась незначительному вытаптыванию.

После постройки лизиметров в них были созданы модельные БГЦ, расположенные в следующем порядке. Лизиметры №№ 29 и 30 предполагалось поддерживать в состоянии чистого пара. На лизиметрах №№ 31—34 были высажены ели (*Picea abies* (L.) H. KARST.) — 61 саженец на каждый лизиметр. На лизиметрах №№ 35—38, где предполагалось смоделировать смешанный лес, высажено по 30 саженцев ели, по 16 — дуба (*Quercus robur* L.) и по 15 — клёна (*Acer platanoides* L.). На лизиметрах №№ 39—42 высажены по 31 саженцу дуба и по 30 — клёна. Лизиметры №№ 43—46 были отведены под луговую растительность, а лизиметры №№ 47 и 48 — под севооборот (Винник, Большев, 1972). Таким образом, к 2020 году возраст растений, сохранившихся от изначальных посадок, составляет около 53 лет, не считая возраста саженцев.



Рис. 4. Схема лизиметрической площадки.

Серым цветом обозначены бетонные переборки; пунктирной линией — сетчатое ограждение.

Наименования фитоценозов даны в соответствии с их современным состоянием.

Надлежащий уход за развивающимися на лизиметрах фитоценозами, который должен был включать вырубку занесённых видов деревьев, поддержание севооборота, вспашку чистого пара и т. п., обеспечивался не всегда. Уже довольно длительное время ФЦ лизиметров развиваются естественным образом, в результате чего фактический состав древостоя на лизиметрах №№ 31—42 (лес) не вполне соответствует номинальному, лизиметры №№ 43—44 и, в меньшей степени, лизиметры 45—46 (изначально — травы) постепенно зарастают древесно-кустарниковой растительностью (рис. 4).

Г. В. Золотарев отмечает, что, по состоянию на 2006 год, на лизиметрах №№ 31—34 (еловый лес) насчитывалось 188 елей (из 244 высаженных), на лизиметрах №№ 35—38 (смешанный лес) — 104 ели (из 120), 24 дуба (из 64) и 41 клён (из 60), а на лизиметрах №№ 39—42 (широколиственный лес) — 83 дуба (из 124) и 41 клён (из 120) (Золотарев, 2006).

**Лесные подстилки** лизиметров по своему строению в целом соответствуют зрелым БГЦ, чего, в силу незначительного времени почвообразования, нельзя сказать обо всей минеральной

толще, которая, в принципе, гораздо медленнее приобретает признаки протекания тех или иных процессов почвообразования (Vesterdal et al., 2002). В зоне активного влияния процессов гумусообразования преимущественно находится самая верхняя часть почвы, которая, в данном случае, и является доступной для детального исследования. Таким образом, для оценки различий в агрегатном составе почв достаточно ограничиться глубиной в 15 см (Бирюков и др., 2014).

По данным И. А. Верховец, к 2005 г. в лизиметрах сформировались **почвы**, относящиеся к отделу слаборазвитых почв, к типу *пелозёмов* (под еловыми, смешанными и широколиственными насаждениями, лизиметры 31—42) и *пелозёмов гумусовых* (почва под многолетними травами — лизиметры 43—48) (Верховец, 2005). Изучение изменений в верхней части почвогрунта позволяет сделать заключение, что на лизиметрах сформировались маломощные почвы, дифференцированные на горизонты подстилки и минеральные гумусово-аккумулятивные горизонты. Отмечено накопление органического вещества в верхних слоях почвогрунта. Морфологическое строение почв и особенности формирующихся органопрофилей в значительной степени зависят от типа ФЦ, под которым идёт почвообразование (Первова, 2014).

Площадки лизиметров долгое время были подвержены воздействию противогололёдных реагентов при механизированной очистке автомобильной дороги, причём большая часть сбрасываемого снега поступала на лизиметры ближнего к дороге ряда (см. рис. 4), в то время как лизиметры другого ряда практически не были этому подвержены. То же явление наблюдалось в берёзово-кленовой защитной полосе БС МГУ, расположенной со стороны Ломоносовского проспекта, зимой 2017—2018 гг., в меньшей степени — и в другие годы. Предыдущие исследования автора и коллег показывают, что воды загрязнённых лизиметров, по сравнению с водами относительно чистых лизиметров, содержат в 7,2 раза больше хлора, в 5,1 раза больше кальция, в 4,5 раза больше магния (Богатырев, Ладонин и др., 2017). По сравнению с начальными этапами функционирования (1967—1968 гг.), к 2014—2015 гг. среднее содержание кальция, магния и натрия увеличилось в среднем в 2 раза, калия — в 7 раз, хлора — в 9 раз (*там же*). После установки защитных экранов в 2013 г. наметилась тенденция к снижению содержания этих элементов в лизиметрических водах (Земсков, Жилин и др., 2017). В составе химических противогололёдных реагентов используются хлориды натрия, кальция, магния, ацетаты калия и аммония, карбамидно-аммиачная селитра, нитраты кальция и магния, мочевины (Рук. по борьбе с зимней скользкостью ..., 2003) а также различные функциональные добавки и присадки.

Отметим, что почвы лизиметров неоднократно подвергались бурению, что могло привести к изменению потоков влаги. Например, в рамках исследований Г. В. Абросимовой таким способом было отобрано 50 проб с максимальной глубины 71 см (Абросимова, 2016, стр. 53). В 2013—2016 гг. на поверхности почв некоторых лизиметров отмечали единичные лунки, которые, по всей видимости, могли быть сделаны буром-пробоотборником.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОДСТИЛОК ЛИЗИМЕТРОВ<sup>4</sup>

Важной особенностью лизиметров является интенсивный перенос опада, включающий как межбиогеоценозный обмен, так и безвозвратный вынос за пределы биогеоценозов. В силу близкого расположения площадок и их малой площади, перенос опада, по всей видимости, имеет здесь существенно большее значение, чем в БГЦ Ботанического сада, где вынос опада из каждого биогеоценоза хотя бы отчасти скомпенсирован привнесом из соседних. Лизиметры же располагаются в отдалении от других насаждений, из которых опад мог бы приноситься, при этом высота деревьев в несколько раз превышает линейные размеры лизиметров, а кроны деревьев в некоторых местах выступают за границы лизиметров на 50—100 см и более.

### *Чёрный пар — лизиметры №№ 29 и 30*

Регулярная вспашка на этих лизиметрах возобновлена в 2013 году и с тех пор проводится ежегодно. Встречающиеся здесь немногочисленные рудеральные растения при этом запахиваются. Поступление опада незначительно, подстилка не формируется.

### *Еловый лес — лизиметры №№ 31—34*

**Растительность** — еловый (*Picea abies* (L.) H. KARST.) лес с примесью берёзы повислой (*Betula pendula* ROTH), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и вяза обыкновенного (*Ulmus laevis* PALL.). Подлесок формируют ива козья (*Salix caprea* L.), клён платановидный (*Acer platanoides* L.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.) и свидина белая (*Cornus alba* L.).

**Подстилка** деструктивная, слабосопряжённая, маломощная, хорошо отделяется от минерального горизонта. Общая мощность около 3 см. Состоит из остатков хорошо сохранившейся хвои буроватых тонов, мелких остатков веток и незначительной примеси мелкого детрита. Практически все компоненты, входящие в состав подстилки, хорошо диагностируются.

Ниже вскрывается **минеральный горизонт** АС (3—10 см) — горизонт слабогумусированного покровного суглинка, крайне неоднородный по своему составу, с преобладающим участием желтовато-бурого пылеватого суглинка и низкой прокрашенностью гумусом.

### *Смешанный лес — лизиметры №№ 35—38*

**Растительность.** В верхнем ярусе присутствуют берёза повислая (*Betula pendula* ROTH), ель европейская (*Picea abies* (L.) H. KARST.) и клён платановидный (*Acer platanoides* L.). Высота берёз от 5 до 10 (13) м. В подросте присутствует ель европейская, клён платановидный и дуб черешчатый (*Quercus robur* L.).

---

<sup>4</sup> В данном подразделе приводятся данные, опубликованные в совместной работе: Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А. и др. Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров. // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2017. — № 1. — С. 9—15. Личный вклад соискателя 50 %.

**Подстилка** ферментативная, маломощная, но в большей степени сопряжённая по сравнению с подстилками ельника. Характеризуется более выраженными процессами гумусообразования, признаки которого обнаруживаются в горизонтах, залегающих под подстилкой. Подгоризонт О1 (0—2 см) представляет собой опад прошлых лет, преимущественно — лиственный, сохранивший структуру и консистенцию. Обнаруживаются сохранившиеся веточки хвойных деревьев, участие хвои незначительно. Основную массу составляет листва бурых тонов, которая при высушивании легко разрушается на фрагменты. Подгоризонт О2 (ферментативный, 2—5 см) — бурых тонов; содержит много веточек, мелких остатков древесины, в том числе хорошо сохранившиеся веточки хвойных деревьев. В нижней части присутствует примесь мелкозёма, прокрашенного гумусом и преобладающего по массе над детритом.

**Почвенный горизонт А1** (5—10 см) представлен средним суглинком, неоднородным по окраске, довольно хорошо оструктуренным. Переходит в горизонт А1С, неоднородный по окраске, в меньшей степени оструктуренный и гумусированный, но явно находящийся под влиянием гумусовых веществ, проникающих из вышележащей толщи.

### ***Широколиственный лес — лизиметры №№ 39—42***

**Растительность.** Основной полог формируют дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), клён платановидный (*Acer platanoides* L.), в меньшем количестве встречаются берёза повислая (*Betula pendula* ROTN), осина (*Populus tremula* L.) и рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.). Высота отдельных деревьев полога до 10—16 (17) м. Отмечено незначительное количество молодых растений берёзы повислой, ели европейской (*Picea abies* (L.) H. KARST.), дуба черешчатого и дуба красного (*Quercus rubra* L.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и вишни обыкновенной (*Prunus cerasus* L.). Моховой покров развит крайне слабо по причине ежегодно формирующегося мощного слоя опада.

**Подстилка** ферментативная, слабосопряжённая, маломощная. Подгоризонт О1 (0—1 см) — опад прошлых лет, бурый, представленный хорошо сохранившимися листьями дуба и других лиственных пород, с небольшим количеством веток. Листья хорошо сохранили морфологическую структуру; с поверхности отдельные листья мацерированы, мелкого детрита очень мало. Переход к следующему подгоризонту довольно резкий. Подгоризонт О2 (ферментативный, 1—2 см) так же представлен листьями дуба и других деревьев; материал в большей степени разложен, но тоже сохраняет свою структуру. Поверхность листьев в большей степени имеет буровато-тёмные тона, мацерация выражена в гораздо большей степени, веточки встречаются, но легко разрушаются при механическом воздействии.

**Почвенный горизонт А1** (2—10 см), по сравнению с аналогичным горизонтом под смешанным лесом, отличается ещё большей оструктуренностью и прокрашенностью гумусом, большим участием корневых систем. В отличие от предыдущих вариантов, для лизиметров, за-

нятых широколиственным лесом, характерно более интенсивное гумусообразование на тех же глубинах, что связано с характером поступающего опада.

### **Залежь — лизиметры №№ 43—48**

**Растительность.** Взрослые деревья отсутствуют, однако встречаются виды подроста и подлеска. В подросте (покрытие от 0 до 20 %) максимального развития и покрытия достигает клён платановидный (*Acer platanoides* L.) и клён ясенелистный (*Acer negundo* L.). На лизиметре № 46 отмечен ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) высотой 1,2 м. Отмечено максимальное, по сравнению с другими участками, число видов трав. Лизиметры №№ 43—44 (изначально — травы) в настоящее время в наибольшей степени подвержены зарастанию кустарниками и молодыми деревьями, которые играют бóльшую роль в формировании среды, чем травы.

**Подстилка.** Интенсивное поступление опада с деревьев, произрастающих на лизиметрах №№ 41—42 (широколиственный лес), дополняющее поступление опада с местных деревьев и кустарников, обуславливает формирование на лизиметрах №№ 43—44 подстилок, характерных для лесных экосистем, в то время как на лизиметрах №№ 45—48 развиваются подстилки, характерные для травяных сообществ.

Подстилка на лизиметрах 43—44 (**залежь травяно-кустарниковая**) деструктивная, несопряжённая. Подгоризонт подстилки О1 (0—1 см) представлен опадом прошлых лет, преимущественно лиственных пород. Опад недифференцированный, бурых тонов, хорошо сохранивший свою морфологическую структуру. Содержит веточки, листья часто оказываются мацерированы. Мелкий детрит отсутствует.

Подстилка на лизиметрах 45—48 (**залежь травяная**) также деструктивная, несопряжённая, очень маломощная, представлена опадом прошлых лет, но без значительного участия листьев древесных пород. Подгоризонт О1 (0—2 см) представлен опадом прошлых лет, состоящим из остатков злаковой растительности, сохранивших свою структуру, имеющих буроватые тона. Старые фрагменты легко ломаются при механическом воздействии.

**Почвенный горизонт АС** — слабо, но равномерно окрашенный покровный суглинок, очень слабо оструктуренный.

## 2.1.2. БОТАНИЧЕСКИЙ САД МГУ<sup>5</sup>

Ботанический сад МГУ был выбран как относительно урбанизированная территория. Биогеоценозы БС МГУ отличаются естественных не только наличием факторов, связанных с влиянием городских условий, но также и тем, что являются искусственными по происхождению. Грабинник и лиственничник БС МГУ, как монокультуры, не являются характерными для данной природной зоны (Флора СССР, 1936, стр. 258—261; Лесная энцикл., т. 2, ст. *Лиственничные леса*). Кроме того, в БГЦ Ботанического сада периодически проводится прочистка подлеска и прочие работы, что может изменять баланс, естественным образом складывающийся в растительном сообществе, и может рассматриваться как фактор антропогенного воздействия.

Ботанический сад МГУ на Ленинских горах был заложен в 1950 г., строительство осуществлялось преимущественно под руководством Н. А. Базиливской. Многие виды растений были собраны в ходе экспедиций с 1953 по 1959 гг., а также предоставлены другими ботаническими садами, в частности Сухумским и Батумским. В структуре БС МГУ имеется несколько секторов, одним из которых является дендрарий (История Сада 1950—2016..., Интернет-ресурс), на территории которого и локализованы представляемые исследования.

Были выбраны шесть биогеоценозов, расположенных в разных частях Дендрария (рис. 5): тополёвник, лиственничник, берёзово-кленовая защитная полоса, сосняк, грабинник, ельник. Из них четыре попарно соседствуют друг с другом: берёзово-кленовая защитная полоса — с лиственничником, ельник — с грабинником. Поскольку БГЦ имеют небольшие размеры (площадь каждого составляет порядка 300—400 м<sup>2</sup>, численность взрослых деревьев измеряется лишь первыми десятками, а горизонтальная протяжённость сообществ сопоставима с высотой древостоя), между ними происходит интенсивный обмен опадом, что обуславливает сглаживание различий в строении подстилок, и распространение в подросте, подлеске и травяно-кустарничковом ярусе молодых и ювенильных деревьев, в особенности липы и клёна.

Все **почвы Ботанического сада МГУ**, созданы или трансформированы человеком. Среди характерных особенностей — высокая численность и биомасса мезофауны, отсутствие высоких концентраций тяжёлых металлов, нейтральная реакция среды и высокие запасы гумуса в верхних горизонтах, а также повышенные отношения  $C_{ГК}/C_{ФК}$  и содержания питательных элементов по сравнению с дерново-подзолистыми почвами (Розанова и др., 2016). При создании сада в почвы вносили значительные количества низинного торфа, который местами перемешивали с

---

<sup>5</sup> В данном разделе приводятся данные, полученные совместно с коллегами, и опубликованные в совместной работе: Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И., Земсков Ф. И. и др. Типология лесных подстилок некоторых типов насаждений ботанического сада МГУ имени М. В. Ломоносова (ленинские горы). // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2019. — № 2. — С. 3—19. Личный вклад соискателя 40 %.

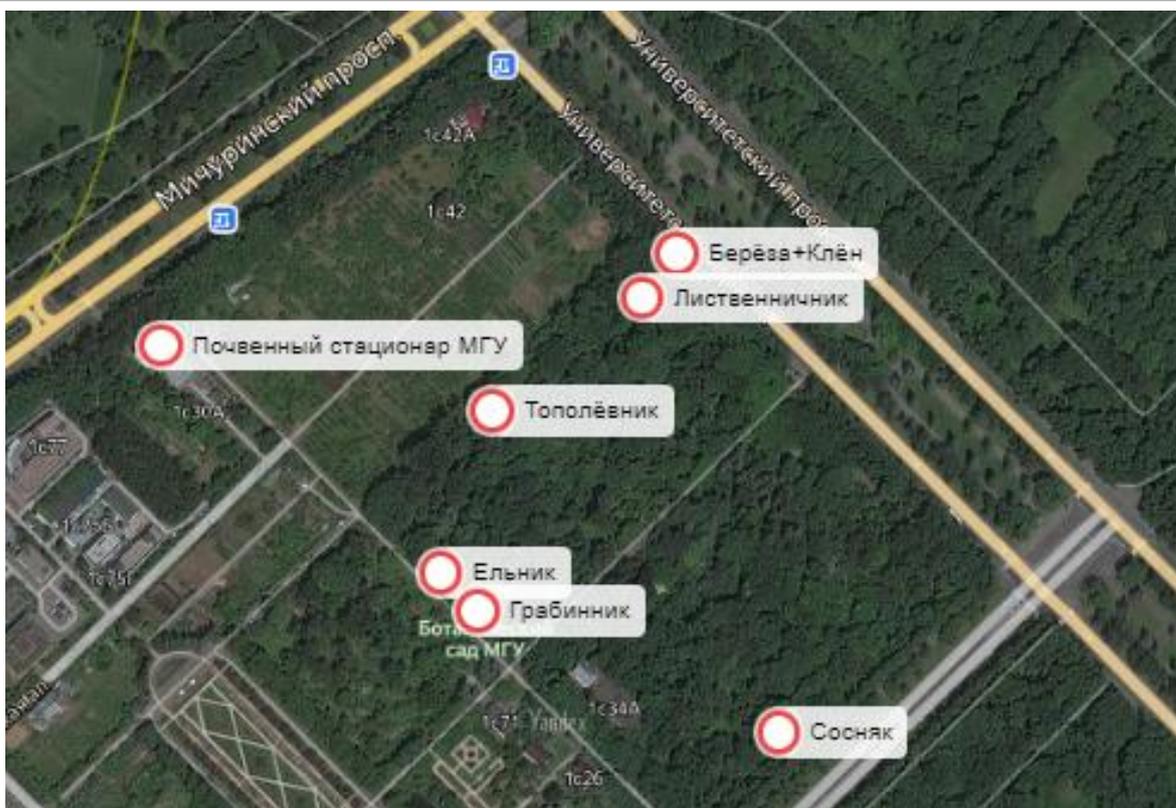


Рис. 5. Расположение опытных площадок на территории Ботанического сада МГУ.

Выполнено на основе космического снимка из Интернет-ресурса Яндекс Карты.

верхней частью грунта, а местами — нет (Раппопорт, 2004). В первые годы практиковали внесение минеральных удобрений (*там же*). Почвы БС МГУ достаточно подробно описаны в работе М. С. Розановой с соавт. (2016), а также в ряде других (Горячкина и др., 2003; Раппопорт, 2003; Строганова и др., 2008). Авторы (Розанова и др., 2016) отмечают общую особенность изученных почв — наличие на поверхности гумусово-аккумулятивного горизонта АУ мощностью до 30 см (вместе с переходным или погребённым горизонтом). Почвы в лесных биогеоценозах БС МГУ диагностируются в одних случаях как *технодерново-подзолистые*, в других — как *серогумусовые*. Подстилающими породами могут являться техногенные отложения разной мощности, или покровный суглинок; под техногенными отложениями могут встречаться погребённые горизонты агродерново-подзолистых почв. Здесь и далее названия почв БС МГУ приводятся по (Прокофьева и др., 2014).

Ниже приводятся основные сведения о флористическом составе фитоценозов Дендрария БС МГУ. Проективное покрытие каждого вида в полевых условиях было дано в баллах по шкале обилия-покрытия Павловского—Браун-Бланке, где: + — вид присутствует мало (проективное покрытие до 1 % площади описания); 1 — заметное количество, 1—5 % площади; 2 — вида много, но проективное покрытие меньше 25 %; 3 — вид сильно развит, проективное покрытие 25—50 %; 4 — проективное покрытие 50—75 %; 5 — сплошной сомкнутый покров, проективное покрытие 75—100 %. Латинские названия приводятся по (Губанов и др., 1995).

## Лиственничник Ботанического сада (площадка 27)

Координаты<sup>6</sup>: N 55°709789, E 37°528466, площадь описания 10×12 м. Располагается в северном углу дендрария, в 30 м от проезжей части Университетского проспекта, от которого отделён асфальтированной аллеей, затем кленово-берёзовой защитной полосой (площадка 28). Участок находится на небольшом возвышении — до 1 м от поверхности аллеи. Отмечается существенный перенос опада лиственниц в соседние ФЦ, в частности — в берёзово-кленовую полосу.

**Растительность.** В верхнем ярусе преобладает лиственница даурская (*Larix gmelinii* (RUPR.) KUZEN.), диаметр стволов 45—55 см, на пробной площади 10 взрослых деревьев (рис. 6). Высота полога 18—20 м, сомкнутость 0,3, с учётом подлеска — 0,4. Формула состава древостоя — 10Л (10 — лиственница). В подросте — клён платановидный (*Acer platanoides* L.) высотой 6—7 м, диаметр стволов 1—4 см, ОПП 30 %. В подлеске — рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), до 4 м, +; лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.), до 2 м, +; черёмуха обыкновенная (*Padus avium* MILL.), до 2 м, +; малина лесная (*Rubus idaeus* L.), до 1 м, +; смородина красная (*Ribes rubrum* L.) до 1,5 м, +. Травяно-кустарничковый ярус (ТКЯ) очень разрежен — ОПП до 30 %. В ТКЯ — сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), 3, в микро-

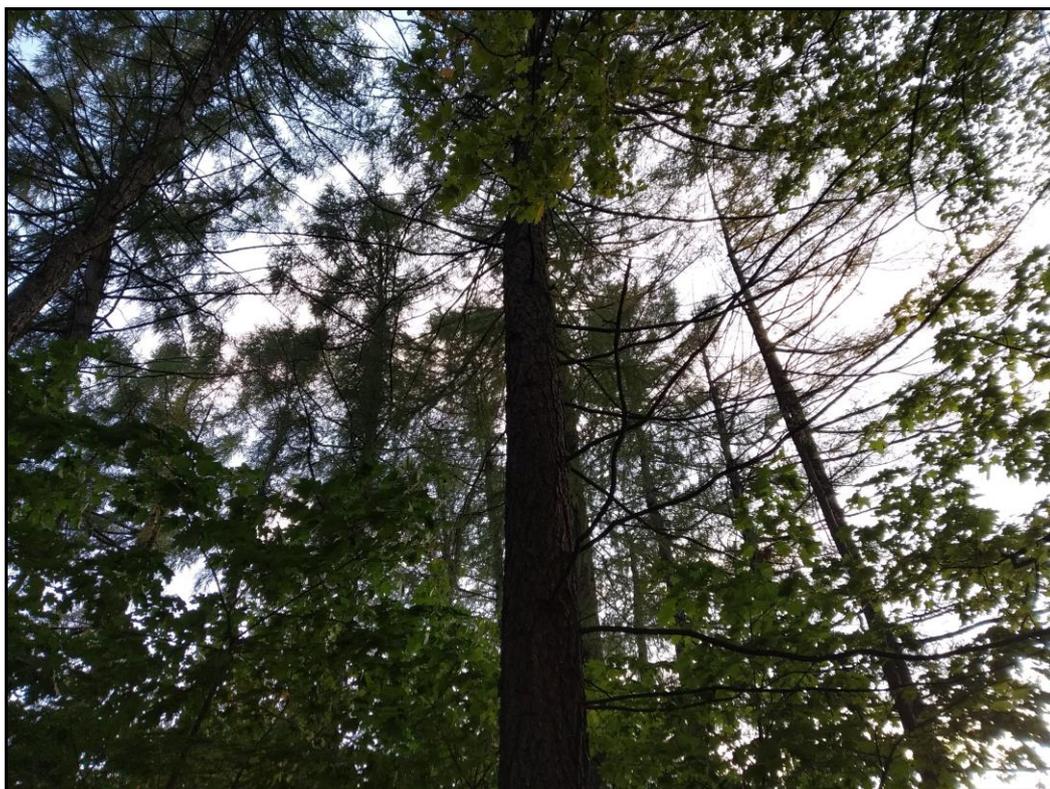


Рис. 6. Насаждения лиственницы даурской в Дендрарии Ботанического сада МГУ (площадка 27).

<sup>6</sup> Координаты точек, расположенных в Ботаническом саду, приведены для точной идентификации биогеоценозов, поскольку на территории дендрария существуют разные биогеоценозы с похожим составом древостоя.

группировке (МГК), занимающей ~ 1/4 площади участка; недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora* DC.), 2; щитовник Карпузиуса (*Dryopteris carthusiana* (VILL.) H. P. FUCHS), +; чистотел большой (*Chelidonium majus* L.), <1; зелёные мхи — на старых пнях, в незначительном количестве. В ТКЯ встречаются **ювенильные растения**: лещина обыкновенная, до 0,5 м, +; клён платановидный, до 0,5 м, 1; липа сердцевидная (*Tilia cordata* MILL.), до 10 см, 1.

**Подстилки** неоднородны — встречаются ферментативные (строение: O1—O2) и гумифицированные (строение: O1—O2—O3). Образованы преимущественно опадом лиственницы (хвоя, ветки, кора, шишки), с заметным участием опада лиственных деревьев и кустарников подроста, подлеска, а также произрастающих на соседних участках. Опад лиственных пород представлен в основном легко переносимыми ветром компонентами. Среди исследованных биогеоценозов БС МГУ только в данном биогеоценозе подстилка образует сплошное покрытие.

**Почва** технодерново-подзолистая, на покровном суглинке. Строение профиля O1—O2—AY—ТСН—BT1—BT2—BT3—BCg (Розанова и др., 2016).

## **Сосняк Ботанического сада (площадка 29)**

Координаты: N 55°70680, E 37°52977, площадь описания 10×12 м. Располагается в южном углу Дендрария на расстоянии ~ 50 м от проезжей части Менделеевской улицы, от которой отделён асфальтированной аллеей, затем защитной полосой, тротуаром и газоном. В наибольшей степени по сравнению с остальными исследуемыми ФЦ подвергся влиянию шторма 29 мая 2017 (GISMETEO.RU: Конвективная буря в Москве ..., 2017), в результате которого была повалена взрослая сосна (рис. 7) и сломано множество ветвей разного размера; и то и другое позже было распилено и убрано сотрудниками БС МГУ.

**Растительность.** В **верхнем ярусе** — сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), диаметр стволов 20—40 см, на участке 16 взрослых деревьев. Высота полога 15 метров, сомкнутость полога 0,3. Формула состава древостоя — 10С (10 — сосна). В **подросте** — ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), 5 м, 1; клён платановидный (*Acer platanoides* L.), до 7 м, +. В **подлеске** много бузины кистевидной (*Sambucus racemosa* L.), ср. высота 5 (8) м, 40 %, 3, а также малина лесная (*Rubus idaeus* L.), в МКГ, 1,5 м, 1; орех (*Juglans* sp.), 4 м, +; бузина кистевидная, садовая форма (рассечённолиственная) (*Sambucus racemosa* var. *laciniata* W. D. J. КОСН ex DC.), 3 м, +; жимолость лесная (*Lonicera xylosteum* L.), 2 м, +; боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* PALL.), 1,5 м, +; бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosa* SCOP.), ~1 м, +; бересклет европейский (*Euonymus europaea* L.), ~4 м, +; калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.), 0,7 м, +. ОПП подлеска 40 %. В **травяно-кустарничковом ярусе** (ОПП 50 %, высота растений до 30 см) — сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), в МКГ, до 3; гравилат городской (*Geum urbanum* L.), 1; крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), <1; медуница неясная (*Pulmonaria obscura* DUM.), 1 (до 2 в МКГ). Мхи на поверхности почвы отсутствуют.



Рис. 7. Насаждения сосны обыкновенной в Дендрарии Ботанического сада МГУ (площадка 29). Слева — вид на сломанное дерево. Справа — вид на верхний полог.

Фотографии А. Н. Демидовой, 2017 г.

**Подстилка** деструктивная, не образует сплошного покрытия, представлена компонентами соснового опада с участием опада лиственных деревьев и кустарников, поступающего как от подроста и подлеска, так и с растений соседних участков; присутствуют остатки трав.

**Почва** серогумусовая, на техногенных отложениях, подстилаемая горизонтами дерново-подзолистой почвы; имеет профиль O—AY<sub>ur</sub>—ТСН/Р—[ELBT]—[BT] (Розанова и др., 2016).

### **ЕЛЬНИК БОТАНИЧЕСКОГО САДА (ПЛОЩАДКА 31)**

Координаты: N 55;707820, E 37;526335, площадь описания 10×12 м. Соседствует с грабинником (площадка 30), от которого отделён тропой, по другой стороне ограничен асфальтированной аллеей. Данный фитоценоз примечателен относительным сходством по составу древостоя с ельником почвенных лизиметров (лизиметры №№ 31—34).

**Растительность.** В **верхнем ярусе** — ель сибирская (*Picea obovata* LEDEB.). Диаметры стволов взрослых деревьев 20—45 (в среднем 30) см (рис. 8). Высота полога до 15 м, сомкнутость полога 0,6. Формула состава древостоя — 10Е (10 — ель). В **подросте** — клён платановидный (*Acer platanoides* L.), до 4—5 м (в среднем 3 м), 1—2; рябина обыкновенная (*Sorbus*

*ausiparia* L.), до 5 м, 1; ель сибирская, до 4 м, +; ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), до 1,5 м, +; клён равнинный (*Acer campestre* L.), +. **Подлесок** очень густой, высота до 3 м, ОПП 50 %. В подлеске — бузина кистевидная (*Sambucus racemosa* L.), до 2,5 м, +; жимолость лесная (*Lonicera xylosteum* L.), до 3 м, 2; крушина ломкая (*Frangula alnus* MILL.), до 2 м, 2; птелея трёхлистная (*Ptelea trifoliata* L. \*), до 1,5 м, +; лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.), от 1 до 2,5 м, +; рябина обыкновенная, до 3 м, +; смородина красная (*Ribes rubrum* L.), +; черёмуха обыкновенная (*Padus avium* MILL.), до 2,5 м, +; снежнаягодник (*Symphoricarpos* sp. \*), +. **Травяно-кустарничковый ярус** имеет ОПП 60 %, средняя высота растений 40 см. В ТКЯ — сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), 3; купена многоцветковая (*Polygonatum multiflorum* (L.) ALL.), 1; крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), +; чистотел большой (*Chelidonium majus* L.), +; недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora* DC.), +; фиалка (*Viola* sp.), +; лилия саранка (*Lilium martagon* L.), +; вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* (L.) ROTH), +; колокольчик рапунцелевидный (*Campanula rapunculoides* L.), +. **Ювенильные растения** в ТКЯ: клён платановидный, до 50 см, 1.

**Подстилка** характеризуется наибольшей неоднородностью среди исследованных биогеоценозов БС МГУ. Встречаются участки и с деструктивными подстилками, и с ферментативными, и с гумифицированными, в том числе, мертвопокровные. Наиболее мощные подстилки приурочены к приствольным парцеллам. Подстилка не образует сплошного покрытия.



Рис. 8. Насаждения ели сибирской в Дендрарии Ботанического сада МГУ (площадка 31).

Слева — фотография А. Н. Демидовой, 2017 г., справа — фотография автора, осень 2019 г.

**Почва** серогумусовая, на техногенных отложениях, со строением профиля О—Аушг—АУшгТСН—ТСН1—ТСН2—[U]—[ТСНг]—[ТСНг2] (Розанова и др., 2016).

### **ТОПОЛЁВНИК БОТАНИЧЕСКОГО САДА (ПЛОЩАДКА 26)**

Координаты: N 55°708746, E 37°526575, площадь описания 10×12 м. Располагается в отдалении от автомобильных дорог, рядом с одной из асфальтированных аллей БС МГУ.

**Растительность.** В верхнем ярусе преобладает тополь белый (*Populus alba* L.), диаметр стволов 80—90 см (рис. 9). Высота полога 18 м, сомкнутость полога 0,4. Формула состава древостоя — 10Т (10 — тополь). На границе участка и в  **подро́сте** встречается сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), до 10 м, 1. Также в подро́сте — тополь белый, до 2 м, частично поражён тлём, 1; орех (*Juglans* sp.) 1,5 м, +; ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), 4 м, +. **Подлесок** густой, до 5—7 м высотой, ОПП до 50 %. В подлеске — клён платановидный (*Acer platanoides* L.), до 5 м, 3; рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), 7 м, 1; жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.), до 5 м, +; черёмуха обыкновенная (*Padus avium* MILL.), 3 м, 1; лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.), 3 м, +; калина гордовина (*Viburnum lantana* L. \*), до 2,5 м, +; снежноягодник (*Symphoricarpos* sp.), до 1 м, +; шиповник (*Rosa* sp.), до 1,5 м, +; свидина белая (*Cornus alba* L.), до 1,5 м, +; смородина красная (*Ribes rubrum* L.), до 1,5 м, +; алыча (*Prunus cerasifera* ENRH. \*), до 3 м, +; яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) BORKH. \*), до 3

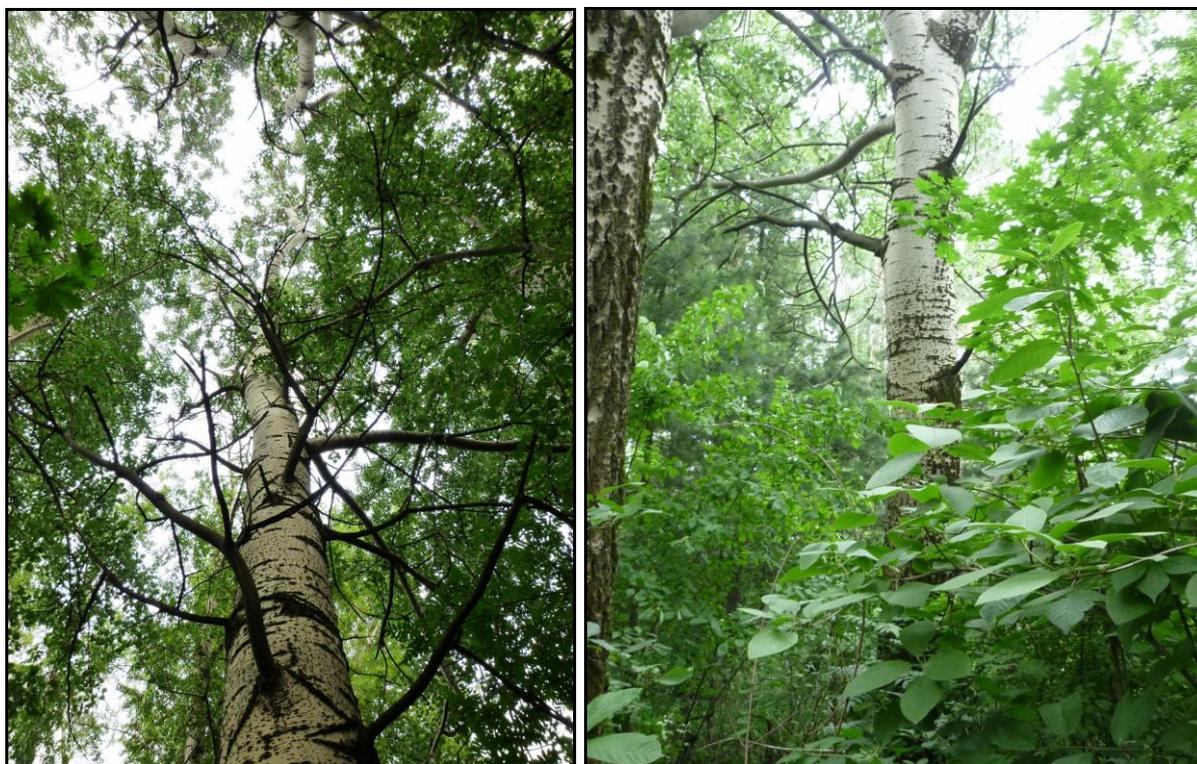


Рис. 9. Насаждения тополя белого в Дендрарии Ботанического сада МГУ (площадка 26).

Фотографии А. Н. Демидовой, 2017 г.

м, +. В **травяно-кустарничковом ярусе** высота растений средняя до 50 см, ОПП ТКЯ 60 %. В ТКЯ — сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), 3; недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora* DC.), 1; крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), +; колокольчик широколистный (*Campanula latifolia* L.), +; колокольчик рапунцелевидный (*Campanula rapunculoides* L.), +; лилия саранка (*Lilium martagon* L.), +; дремлик широколистный (*Epipactis helleborine* (L.) CRANTZ), +. **Ювенильные растения** в ТКЯ: калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.), до 0,5 м, +; тополь белый, до 0,5, 1; клён платановидный, до 0,5 м, 1.

**Подстилка**, главным образом, *деструктивная* (строение: O1), в периоды накопления значительного количества ферментированного материала может быть диагностирована как *ферментативная* (строение: O1—O2). Представлена опадом текущего года и в разной степени разложившимся опадом прошлых лет — листьями тополя и растений подроста и подлеска, веточками, остатками трав. Распределена довольно равномерно, покрывает большую часть поверхности почвы, а по окончании листопадного периода образует плотный сплошной покров.

### **БЕРЁЗОВО-КЛЕНОВАЯ ЗАЩИТНАЯ ПОЛОСА (ПЛОЩАДКА 28)**

Координаты: N 55°709789, E 37°528466, площадь описания 8×15 м. Соседствует с лиственничником, от которого отделена асфальтированной аллеей. Располагается в непосредственной близости от проезжей части и тротуара Ломоносовского проспекта, от которых отделена забором (рис. 10). Данный ФЦ выбран из-за относительного сходства по составу древостоя с ФЦ лизиметров №№ 39—42 (широколиственный лес). В зимний период 2017—2018 отмечено существенное поступление снега, загрязнённого пылью, каменной крошкой, и противогололёдными реагентами, сбрасываемого при механизированной очистке проезжей части проспекта и/или тротуара, а также незначительное количество мусора (бутылки, пластиковые пакеты и т. п.). Отмечается существенное поступление хвойного опада из лиственничника (площадка 27).

**Растительность.** В **верхнем ярусе** — берёза повислая (*Betula pendula* ROTH.), диаметры стволов 25—40 см; клён платановидный (*Acer platanoides* L.), высота 15—16 м, диаметры стволов 10—15 см. На большей части участка преобладают берёзы, местами увеличивается присутствие клёна платановидного. Высота полога 17 м, сомкнутость полога 0,5. Формула состава древостоя (суммарно по площади) — 8Б2К (берёза — 8, клён — 2). В **подросте** — клён платановидный, средняя высота 5 м (до 8 м), диаметры стволов около 10 см, 2; липа сердцевидная (*Tilia cordata* MILL.), около 1 м, +. В **подлеске** — магония падуболистная (*Mahonia aquifolium* (PURSH) NUTT. \*), 0,7 м, +. **Травяно-кустарничковый ярус:** средняя высота растений до 30 см, ОПП 50 %. В ТКЯ — сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), 2—3; ландыш майский (*Convallaria majalis* L.), формирует МКГ, 2; купена (*Polygonatum* sp.), <1; недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora* DC.), 1; дремлик широколистный (*Epipactis helleborine* (L.) CRANTZ), +; лилия саранка (*Lilium martagon* L.), +; одуванчик лекарственный



Рис. 10. Берёзово-кленовая защитная полоса в Дендрарии Ботанического сада МГУ (площадка 28). Участок с преобладанием клёна платановидного. Осень 2019 г.

(*Taraxacum officinale* WIGG. s. l.), +; сердечник (*Cardamine* sp.), +. **Ювенильные растения в ТКЯ:** липа сердцевидная, 1; ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), до 0,5 м, +; клён платановидный, до 0,5 м, 2. На участке описания есть более 10 пней от спиленных берёз, в том числе высокой степени разложения.

**Подстилка** деструктивная, маломощная, не образует сплошного покрова. Представлена опадом лиственных деревьев — листьями, ветками, семенами. Компоненты разложены в разной степени, однако подгоризонты не выделяются. Заметно участие хвой и, в меньшем количестве, прочего опада лиственницы.

### **Грабинник Ботанического сада (площадка 30)**

Координаты: N 55;707683, E 37;526624, площадь описания 10×12 м. Ограничен асфальтированной аллеей по одной стороне, и тропой, мощёной бетонной плиткой, по другой; через указанную тропу граничит с ельником (площадка 31), с которым интенсивно обменивается опадом.

**Растительность.** В **верхнем ярусе** — граб обыкновенный (*Carpinus betulus* L.). Высота полога 10—12 м (рис. 11). Сомкнутость полога 0,6. Граб растёт группами в среднем по 2—3 (до 5 и более) стволов. Диаметр стволов в среднем 25—30 см. Формула состава древостоя — 10Г (10 Граб). В  **подроде** — клён платановидный (*Acer platanoides* L.), до 1 м, 2; липа сердцевидная (*Tilia cordata* MILL.) — 1 м, +. В **подлеске** — рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*

L.) — до 1 м, <1; снежниковик (*Symphoricarpos* sp.) — 1 м, +; смородина золотистая (*Ribes aureum* PURSH) — 1 м, +. В **травяно-кустарничковом ярусе** средняя высота растений до 30 см, ОПП 40 % — чина весенняя (*Lathyrus vernus* (L.) BERNH.), до 1; дремлик широколистный (*Epipactis helleborine* (L.) CRANTZ), +; купена (*Polygonatum* sp.), 2; крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), +; седмичник европейский (*Trientalis europaea* L.), +; недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora* DC.), по границе участка, +; зелёные мхи представлены в небольшом количестве, в основном около стволов деревьев (до 1). Под пологом граба много практически мертвопокровных участков. **Ювенильные растения в ТКЯ:** липа сердцевидная, до 10—15 см, 2; рябина обыкновенная, до 0,4 м, 2; клён платановидный, до 0,4 м, 2; смородина (*Ribes* sp.) — до 0,5 м, <1; калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.) — до 0,3 м, +; ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) — до 0,3 м, +.

**Подстилка** деструктивная, распределена равномерно, покрывает большую часть поверхности почвы. Представлена преимущественно листьями и семенами граба с незначительным присутствием опада прочих растений, включая опад елей соседнего ФЦ.



Рис. 11. Насаждения граба обыкновенного в Дендрарии Ботанического сада МГУ (площадка 30). Осень 2019 г.

## 2.2. ЗОНА СМЕШАННЫХ ЛЕСОВ, УОПЭЦ МГУ «ЧАШНИКОВО», МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ

Москва и близлежащие территории, включая Чашниково, находятся в зоне распространения широколиственно-еловых (подтаёжных) лесов умеренного пояса, и относятся к Североевропейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойнолесной) области (Растительность европейской части СССР, 1980). В относительной близости от УОПЭЦ МГУ «Чашниково» (городской округ Солнечногорск Московской области) водоразделы заняты преимущественно пашней, или залежами на старопахотных почвах, однако в автоморфных ландшафтах встречаются и леса, многие из которых являются вторичными. По большей части их составляют широколиственные (липа, клён и др.) и мелколиственные (берёза) породы; ели в таких лесах присутствуют, в основном, только в подросте и подлеске. Леса с преобладанием ели встречаются в основном на неудобьях — вблизи оврагов и по склонам, на переувлажнённых участках и т. п. По краям пахотных угодий, а нередко и на пашнях, на лесных опушках и вдоль дорог в большом количестве произрастает борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* MANDEN.). Обширные территории заняты залежами, просеками, имеются мелиорированные участки поймы реки Клязьмы, на которых распространены аллювиальные почвы грунтового увлажнения, которые, в некоторых случаях, характеризуются присутствием карбонатов в верхних горизонтах. **Климат** умеренно-континентальный; коэффициент увлажнения  $> 1$ , в осенние месяцы — до 1,5—2 и более (Богатырев и др., 1983).

В БГЦ Чашниково проводились наблюдения за процессами разложения материалов в виде стандартизированных образцов, а также описание и оценка запасов подстилок.

### СМЕШАННЫЙ ЛЕС, ПЕРЕУВЛАЖНЁННЫЙ УЧАСТОК С ПРЕОБЛАДАНИЕМ ЕЛИ (ПЛОЩАДКА 18)

Координаты: N 56°042047, E 37°178661. Площадка расположена в пределах транзитно-аккумулятивного ландшафта на юго-западном склоне долины реки Клязьма. В наиболее влажные годы наблюдений отмечали затопление близлежащих участков леса, но не самой опытной площадки. Вблизи опытной площадки имеется большое количество поваленных стволов, некоторые из них были повалены после закладки образцов. Лес характеризуется высокой неоднородностью плотности и состава древостоя; опытная площадка расположена на участке с разреженным пологом. **Растительность**<sup>7</sup> — смешанный лес с преобладанием ели (*Picea abies* (L.) H. KARST.), берёзы (*Betula* sp.), с участием клёна (*Acer platanoides* L.) и других пород.

---

<sup>7</sup> Здесь и далее — описание растительности выполнялось непосредственно для опытных площадок, и из-за пространственной неоднородности фитоценозов может не вполне соответствовать данным других исследователей.

Опытная площадка заложена на небольшом участке с преобладанием ели, также присутствует один молодой клён платановидный. Протяжённость этого участка невелика, меньше средней высоты древостоя, а с ближайших лиственных деревьев поступает значительное количество листового опада, в то время как поступление хвойного опада не столь велико, что не позволяет считать этот участок полноценным ельником. В травяно-кустарничковом ярусе — кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), различные злаковые травы, несколько поодаль, в понижениях, встречаются осоки (*Carex* spp.). **Подстилка** деструктивная, распределена довольно равномерно. Сформирована опадом елей с большим участием опада лиственных деревьев. **Почва**, предположительно, дерновая грунтово-глееватая. Поблизости распространены также болотные низинные (типичные) торфяные и торфяно-глеевые, а также перегнойные грунтово-глеевые почвы (Кириллова и др., 2015), однако непосредственно на опытной площадке, расположенной на локальном повышении, в верхнем горизонте отсутствуют признаки накопления торфа или перегноя, таким образом, переувлажнение не играет решающей роли на уровне подстилки.

### **ЕЛЬНИК-КИСЛИЧНИК (ПЛОЩАДКА 19)**

Координаты: N 56°035797, E 37°189264. Расположен вблизи оврага, на повышении мезорельефа.

**Растительность.** Площадка расположена на участке с преобладанием разновозрастных елей в верхнем ярусе и в подросте (*Picea abies* (L.) H. KARST.). Поблизости в окружающем лесу встречаются берёза (*Betula* sp.) и осина (*Populus tremula* L.) в верхнем ярусе, но их влияние незначительно, и основным эдификатором на исследуемой площадке является именно ель. В травяно-кустарничковом ярусе почти исключительно кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.). **Подстилка** весьма неоднородна — от деструктивной до гумифицированной, в последнем случае переплетена корнями и побегами кислицы; сформирована преимущественно опадом ели. Образцы заложены на участке с гумифицированной подстилкой. На близлежащих территориях распространены дерново-подзолистые **почвы** (Кириллова и др., 2015).

### **СМЕШАННЫЙ ЛЕС НА БОЛОТНО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ (ПЛОЩАДКА 20)**

Координаты: N 56°026794, E 37°199667. **Растительность:** в верхнем ярусе преобладает берёза (*Betula* sp.), в меньшем количестве — осина (*Populus tremula* L.) и ель (*Picea abies* (L.) H. KARST.). В подлеске — лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.). В травяном ярусе — злаковые травы, осоки (*Carex* spp.). **Подстилка** деструктивная, распределена равномерно. Сформирована листовым опадом и опадом веток; количество хвои непосредственно на опытной площадке незначительно. **Почва** болотно-подзолистая, грунтово-оглеенная, среднесуглинистая, подстилочная, глубокоподзолистая, имеет строение профиля O1—Ad—E1—E2n—EB—B.

## ЛИСТВЕННЫЙ ЛЕС (ПЛОЩАДКА 21)

Координаты: N 56°02'17.81", E 37°20'16.67". Расположена в автоморфном ландшафте. **Растительность:** в верхнем ярусе преобладает берёза (*Betula sp.*), в меньшем количестве — клён (*Acer platanoides L.*) и липа сердцевидная (*Tilia cordata MILL.*). В травяном ярусе — злаковые травы, крапива двудомная (*Urtica dioica L.*), местами — виды широколиственного леса, в основном сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria L.*). **Подстилка** деструктивная, распределена равномерно. Сформирована опадом лиственных деревьев.

## ЗАЛЕЖИ НА ПОЧВАХ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ СМЫТОСТИ (ПЛОЩАДКИ 22, 23 и 24)

Эти площадки составляют серию — они расположены на схожих между собой участках залежи, снизу-вверх по склону, от участка распространения среднесмытой почвы (Т. 22, координаты: N 56°02'28.722", E 37°18'7.681") к участку на слабосмытой почве (Т. 23, координаты: N 56°02'27.889", E 37°18'6.758") и далее к участку на предположительно несмытой почве (Т. 24, координаты: N 56°02'26.275", E 37°18'4.681"). Образцы на площадке 24 были уничтожены при распашке залежи вскоре после их закладки — никаких данных по ним получить не удалось. Площадки расположены на краю залежи, вблизи просеки под высоковольтной линией электропередачи. В конце 2017 или начале 2018 года просека была вычищена от молодых деревьев и кустарников, однако опытные площадки не были затронуты. **Растительность** — залежь, поросшая молодыми берёзами (*Betula sp.*) возраста до 10—15 лет. Травяно-кустарничковый ярус типичный для лугов и лесополос, его составляют преимущественно мятлики (*Poa spp.*), овсяницы (*Festuca spp.*) и прочие травы, преимущественно злаковые. **Подстилка** деструктивная, характерная скорее для травяных сообществ, нежели для лесов, состоит из остатков трав с небольшим участием листового опада берёзы.

## 2.3. ОБЪЕКТЫ ЗОНАЛЬНОГО РЯДА

С целью опробования метода стандартизированных образцов в различных климатических условиях и получения данных по зональным различиям процессов разложения используемых материалов, в некоторых БГЦ по маршруту зональной практики студентов факультета почвоведения МГУ были заложены стандартизированные образцы, а также проведено описание подстилок и оценка их запасов. Зональная практика проводится ежегодно по одному плану и маршруту, и является удобным мероприятием для проведения опытов и наблюдений, предполагающих ежегодное посещение одних и тех же площадок. Практика включает четыре стоянки: лес Тульские Засеки (Тульская область, зона широколиственных лесов, серые лесные почвы), с. Полибино (Липецкая область, зона лесостепей, чернозёмы типичные), Хреновской сосновый бор (Воро-

нежская область, с. Хреновое, зона лесостепей, чернозёмы обыкновенные; с выездом в государственный природный заказник «Каменная Степь») и ст. Качалино (Волгоградская область, зона степей, каштановые почвы).

Несмотря на то, что работа посвящена, главным образом, лесным БГЦ, в исследование были включены также некоторые лесополосы и травяные сообщества — для получения дополнительных данных, позволяющих оценить влияние очевидных различий в гидротермических условиях на разложение материалов. Поскольку в работе опробованы и использованы новые вариации методики исследования разложения на примере образцов, закладываемых в подстилку, для более полного понимания влияния факторов среды на разложение материалов приводятся данные не только по древесным насаждениям, но и по травяным биогеоценозам. В отличие от городских биогеоценозов БС МГУ и лизиметров МГУ, биогеоценозы зонального ряда имеют в данной работе лишь вспомогательное значение, и потому описаны с меньшей подробностью — внимание уделено лишь наиболее значимым параметрам, влияющим на разложение.

Вблизи каждой стоянки, по возможности, выбиралась площадка в зональном ФЦ, на зональной почве, расположенная в автоморфном ландшафте, а также несколько площадок, отличающихся от неё по тем или иным параметрам, например, площадки в лесополосах, или в ландшафтах с повышенным увлажнением. Отметим, что площадки приходилось выбирать с учётом их доступности для проведения регулярных работ, а также возможности обеспечения сохранности образцов в течение длительного времени.

### **2.3.1. Зона широколиственных лесов — лес Тульские Засеки, Тульская обл., с. п. Крапивенское**

Исследуемая территория находится в зоне распространения широколиственных лесов *северных* (с небольшим участием ели), и относится к Североевропейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойнолесной) области (Растительность европейской части СССР, 1980). Для зоны широколиственных лесов характерен умеренно континентальный или континентальный **климат**. Коэффициент увлажнения 0,9—1,1 (Богатырев и др., 1983).

#### ***Широколиственный лес на серой лесной глеевой почве (площадка 1)***

Координаты: N 53°986351, E 37°144694, Крапивенский лесхоз. **Растительность:** в верхнем ярусе преобладает липа (*Tilia cordata* MILL.) и присутствуют клён (*Acer platanoides* L.) и ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), в подросте и подлеске — лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.). В травяном ярусе — виды широколиственного травяного покрова, преимущественно черемша (*Allium ursinum* L.), пролесник (*Mercurialis perennis* L.) и крапива двудомная (*Urtica dioica* L.). **Подстилка** маломощная, деструктивная, не образует сплошного покрова. Состоит из листьев, веточек и щепок, стеблей трав, мелкого детрита. **Почва** — серая лесная глеевая, грунтово-

глееватая, тяжелосуглинистая, на покровном суглинке, подстилаемом днепровской мореной. Строение профиля: А—АЕ—АВ—В—В(г)—ВСg. Принципиальное отличие этой почвы от *серой лесной типичной* (площадка 3) — в меньшей мощности горизонта Е и наличии признаков оглеения, что свидетельствует об уменьшении промыва и застое влаги в нижних горизонтах.

### ***Берёзовая лесополоса (площадка 2)***

Координаты: N 53°970478, E 37°180159. Лесополоса расположена на пологом склоне, и отделяет пашню от склона первой террасы р. Упы. Описание **почвы** в лесополосе не проводилось, но, площадка расположена примерно в той же позиции в рельефе, что и площадка 3 (см. далее), и можно предположить, что в лесополосе могла бы быть вскрыта почва со схожим строением, но имеющая в профиле старопашотный горизонт. **Растительность** — четыре ряда берёз (*Betula pendula* ROTH., *Betula pubescens* ENRH.<sup>8</sup>), расстояние между рядами 3—4 м. Присутствует молодая поросль берёзы и осины (*Populus tremula* L.). В травяном ярусе в основном виды, характерные для луговой растительности, преимущественно — злаковые травы. **Подстилка** деструктивная, маломощная, не образует сплошного покрова, хотя покрывает бóльшую часть площади поверхности почвы. Имеет черты, характерные для степного войлока, но с заметным участием листового опада, веток, веточек, щепок и т. п. Бóльшая часть сухого валежника и сухостоя в лесополосе отчуждается участниками зональной практики для костров.

### ***Широколиственный лес на серой лесной почве (площадка 3)***

Координаты: N 53°973612, E 37°182009. Расположена примерно в той же позиции по рельефу, что и площадка 2 — предположительно на краю второй надпойменной террасы р. Упы. Уклон поверхности не превышает 1°. **Растительность** — широколиственный лес с преобладанием липы (*Tilia cordata* MILL.) и с участием клёна (*Acer platanoides* L.), ясеня (*Fraxinus excelsior* L.) и дуба (*Quercus robur* L.). В травяном ярусе — виды широколиственной травы: пролесник (*Mercurialis perennis* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.). **Подстилка** деструктивная, не образует сплошного покрова. Сложена листьями, ветками и щепками, стеблями трав, мелким детритом, в разной степени ферментированным и перемешанным с минеральным горизонтом. **Почва** серая лесная (типичная), (обычная), глубоко вскипающая, среднемощная, среднесуглинистая, на лёссовидном суглинке, подстилаемом супесчаным аллювием, имеет строение профиля А—АЕ—ЕВt—Вt<sub>1</sub>—Вt<sub>2</sub>—ВС—ВД. Характерны неровные границы горизонтов, даже в тех случаях, когда переходы *ясные*; некоторые горизонты прерываются.

---

<sup>8</sup> *Betula pubescens* ENRH. (берёза пушистая) — современное название для *Betula alba* L. (берёза белая).

### 2.3.2. Зона лесостепей — Полибино, Липецкая область

Лагерь зональной практики ставится вблизи старого парка усадьбы Нечаевых; административная принадлежность — с. Полибино. Территория находится в зоне распространения луговых степей и широколиственных лесов *южных* (без ели), и относится к Восточноевропейской лесостепной провинции Евразийской степной области (Растительность европейской части СССР, 1980). **Климат.** По сравнению с зоной широколиственных лесов для данной местности характерно лучшее обеспечение теплом и меньшее увлажнение ( $KV 0,77—1,0$ ); летом, как правило, присутствует период иссушения.

#### **Усадебный парк (широколиственный лес) на чернозёме типичном (площадка 4)**

Координаты: N 53°49'28.9", E 38°9'23.50". **Растительность:** фактически усадебный парк представляет собой кленовый лес (*Acer platanoides* L.) с участием липы (*Tilia cordata* MILL.), относительно однородный, за исключением отдельных непротяжённых участков с сильно загущённым подлеском. **Подстилка** деструктивная, не образует сплошного покрова, состоит из листьев, веток, мелкого детрита, аналогична подстилкам на площадках 1 и 3. **Почва** — чернозём типичный, среднесуглинистый, на лёссовидном карбонатном суглинке; строение профиля А—АВ—Вса. В профиле хорошо выражен дерновый процесс, признаком которого является мощная гумусированная толща горизонта А, и элювиально-иллювиальная дифференциация по карбонатам, признаки которой — псевдомицелий, белоглазка, журавчики и карбонатная пропитка. Вскипает со 100 см (граница АВ и Вса).

#### **Осиновая лесополоса на чернозёме типичном (площадка 5)**

Координаты: N 53°48'79.1", E 38°9'76.78". Лесополоса расположена по линии восток—запад, на водораздельном пространстве, уклон местности незначительный. По сторонам лесополосы располагаются участки обрабатываемой пашни. **Растительность** — три ряда осин (*Populus tremula* L.) с небольшим участием ивы (*Salix* sp.) (единичные растения зрелого возраста), расстояние между рядами ~ 3 м, ещё два крайние ряда представлены изреженными насаждениями рябины (*Sorbus aucuparia* L.) и других деревьев и кустарников. Травяной ярус, как и в тульской лесополосе (площадка 2), и представлен преимущественно злаковыми растениями. **Подстилка**, как и на площадке 2, является переходной от степного войлока к собственно лесной подстилке. Мало мощная, деструктивная, распространена довольно неравномерно, не образует сплошного покрова. Может быть местами охарактеризована как степной войлок, состоит из остатков злаковых трав, листьев, веток и мелкого детрита. **Почва** — чернозём типичный, мощный, среднесуглинистый, на лёссовидном карбонатном суглинке, имеющий строение профиля Аp—АВ—Вса. Горизонт А полностью включён в пахотный слой.

### ***Липово-кленовая лесополоса между участками залежи (площадка 6)***

Координаты: N 53°49'45.8", E 38°99'10.4". Расположена в автоморфной позиции, общий уклон местности незначительный. **Растительность:** в верхнем ярусе преобладают клён (*Acer platanoides* L.) и липа (*Tilia cordata* MILL.), они же преобладают подросте и присутствуют в заметном количестве в травяно-кустарничковом ярусе наряду с полынью (*Artemisia* sp.) и крапивой двудомной (*Urtica dioica* L.). Злаковые травы присутствуют лишь в незначительном количестве. **Подстилка** маломощная деструктивная, представлена преимущественно древесным опадом прошлых лет — листьями, многочисленными ветками, мелким детритом, а также стеблями трав. Не образует сплошного покрова. Не имеет черт степного войлока, в отличие от двух описанных выше подстилок лесополос (площадки 2 и 5). **Почва** для данной площадки не описана, однако отметим, что почвы, вскрываемые в Полибино на субгоризонтальных водораздельных пространствах, как правило, не имеют существенных отличий, кроме наличия или отсутствия пахотного горизонта, а также местных особенностей подстилок.

### ***Залежь (участок со степной растительностью) на чернозёме типичном (площадка 7)***

Координаты: N 53°49'44.6", E 38°99'16.4". Расположена в 40 м к юго-востоку от площадки 6. Перезаложена в 2017 г. вместо уничтоженной площадки, располагавшейся на аналогичной залежи по другую сторону лесополосы. **Растительность** — преимущественно злаковые травы, с небольшим участием полыни (*Artemisia* spp.) и других, встречаются сравнительно редкие молодые деревья и кустарники — боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* PALL.), груша обыкновенная (*Pyrus communis* L.), тёрн (*Prunus spinosa* L.), возрастом порядка 10—15 лет. Образцы, заложенные на площадке, зафиксированы к кусту боярышника высотой около 3 м. Отмечается, что залежи постепенно и неуклонно зарастают древесно-кустарниковой растительностью, даже непосредственно на месте стоянки зональной практики, несмотря на вырубку и подрезку, проводимые её участниками. **Подстилка** деструктивная, характерная для травяных сообществ, представляющая собой маломощный степной войлок, образующий равномерный, но не сплошной покров. Отмершие части трав не всегда отделены от вегетирующих. Участие листового опада пренебрежимо мало. **Почва** (на схожей близлежащей залежи) — чернозём типичный, мощный, среднесуглинистый, на лёссовидном карбонатном суглинке, имеющий строение профиля Ad—Ap—A—AB—Bca. Вскипает с 80 см (AB). Отмечается наличие пахотного горизонта и отчётливо заметной плужной подошвы. Выделяется горизонт Ad.

### **2.3.3. Южная граница зоны лесостепей, Воронежская область**

Исследуемая территория находится на южной границе зоны распространения луговых степей и южных широколиственных лесов, и относится к Восточноевропейской лесостепной провинции

Евразийской степной области. Южнее распространены богаторазнотравно-ковыльные степи, относящиеся к Причерноморской (Понтической) степной провинции той же области (Растительность европейской части СССР, 1980). Коэффициент увлажнения составляет 0,7—0,8.

#### ***Осиновый колок на солоди (площадка 8)***

Координаты: N 51°11'19.89", E 40°36'23". Располагается поблизости от площадки 9, рассматривается как компонент лугово-солонцового комплекса. **Растительность:** в верхнем ярусе преобладает осина (*Populus tremula* L.), встречаются так же берёза (*Betula* sp.), клён американский (*Acer negundo* L.); из кустарников — ежевика (*Rubus fruticosus* L.), вяз пробковый (*Ulmus minor* MILL.); из трав встречаются как болотные, так и лесные виды: будра плющевидная (*Glechoma hederacea* L.), вербейник монетный (*Lysimachia nummularia* L.), вейник седоватый (*Calamagrostis canescens* (WEBER) ROTH). **Подстилка** от деструктивной до ферментативной, заметно более мощная в отличие от предыдущих описанных площадок. Образует практически сплошной покров, плохо разделяется на подгоризонты, но в нижних частях профиля отчётливо заметны ферментированные растительные остатки, постепенно вовлекаемые в минеральную часть почвы. Состоит из листьев, веток, стеблей трав и мелкого детрита разной степени разложения. **Почва** — солодь лугово-болотная, (обычная), глубокая, глубокодерновая, глинистая, на лёссовидном карбонатном суглинке, строение профиля Ad—AE—E—Bg—Gca. Вскипает со 122 см (Gca). Для этой почвы характерна резкая элювиально-иллювиальная дифференциация — выделяются горизонты E и AE. Нижележащий элювиально-иллювиальный горизонт имеет явные признаки оглеения и гидроморфизма.

#### ***Луг на лугово-чернозёмной почве (площадка 9)***

Координаты: N 51°12'30.4", E 40°36'49". Располагается поблизости от площадки 8, рассматривается как компонент лугово-солонцового комплекса. **Растительность** — разнотравно-злаковый луг: овсяница луговая (*Festuca pratensis* HUDS.), мятлик узколистный (*Poa angustifolia* L.), вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* (L.) ROTH.), клевера средний (*Trifolium medium* L.) и луговой (*Trifolium pratense* L.), астрагал (*Astragalus* sp.), герань луговая (*Geranium pratense* L.), короставник полевой (*Knautia arvensis* (L.) COULT.) лук круглый (*Allium rotundum* L.). **Подстилка** аналогична той, что развивается на чернозёмных залежах (площадка 7). Маломощная, деструктивная, с чертами степного войлока. Образует равномерный покров, почти полностью перекрывающий поверхность почвы. Состоит из остатков трав, по большей части злаковых. **Почва** — лугово-чернозёмная, остаточно-солонцеватая, мощная, среднесуглинистая, на лёссовидном карбонатном суглинке; строение профиля Ad—A—AB—Bca,g, с признаками оглеения в нижних частях профиля. Вскипает с гл. 80 см (AB—Bca,g). В Bca,g отмечается карбонатная пропитка, похожая на присыпку, характерная для гидроморфных карбонатных почв.

### 2.4.3.1. ЮЖНАЯ ГРАНИЦА ЗОНЫ ЛЕСОСТЕПЕЙ — ХРЕНОВСКОЙ СОСНОВЫЙ БОР, ВОРОНЕЖСКАЯ ОБЛАСТЬ

Хреновской бор относится к особо охраняемым территориям и имеет статус государственного природного заказника ([oopt.aari.ru](http://oopt.aari.ru)<sup>9</sup> — *Хреновской бор*). Здесь проводились многочисленные исследования, посвящённые почвам, рельефу и грунтовым водам (Глинка, Сибирцев, 1894), истории их происхождения (Гаель и др., 1974), а также посвящённые растительности (Раменский, 1915; Ванин, 1970), её охране и восстановлению (Синицын, 2008).

Сосновый бор произрастает на песках, подвергавшихся ветровой переработке, образующих бугры и гряды, чередующиеся с замкнутыми котловинами, в которых близко к поверхности залегают грунтовые воды, удерживаемые прослойками глин; в некоторых понижениях воды выходят на поверхность (Кин, Зайцев 2012). Различия в условиях увлажнения почв в зависимости от положения в рельефе прослеживаются и в характере растительного покрова — на это обращал внимание ещё В. В. Гуман (1913). На повышениях и в средних положениях рельефа располагаются участки соснового леса с участием дуба, чередующиеся с полянами и редколесьями; понижения, как правило, заняты более густым лесом с большим участием лиственных пород, более развитым подлеском и травяно-кустарничковым ярусом.

Исследование почв в разрезах показало, что в некоторые периоды почвообразование шло одновременно с перераспределением песчаных отложений. Для почв характерна дифференциация профиля, обусловленная чередованием гумусонакопления и перераспределения песков, в результате чего в профилях встречаются гумусированные горизонты, в том числе погребённые, имеющие окраску от светлой серовато-палевой до почти чёрной, часто расположенные наклонно, и/или прерывающиеся, а также то плавные, то резкие переходы от светлых тонов к тёмным.

Площадки 12, 13 и 14 в Сосновом бору составляют серию, и на них заложен одинаковый нативный материал (активные фракции местной подстилки), собранный на площадке 13, состоящий преимущественно из сосновой хвои.

#### ***Хреновской бор: смешанный лес в понижении (площадка 12)***

Координаты: N 51°16'41.6", E 40°30'49.3". **Растительность** — смешанный лес с преобладанием сосны (*Pinus sylvestris* L.) и дуба (*Quercus robur* L.), с развитыми подростом и подлеском из разновозрастных растений тех же видов, а также с участием лещины (*Corylus avellana* L.), бузины (*Sambucus*, sp.), клёна (*Acer platanoides* L.), пробкового вяза (*Ulmus minor* MILL.) и других. Травяно-кустарничковый ярус разреженный, представлен крапивой двудомной (*Urtica dioica* L.), видами полыни (*Artemisia* sp.), с минимальным участием злаковых растений. **Подстилка** ферментативная, местами переходящая гумифицированную, состоит примерно поровну из опа-

<sup>9</sup> Интернет-ресурс: <http://oopt.aari.ru/oopt/Хреновской-бор>

да сосны и опада лиственных деревьев, а именно веток, хвои и листьев, чешуек сосновой коры, желудей, шишек. Подгоризонты плавно, без чётких границ, переходят один в другой; нижние слои подстилки перемешаны с минеральными частицами и постепенно переходят в верхний почвенный горизонт, который, в отличие от остальных площадок этой серии, имеет наиболее выраженные признаки накопления гумуса (но не перегноя) и имеет тёмно-серый цвет.

#### ***Хреновской бор: редколесье на повышении рельефа (площадка 13)***

Координаты: N 51°16483, E 40°30561. Площадка расположена на повышении рельефа, на участке редколесья. **Растительность.** На площадке произрастает единственная сосна (*Pinus sylvestris* L.) высотой ~ 5 м. Травяной ярус представлен осокой (*Carex* sp.) с небольшим участием злаковых трав и крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.), проективное покрытие которых не превышает 10—15 %. Заметно влияние деревьев окружающего леса, ближайшие из которых расположены на расстоянии, сопоставимом с их высотой, выраженное в частичном затенении и значительном поступлении опада. **Подстилка** гумифицированная, более мощная, чем на площадке 12; состоит из сосновой хвои, веточек и веток, остатков трав. Подгоризонты сменяют друг друга постепенно, без чётких границ. Нижний подгоризонт постепенно переходит в минеральную толщу, от детрита с примесью песка — до песка с примесью детрита. Верхний почвенный горизонт слабо гумусирован и имеет светло-серый цвет с палевым оттенком.

#### ***Хреновской бор: смешанный лес на возвышении (площадка 14)***

Координаты: N 51°16498, E 40°30597. Данная площадка расположена в рельефе так же, как и предыдущая, но на участке полновозрастного леса. **Растительность** — сосна (*Pinus sylvestris* L.), лишь немного преобладающая над дубом (*Quercus robur* L.), с редким подростом тех же видов и редким неравномерным подлеском различных кустарников. Травяной ярус имеет проективное покрытие 10—15 %, как и на предыдущей площадке; его составляют злаковые травы примерно поровну с остальными видами травянистых растений — крапивой двудомной (*Urtica dioica* L.), разными видами полыни (*Artemisia* spp.) и других растений семейства сложноцветных (*Asteraceae*). **Подстилка** мощная, гумифицированная; подгоризонт O1 имеет чёткую нижнюю границу и легко отделяется от O2, который плавно переходит в O3, который, в свою очередь, постепенно переходит в верхний почвенный горизонт, слабо гумусированный.

### **2.4.3.2. ЮЖНАЯ ГРАНИЦА ЗОНЫ ЛЕСОСТЕПЕЙ — ЗАКАЗНИК КАМЕННАЯ СТЕПЬ, ВОРОНЕЖСКАЯ ОБЛАСТЬ**

#### ***Заказник Каменная степь: лесополоса на чернозёме обыкновенном (площадка 10)***

Координаты: N 51°03039, E 40°72714. Лесополоса имеет возраст более ста лет и довольно большую протяжённость (ширина около 130 м). Площадка располагается поблизости от незакрываемого демонстрационного разреза. **Растительность** — развитый липово-кленовый (*Tilia*

*cordata* MILL., *Acer platanoides* L.) лес с густым подлеском, представленным преимущественно теми же видами. Травяно-кустарничковый ярус непосредственно на опытной площадке развит крайне слабо; встречаются единичные ювенильные клёны. **Подстилка** *деструктивная*, мало-мощная, типичная для широколиственных лесов. Не образует сплошного покрова, однако имеет немного бо́льшую мощность, чем, например, подстилкам на площадке 4 (усадебный парк, Полибино). Состоит из древесного опада прошлых лет — листьев, веток, мелкого детрита разной степени разлаженности. **Почва** — чернозём обыкновенный, (не выщелоченный), мощный, среднесуглинистый, на лёссовидном карбонатном суглинке; строение профиля О—А—АВса—Вса. Вскипает с 27—40 см (А). Характерная особенность — укрупнение отдельностей ореховатой структуры по сравнению с чернозёмами, развивающимися под луговой растительностью.

**Заказник Каменная степь: некосимая степь на чернозёме обыкновенном (площадка 11)**

Координаты: N 51°03'103, E 40°7'2854. Площадка расположена поблизости от демонстрационного разреза в некосимой степи, расположенного вблизи границы этого БГЦ с участком косимой степи. **Растительность.** Так называемая *некосимая степь* представляет собой бывший участок степи ~ 200×400 м, на котором не проводили укосов, выпаса скота или иной обработки, с целью пронаблюдать динамику зарастания залежи. К настоящему времени на этом участке сформировалась растительность, близкая к лесной. Наблюдается сложный рисунок растительных группировок и обилие древесных и кустарниковых пород. Встречаются клён татарский, груша обыкновенная (*Pyrus communis* L.), яблоня дикая (*Malus sylvestris* (L.) MILL.), изредка вяз пробковый (*Ulmus minor* MILL.). Из кустарников — заросли бобовника (*Laburnum* sp.) боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea* PALL.), крушины ломкой (*Frangula alnus* MILL.) и др. (Сидоренко, 2017). **Подстилка** *деструктивная*, в местах наиболее значительного накопления опада может быть классифицирована как ферментативная. Не образует сплошного покрова, закрывая около 80—85 % поверхности почвы. Состоит из листьев, в том числе мацерированных, ломких иссушённых веток, мелкого детрита. **Почва** — чернозём обыкновенный, (не выщелоченный), мощный, среднесуглинистый, на лёссовидном карбонатном суглинке, имеющий профиль О—А—АВ—Вса. Вскипает с 80 см (граница АВ и Вса).

**2.3.4. Зона сухих степей — сельское поселение Качалинское, Волгоградская область**

Территория находится на юго-восточной границе распространения типчаково-ковыльных степей и относится к Причерноморской (Понтической) степной провинции Евразийской степной области. К юго-востоку, за р. Волгой, распространены пустынные (попынно-типчаково-ковыльные) степи (Растительность европейской части СССР, 1980). **Климат** резко континен-

тальный, характерно значительное увлажнение почв в весенний период и иссушение в летний; иногда случаются суховеи, вызываемые средиземноморским антициклоном; коэффициент увлажнения 0,33—0,55.

### ***Лесополоса с преобладанием дуба на каштановой почве (площадка 15)***

Координаты: N 49°09'016, E 44°14'827. С востока граничит с участком пашни, а с запада — с участком необрабатываемой степи. **Растительность** — дуб (*Quercus robur* L.), высаженный двумя рядами на расстоянии около 3—4 м, ещё в два крайних ряда высажены ясень пенсильванский (*Fraxinus pennsylvanica* MARSH.) и смородина золотистая (*Ribes aureum* PURSH), насаждения которой изрежены, однако смородина местами распространяется вглубь лесополосы. Травяно-кустарничковый ярус развит слабо; в местах наибольшего накопления опада встречаются мертвопокровные участки. Встречаются ювенильные побеги смородины золотистой и других кустарников, а также различные виды трав, свойственные для местных лесополос, ни один из которых заметно не преобладает над другими.

В лесополосе задерживается большое количество переносимых ветром остатков растений, образующих перекасти-поле. Вместе с опадом местных деревьев и кустарников они образуют довольно значительные запасы детрита, особенно по бороздам. **Подстилка** — от деструктивной до ферментативной; распределена крайне неравномерно. Состоит из иссушённых и ломких веток разного размера и стеблей трав, которые зачастую неотличимы от веток деревьев, а также из листьев и желудей дуба. Все компоненты могут быть как практически цельными, так и в любой степени измельчёнными. Подстилка плохо разделяется на подгоризонты, но материал в нижних частях профиля подстилки более измельчённый и местами может иметь признаки ферментации. Для заложения образцов был выбран участок с подстилкой, средней по мощности.

### ***Степь типчаково-полынная на каштановой почве (площадка 16)***

Координаты: N 49°09'002, E 44°14'729. Площадка располагается между лесополосой и оврагом, в достаточном отдалении от него — уклон поверхности и незначительное изменение характера растительного покрова начинают проявляться не менее чем в 30—40 м от площадки. **Растительность** — типчак (*Festuca valesiaca* SCHLEICH. EX GAUDIN), полынь (*Artemisia lerchiana* WEB, *A. pauciflora* WEBER ex STECHM. и другие); изредка и в отдалении от площадки встречаются ковыли (*Stipa* sp.) и другие травы. **Подстилка** деструктивная, маломощная, покрывает 10—20 % поверхности почвы. Состоит из остатков местных трав. **Почва** — каштановая, (каштановая), глубокосолонцеватая, среднемощная, тяжелосуглинистая, на лёссовидном карбонатном суглинке; строение профиля А—В—Vca—Vcs—BDsa. Почва вскипает с 33 см (горизонт В), слабо — с 25 см (граница между горизонтами А и В). Присутствует белоглазка.

## ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1. МЕТОДЫ ОТБОРА И УЧЁТА ОПАДА

#### 3.1.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОПАДОУЛОВИТЕЛЕЙ

В качестве основного прибора применяли круглые ОУ  $\varnothing$  16 см ( $0,02 \text{ м}^2$ ) и аналогичные  $\varnothing$  36 см ( $0,10 \text{ м}^2$ ), и те, и другие — высотой около 30—40 см (рис. 12, а также рис. 8, 10, 11 в гл. Объекты исследования). Обе разновидности представляют собой проволочный каркас, в который установлен съёмный мешок, который крепится прищепками. Для лиственных ФЦ использовали мешки из териленовой сетки с размером ячейки около 1,3 мм. Для фитоценозов, где с опадом поступает заметное количество мелкой хвои, сетчатые ОУ оказались малопригодны, поскольку существенная часть хвои теряется через ячейки, поэтому, в таких ФЦ использовали опадоуловители из нетканого полимерного полотна (спанбонда).

Общий опад трав специально не учитывали, но отбирали части травянистых растений, попадающие в ОУ, в том числе, отбирали части полёгших трав, оказавшиеся непосредственно над площадью отбора. Объекты, которые не помещались в ОУ целиком — лежащие поверх ОУ ветки, полёгшие травы, — отбирали следующим образом: ту их часть, которая находилась непо-



Рис. 12. Опадоуловители диаметром 16 см и 36 см с мешками из плотного материала.

средственно над опадоуловителем, отламывали или отрезали, и отбирали вместе с остальным опадом. Это не касалось живых низких многолетних растений, которые произрастали рядом с ОУ и нависали над ними.

Опадоуловители применяли только на городских объектах. На остальных площадках, которые расположены на неогороженных территориях, ОУ не применяли по причине отсутствия технической возможности отбирать опад достаточно часто, а также из опасений, что они могут быть испорчены или украдены вследствие их весьма приметного вида.

### **3.1.2. РЕЖИМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОСТУПЛЕНИЕМ ОПАДА**

Наблюдение за динамикой поступления опада в ФЦ **лизиметров** ведётся с 29 сентября 2013 года и подразделяется на два этапа.

**С 29 сентября 2013 г. по 29 июня 2015 г.** в исследование были включены только лизиметры, занятые лесными насаждениями, а именно, лизиметры №№ 31—42. На этом этапе использовались ОУ диаметром 16 см с сетчатыми мешками. Отбор опада проводился строго один раз в месяц, включая зимний период. Фракционирование опада не выполнялось. На каждом лизиметре было установлено по 1—2 ОУ — всего 24 шт. на 14 лизиметрах. С 29 октября 2014 г. наблюдение было распространено также на лизиметры №№ 43 и 44 (залежь, занятая видами подроста и подлеска), на поверхность почвы которых поступает значительное количество древесного опада от местных растений, а также с деревьев, произрастающих на лизиметрах 41 и 42.

Опадоуловители столь малого размера использовали из тех соображений, что отчуждение заметного количества опада из модельных экосистем малой площади может нарушить течение биологического круговорота, и потому нежелательно. Малый ОУ занимает 0,24 % площади лизиметра. Однако, было отмечено, что малые ОУ ( $\varnothing$  16 см), хотя и пригодны для ориентировочной оценки поступления опада, всё же не обеспечивают достаточной точности отбора — можно наблюдать, что крупные объекты, например, кленовые листья, не помещаются в малые ОУ, застревают в них и препятствуют поступлению прочих компонентов, что приводит к недоотбору опада. Кроме того, пробы, накапливающиеся в малых ОУ, часто имеют недостаточный объём для того, чтобы оценить поступление отдельных компонентов. Поэтому ОУ  $\varnothing$  16 см были заменены на ОУ  $\varnothing$  36 см, которые занимают по 1,23 % площади лизиметра.

**С 29 июня 2015 г. по настоящее время** используются ОУ  $\varnothing$  36 см, по одному на каждом из 20 лизиметров. На лизиметрах, где в поступающем опаде присутствует еловая хвоя (еловый лес, лизиметры №№ 31—34 и смешанный лес, лизиметры 35—38), используются ОУ с мешками из нетканого полотна, на остальных — с мешками из терилоновой сетки. Периоды накопления опада примерно соответствуют вегетационным сезонам: отбор обычно проводится перед началом листопадного периода (конец сентября — начало октября), затем по окончании листо-

падного периода (конец ноября — начало декабря), сразу после таяния снега (март—апрель), и после распускания листьев (начало июня).

Наблюдение за динамикой поступления опада в **Ботаническом саду** начато 12 апреля 2016 г. во всех ФЦ за исключением тополёвника, где ОУ были установлены 28 сентября 2017 года. В ельнике, лиственничнике, а также в берёзово-кленовой защитной полосе, в которой на поступает значительное количество хвои, перенесённой из лиственничника, используются ОУ из нетканого полотна, в остальных ФЦ — сетчатые ОУ. Периоды накопления опада в большинстве случаев такие же, как и на лизиметрах с 2015 года.

### 3.1.3. ОЦЕНКА ПЕРЕНОСА ОПАДА В ФИТОЦЕНОЗАХ БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Оценку переноса опада проводили в нескольких вариантах.

1. Для оценки переноса опада **по поверхности почвы** сопоставляли количество опада, отбираемого каркасными ОУ  $\varnothing$  36 см, с количеством опада, остающегося на поверхности почвы после перераспределения ветром. Последнее определяли с помощью полотен из терилоновой сетки площадью 2,0—4,7 м<sup>2</sup>, которые не имели бортов и потому не препятствовали перемещению опада. В каждом фитоценозе размещали по одному полотну на поверхности почвы и фиксировали по краям проволочными шпильками. Период накопления опада — с 17 октября по 15 ноября 2018 г. (29 дней).

2. Для оценки **общего выноса** опада из одной из защитных полос БС МГУ проводили отбор опада с поверхности почвы по пунктирной трансекте, которая начиналась в защитной полосе БС МГУ, пересекала ограду Ботанического сада (забор на бетонном основании, см. рис. 10), затем газон, занятый травяной растительностью, тротуар, второй газон с высаженными яблонями, и заканчивалась вблизи проезжей части Мичуринского проспекта. Отбор проводили 14 октября 2016 г. с десяти площадок по 0,25 м<sup>2</sup>.

3. Для оценки переноса опада между соседними БГЦ (в процессе дефолиации) использовали ОУ, попарно расставленные по двум **трансектам** (см. рис. 8, 10, 11, 12), одна из которых пересекала по прямой линии ельник и грабинник, другая — берёзово-кленовую полосу и лиственничник, по 12 пар ОУ в каждой. Выбор объектов обусловлен тем, что в каждой паре фитоценозов есть деревья-эдификаторы, которые встречаются только в одном ФЦ данной пары и не встречаются в других соседних ФЦ: ель и граб для одной трансекты, и лиственница — для другой, что позволяет определить происхождение опада. Период накопления опада в ОУ трансекты *ельник — грабинник* — с 23 сентября по 28 октября 2019 г., в ОУ трансекты *берёза+клён — лиственничник* — с 23 сентября по 11 ноября 2019 г.

Распределение перенесённого опада в пределах трансект описывается экспоненциальными уравнениями вида  $y = a \cdot e^{bx}$ , и его общее поступление можно рассчитать, проинтегрировав соответствующую функцию по общей формуле:

$$\int_{x_1}^{x_2} a e^{bx} dx = \frac{a(e^{bx_2} - e^{bx_1})}{b}, \quad (2)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — пределы интегрирования (положение точек в трансекте,  $m$ ),  $a$  и  $b$  — коэффициенты, полученные с помощью программы Microsoft Excel. Одним пределом интегрирования служит  $-\infty$  или  $+\infty$ , другим пределом — граница фитоценоза, продуцирующего исследуемый опад.

Распределение неперенесённого опада описывается линейными функциями вида  $y = kx + n$ , и его поступление может быть рассчитано по общей формуле:

$$\int_{x_1}^{x_2} (kx + n) dx = \frac{(kx_1 + n) + (kx_2 + n)}{2} \cdot (x_2 - x_1), \quad (3)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — пределы интегрирования (положение точек в трансекте,  $m$ ),  $k$  и  $n$  — коэффициенты, полученные с помощью программы. Единицы измерения получаемой величины —  $г/м$ , где  $метр$  — ширина условной полосы, длина которой ограничена пределами интегрирования.

### 3.1.4. ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДОВ ОТБОРА И УЧЁТА ОПАДА

Для сравнительной оценки эффективности отбора опада большие ( $\varnothing$  36 см, пл. 0,10 м<sup>2</sup>) и малые ( $\varnothing$  16 см, пл. 0,02 м<sup>2</sup>) опадоуловители были установлены попарно. Наблюдение включает три этапа: (1) на лизиметрах почвенного стационара в октябре 2016 г. устанавливали по одной паре ОУ на каждом лизиметре, занятом лесной растительностью, всего 12 пар; (2) в лиственничнике, в сосняке и в берёзово-кленовой защитной полосе БС МГУ в октябре—ноябре 2018 года устанавливали по 5 пар ОУ, расположение пар в каждом фитоценозе — случайное; (3) в октябре 2019 г. в БС МГУ опадоуловители устанавливали в две трансекты: *берёзово-кленовая полоса* — *лиственничник* и *ельник* — *грабник*, по 12 пар в каждой (см. с. 85).

В ходе исследований снежного покрова, выполнявшихся при участии автора, было замечено, что в образцах снега, отбираемых в снегомерный цилиндр, содержится заметное количество опада, накопленного в снеговой толще. Для того, чтобы оценить, можно ли расценивать эти величины как зимнее поступление опада, в исследуемых БГЦ Ботанического сада (кроме тополёвника) было проведено сравнение запасов детрита в снеговой толще, определённых с помощью снегомерного цилиндра  $\varnothing$  8 см ( $\sim$  0,005 м<sup>2</sup>), сетчатых полотен (см. с. 85) и каркасных опадоуловителей, используемых для режимных наблюдений. По окончании осеннего листопада, но до формирования устойчивого снежного покрова, 6 декабря 2017 года были установлены ОУ  $\varnothing$  36 см (по пять в каждом ФЦ), а также сетчатые полотна на поверхности почвы, по одному в каждом ФЦ, площадью не менее 3 м<sup>2</sup>. Затем, 27 марта 2018 года, незадолго до начала интенсивного таяния снега, были отобраны пробы снега снегомерным цилиндром непосредственно над полотнами, чтобы исключить случайный отбор опада, поступившего ранее, по шесть по-

вторностей в каждом фитоценозе. Пробы снега растапливали при комнатной температуре и фильтровали. Опад на полотнах и в ОУ отбирали вскоре после таяния снега, 12 апреля 2018 г.

### 3.1.5. ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ОПАДА

Образцы опада высушивали при комнатной температуре, и дальнейшие работы выполняли с воздушно-сухими образцами. Опад разбирали на основные морфологические составляющие, перечень которых зависит от особенностей опада каждого ФЦ. Выделяли следующие фракции:

- **Хвоя и мелкий детрит.** Хвою ели и лиственницы вместе с мелким детритом отделяли просеиванием через сито с продолговатыми ячейками 2×20 мм. Практика показала, что количество хвои, которая не проходит через такое сито, пренебрежимо мало, а в материале, просеянном через сито, преобладает хвоя и пренебрежимо мало количество мелкого детрита. Хвою сосны отбирали вручную.
- **Семена-крылатки** — семена клёна, ясеня, липы и прочие семена, способные переноситься ветром, обнаруживались во всех без исключения ФЦ, в том числе и в тех, в которых соответствующие деревья в древостое отсутствовали.
- **Ветки (ветки и кора).** Как правило, из опада каждого фитоценоза выделяли отдельно ветки лиственных деревьев и ветки хвойных деревьев.
- **Шишки** отделяли от веток и учитывали отдельно.
- **Листья.** В наблюдениях, связанных с переносом опада, листья дополнительно разбирали по видовой принадлежности.
- **Несортируемый детрит (без хвои)** — все объекты, идентифицировать которые не представлялось возможным, и которые не проходят через сито с ячейками 2×20 мм, если оно было использовано.
- **Зелёные ветки хвойных деревьев** — выделялись в отдельных случаях, когда отделить хвою от веток было затруднительно.
- **Травы** — части трав, попадающие в опадоуловители.
- **Зоогенные объекты** — насекомые, перья и прочее.

Опад отобранный в БС МГУ иногда объединяли по одноимённым ФЦ, а затем фракционировали общую пробу. Фракционирование опада, отобранного на лизиметрах, всегда выполняли для каждого образца отдельно.

## 3.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ.

### МЕТОД СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Общее описание подстилок уже само по себе позволяет выносить общие суждения о скорости преобразования детрита на основе морфологических характеристик и принадлежности к тому или иному типу (см. с. 99 «Методы исследования подстилок»). Для количественной оценки скоростей разложения было использовано два подхода. Первый — сопоставление запасов лесных подстилок и поступления опада. Интенсивность разложения оценивали по шкале, предложенной Л. Е. Родиным и Н. И. Базилевич (1965), а также в градациях Л. А. Гришиной (1986) (см. табл. 4). Вторым подходом — непосредственное наблюдение за процессом разложения **с т а н - д а р т и з и р о в а н н ы х о б р а з ц о в**, закладываемых в лесную подстилку непосредственно на исследуемой площадке.

Использовали образцы как *стандартных* материалов, одинаковых на всех опытных площадках, так и образцы *нативных* материалов, каждый из которых генетически связан с растительностью исследуемых с его помощью БГЦ (об используемых терминах — см. рис. 2). В качестве *нативных* материалов использовали активные фракции местных подстилок; каждый нативный материал закладывали в том же биогеоценозе, в котором он был отобран. В качестве *стандартных* материалов использовали целлюлозу, чай, и древесину.

#### 3.2.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

##### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЗЛАГАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Использование активных фракций местной подстилки в качестве **нативного материала** имеет целью наблюдение процессов разложения детрита в их естественном виде, или, по крайней мере, близком к таковому. Многие авторы используют образцы листьев или хвои, без веток, шишек и прочих сравнительно устойчивых компонентов, предполагая, что такой материал в ФЦ соответствующего флористического состава будет демонстрировать динамику разложения, более или менее близкую к естественной.

Выше, по итогам анализа литературы, был сделан вывод, что **стандартного** материала, который мог бы объективно отражать естественные процессы разложения в широком диапазоне условий, по-видимому, существовать не может. Поэтому, для наших целей было выбрано три материала, которые использовались в качестве стандартных, а для того, чтобы оценить особенности их разложения в различных условиях, были выбраны опытные площадки в широком диапазоне гидротермических условий и с различным флористическим составом.

**Древесину** обычно не используют в качестве стандартного материала в исследованиях, проводимых в широком диапазоне условий. В литературе удалось найти лишь исследования,

посвящённые колонизации древесных блоков или остатков различными организмами (Частухин, Николаевская, 1948; 1969; Bradford et al, 2014), или локальным особенностям разложения (Heal, French, 1974), или запасам углерода в древесных остатках (в т. ч. порубочных) разной степени разложенности (Осипов и др., 2019), но во всех этих работах древесина используется как нативный материал (об используемой терминологии см. рис. 2), генетически связанный с исследуемым фитоценозом. Поэтому, в целях развития метода было решено опробовать древесину в качестве стандартного материала, то есть материала, используемого для исследования процессов разложения в географическом аспекте, и не имеющего генетической связи с объектами исследования. Кроме того, предполагалось, что древесина будет разлагаться сравнительно медленно, что позволит сгладить влияние сезонных особенностей климата и получить более объективные данные по многолетним наблюдениям.

**Целлюлоза** в том или ином виде довольно часто используется для схожих исследований. В развитие метода этот материал был опробован для исследования процессов разложения в виде фабричных хлопковых ватных дисков — в такой форме этот материал легкодоступен, что открывает возможности для стандартизации исследований, по аналогии с использованием фабричных чайных пакетиков определённой марки.

Используемые в данном исследовании древесина и целлюлоза имеют между собой большее сходство, чем с прочими используемыми материалами. Хлопок, называемый в данном исследовании целлюлозой, содержит 95—96 % этого вещества (Баженов, 1982, стр. 31), в то время как древесина может содержать порядка 50 % целлюлозы, в частности, древесина берёзы, в зависимости от вида, содержит около 31,0—45,8 %, остальное приходится на лигнин (19,5—21,2 %) и гемицеллюлозы (22,0—27,8 %) (Никитин и др., 1978, стр. 82).

Использование **чая в фабричных пакетиках** предлагают J. A. Keuskamp et al. (2013) в качестве стандартного и хорошо воспроизводимого метода. Однако, специфический состав этого материала не даёт полной уверенности в том, что его разложение будет достоверно отражать естественные процессы. Поэтому было решено модифицировать эту методику в соответствии с применяемыми методами работы с другими образцами, и опробовать её на примере городских БГЦ, а также БГЦ зонального ряда.

Таким образом, проведение исследований по разложению не только на урбанизированных и фоновых территориях, но и на объектах зонального ряда, имеющих существенные различия по общим климатическим условиям, по растительности, увлажнению и свойствам подстилок, обосновывается необходимостью проверки используемых вариаций *методики стандартизованных образцов* для корректной интерпретации данных, получаемых по основным объектам.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

**Образцы древесины** (рис. 13) были изготовлены из фабричной берёзовой штанги диаметром 2,5 см, которую напильвали на фрагменты массой около 2,8 г ( $\pm 0,8$  г). **Образцы целлюлозы** представляли собой фабричные хлопковые ватные диски, и упаковывались по  $\sim 1$  г (2 шт.) на каждый образец. **Образцы чая**, по аналогии с методикой Keuskamp et al. (2013), представляют собой фабричные чайные пакетики Lipton™ Green Gunpowder. Сами пакетики изготовлены из полимерного материала и не подвержены заметному разложению.

**Образцы нативных материалов** изготавливали следующим образом. Отбирали образец подстилки с особым вниманием к тому, чтобы он содержал как можно меньше минеральных примесей, удаляли трудноразлагаемые компоненты (ветки, шишки и т. п.), затем материал, при необходимости, измельчали ножницами до размерности около 1—1,5 см, чтобы приготовить множество образцов, схожих по содержанию компонентов. Таким образом, образцы из лиственных лесов состояли в основном из листовой массы, образцы для сосняка — из сосновой хвои; образцы для травяных сообществ — из степного войлока с небольшим участием зелёных частей травянистых растений. В серии площадок 22, 23 и 24 (залежь на почве разной степени смывости, Чашниково) и в серии площадок 12, 13 и 14 (сосновый бор, Воронежская область) был использован одинаковый нативный материал, собранный на одной из площадок соответствующей серии.

### ФАСОВКА ОБРАЗЦОВ

Образцы фасовали в мешочки, сшитые из терилоновой (син. — полиэтилентерефталатной) сетки с размером ячейки около 1,3 мм, имеющие размер около 8×12 см, а эффективный размер (после завязывания) около 8×8 см. Для шитья и завязывания мешочков использовали бытовую полиамидную нить. Образцы нативных материалов упаковывали в мешочки при полевой влажности, оставляя пробу исходного материала для её определения. Работы по приготовлению и



Рис. 13. Фасовка образцов древесины в терилоновые мешочки.

фасовке нативного материала иногда проводили непосредственно в поле — в таком случае взвешивание проводили на портативных весах, имеющих точность  $\pm 0,01$  г. Образцы дерева и целлюлозы фасовали по одному фрагменту древесины, или по два ватных диска в один мешочек, без измельчения. Чай фасовали в териленовые мешочки вместе с фабричными пакетиками-пирамидками, не вскрывая их, но удалив нить с этикеткой. Предварительные опыты (2015—2016 гг.), в рамках которых чай закладывали без дополнительной упаковки, показали, что фабричные пакетики недостаточно прочны, и часто рвутся, что приводит к потере материала. Вместе с образцом в мешочек помещали этикетку с номером, заклеенную клейкой лентой или выбитым с помощью ударных клеев на алюминиевой пластинке.

Впоследствии было отмечено, что в некоторых случаях существенная часть нативного материала теряется через ячейки сетчатых мешочков, в особенности — мелкая хвоя, а также существенно затронутый разложением листовой материал. В связи с этим, можно предложить использовать более мелкую сетку для изготовления мешочков, однако, неизвестно, будет ли ошибка от того, что образец станет недоступным для более крупных организмов, меньше, чем ошибка, обусловленная потерей материала.

## **РАЗМЕЩЕНИЕ ОБРАЗЦОВ НА МЕСТНОСТИ**

В общем случае, для каждой опытной площадки выбирали место, наиболее типичное для выбранного биогеоценоза, то есть, не характеризующееся нетипичной для выбранного биогеоценоза растительностью или нарушениями рельефа. Площадки выбирали по возможности в отдалении от дорог и троп, от построек, оград и прочих объектов, свидетельствующих о наличии антропогенного влияния, или привлекающих повышенное внимание со стороны населения, иногда — в окружении буреломов и поваленных стволов, если их наличие не делало участок существенно отличным от окружающего пространства биогеоценоза. О принципах выбора самих биогеоценозов см. гл. «Объекты исследований».

Образцы привязывали к нескольким капроновым нитям длиной около 3 м каждая, таким образом, чтобы можно было при каждом очередном отборе срезать их по одному или по несколько штук, не разрезая общую нить. Капроновую нить крепили к стволу дерева или кустарника, оставляя запас длины до первого образца, чтобы образцы не оказались на приствольном повышении; в степи (пл. 16) образцы крепили к вбитым в землю деревянным кольям. Стволы или колья помечали цветными флажками из клейкой ленты. Образцы размещали в толще лесной подстилки или степного войлока (но не в минеральных горизонтах почвы) или, в случае с маломощными подстилками, на поверхности почвы. На участках с ферментативными и гумифицированными подстилками образцы размещали в толще верхнего подгоризонта, но по мере естественного накопления нового опада и разложения подстилок, некоторые образцы со временем оказывались в ферментативном или гумифицированном подгоризонте. В случаях, когда

было отмечено, что положение образцов нарушается из-за роста трав или перераспределения опада, образцы фиксировали шпильками из изолированной проволоки.

Для снятия географических координат и записи маршрутов использовали смартфон, оснащённый приёмниками сигналов GPS и ГЛОНАСС, с установленным приложением Locus Map Free<sup>10</sup> для операционной системы «Android» или Калькулятор GPS<sup>11</sup> и Калькулятор GPS PRO для о. с. «Windows Phone». Указанные приложения позволяют снимать географические координаты с указанием точности позиционирования (которая может составлять до  $\pm 3$  м) и сохранять их в памяти устройства, отображать азимут или направление на искомую точку, записывать пройденные маршруты (т. н. *треки*), а также экспортировать и импортировать данные в виде файлов с расширением GPX.

### **ЧИСЛО ЗАЛОЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ И ДАТЫ ИХ ЗАКЛАДКИ**

В табл. 7 приводятся даты закладки образцов, их число, и число площадок на объектах основных групп. В БГЦ Ботанического сада и УОПЭЦ «Чашниково» образцы закладывали из расчёта, что будет отбираться примерно по 1 образцу в месяц, или пропорционально большее число образцов через более длительные промежутки времени. Древесину предполагалось отбирать в течение трёх лет, остальные материалы — в течение года. По мере накопления данных эти сроки были скорректированы: древесину, нативные материалы и чай отбирали примерно в течение трёх лет, целлюлозу — в течение полутора—двух лет. На площадках 22, 23 и 24 в Чашниково, которые были запланированы как вспомогательные, число образцов было уменьшено втрое. По маршруту зональной практики планировалось отбирать по три образца древесины и по одному образцу нативных материалов в год в течение трёх лет, а также по два образца чая и целлюлозы в течение двух лет. В общей сложности было заложено 1212 образцов.

Для некоторых образцов на площадках 1—18 удалось получить более одного значения остатка массы (*ОМ<sub>T</sub>*). Если при очередном наблюдении образцы на опытной площадке оказывались сухими, все образцы взвешивали вместе с упаковкой при полевой влажности. Те из них, что не подлежали отбору в данный момент, закладывали обратно в подстилку или на поверхность почвы. Затем из общей массы образца вычитали массу упаковки, которая была взвешена заранее, при фасовке образцов. Этот метод не использовали для влажных образцов, поскольку влажность упаковки не равна влажности образца, а также для заметно загрязнённых образцов, а также для образцов, которые нельзя было извлечь, не нарушив их расположения в подстилке.

---

<sup>10</sup> Locus Map Free — наружная GPS-навигация и карты. // Google Play (Интернет-ресурс). — <https://play.google.com/store/apps/details?id=menion.android.locus&hl=ru> (16.08.2019).

<sup>11</sup> Калькулятор GPS (программа). // Windows Store. (Интернет-ресурс). — <https://www.microsoft.com/ru-ru/p/Калькулятор-gps/9wzdnrcrfxnb?activetab=pivot:overviewtab> (16.08.2019).

Если в ходе дальнейшей работы выяснялось, что полевая влажность отобранных образцов с той же площадки была выше ~ 5 %, массу образцов, взвешенных в упаковке, выбраковывали.

Табл. 7. Число стандартизированных образцов, заложенных на опытных площадках.

Число образцов × число площадок	Даты закладки	Древесина берёзы	Нативные материалы	Чай Lipton™ Green Gunpowder	Целлюлоза	Сумма
УОПЭЦ «Чашниково»	16.07.2016*	144 (36×4) 36 (12×3)	48 (12×4) 12 (4×3)	—	48 (12×4) 12 (4×3)	300 (6 пл.)
Ботанический сад МГУ	(1) 30.06.2015	—	—	60 (15×4)	—	60 (4 пл.)
	(2) 14.12.2015	—	—	100 (25×4)	—	100 (4 пл.)
	(3) 29.09.2016	216 (36×6)	72 (12×6)	72 (12×6)	72 (12×6)	592 (6 пл.)
Объекты по зо- нальной практике	июнь 2016; июнь 2017**	144 (9×16)	48 (3×16)	64 (4×16)	64 (4×16)	320 (16 пл.)
Сумма		540 (29 пл.)	180 (29 пл.)	346 (22 пл.)	196 (29 пл.)	1212

О б о з н а ч е н и я : «144 (36×4)» — заложено 144 образца (по 36 образцов на 4 площадках); «—» — не закладывали; (1), (2) и (3) — наблюдения 1 и 2 (предварительные) и 3 (основное) соответственно.

П р и м е ч а н и я . \* За исключением пл. 20, на которой образцы заложены 02.10.2016. \*\* В течение июня, согласно плану зональной практики; в 2016 году закладывали только древесину и нативные материалы, в 2017 были добавлены чай и целлюлоза.

### 3.2.2. ПОКАЗАТЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ РАЗЛАГАЕМОГО МАТЕРИАЛА

В качестве основного параметра разложения обычно используют изменение массы образцов с течением времени (рис. 14). Данные чаще всего представляют в виде соответствующего графика зависимости остатка массы ( $ОМ$ , %) или потери массы ( $ПМ = 100 - ОМ$ , %) от продолжительности экспозиции ( $T$ , годы).

Иногда, в зависимости от поставленных задач, рассчитывают и другие показатели, например, скорость разложения. Последняя может быть рассчитана в двух вариантах: (1) скорость разложения в каждый период наблюдений (обозначим её как  $ср_n$ ), и (2) общая скорость разложения по состоянию на дату очередного наблюдения (обозначим как  $СР_n$ ). Допустим, что проведено  $n$  наблюдений: 0, 1, ...,  $n-1$ ,  $n$ . Нулевое наблюдение — это дата закладки образцов, когда  $ОМ_0 \triangleq 100$  %. Таким образом,  $ср_n$  есть скорость разложения, наблюдаемая в период между  $n-1$  и  $n$  наблюдениями, а  $СР_n$  — в период от нулевого наблюдения (т. е. от начала экспозиции) до  $n$ -ного наблюдения:

$$ср_n = \frac{ОМ_{n-1} - ОМ_n}{T_n - T_{n-1}}, \quad (4)$$

где  $cp_n$  — скорость разложения ( $\%/год^{-1}$ ) за период от  $T_{n-1}$  до  $T_n$  (годы);  $OM_{n-1}$  и  $OM_n$  — остаток массы на начало и конец  $n$ -ного периода соответственно (%);

$$CP_n = \frac{OM_0 - OM_n}{T_n}, \text{ или } CP_n = \frac{100 - OM_n}{T_n}, \quad (5)$$

где  $CP_n$  — общая скорость разложения на момент  $n$ -ного наблюдения,  $\%/год^{-1}$ ;  $OM_0$  — начальная масса образца ( $OM_0 \triangleq 100\%$ );  $OM_n$  — остаток массы на момент  $n$ -ного наблюдения, %;  $T_n$  — продолжительность экспозиции на момент  $n$ -ного наблюдения, годы.

В тех случаях, когда целью является поиск зависимостей между скоростью разложения и климатическими параметрами, а исследование проводится на большом числе площадок, для разложения каждого материала на каждой из них требуется рассчитать единственное значение, обобщающее динамику разложения и характеризующее скорость разложения единственным значением. В качестве такового часто используют остаток (или потерю) массы после определённой продолжительности экспозиции (чаще всего 1 год), или скорость разложения, рассчитываемую как общее изменение массы образца от начального состояния, за определённый период времени ( $CP_n$ ).

Кроме того, существует параметр, предложенный Н. Jenny et al. (1949), но часто приписываемый J. S. Olson (1963) — константа разложения  $k$  (англ. — *decomposition constant*):

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{M_T}{M_0}\right)}{T}, \text{ или } k = -\frac{\ln\left(\frac{OM_T}{OM_0}\right)}{T} \text{ (год}^{-1}\text{)}, \quad (6)$$

где  $M_T$  — масса образца после  $T$  лет экспозиции, г;  $M_0$  — начальная масса образца, г;  $OM_T$  — остаток массы образца после  $T$  лет экспозиции, %;  $OM_0$  — начальная масса образца ( $OM_0 \triangleq 100\%$ ).

В идеальном случае, когда материал в процессе разложения теряет массу по экспоненциальному закону, константа разложения действительно будет величиной постоянной. Если изменение массы образца описывается функцией

$$OM_T = OM_0 \cdot e^{-k \cdot T}, \quad (7)$$

$$\text{то } \frac{OM_T}{OM_0} = e^{-k \cdot T}, \Rightarrow -k \cdot T = \ln\left(\frac{OM_T}{OM_0}\right) \Rightarrow k = -\frac{\ln\left(\frac{OM_T}{OM_0}\right)}{T}. \quad (8)$$

Это означает, что в идеальном случае константа разложения может служить параметром, характеризующим динамику разложения образца на всей продолжительности этого процесса — вне зависимости от того, когда проводилось наблюдение. Однако, если динамика разложения образца не подчиняется экспоненциальной функции (вследствие сезонных и/или

многолетних колебаний условий среды, или внутренних свойств самого материала), значения  $k$  будут разными для разных  $T$ . Таким образом, для получения наиболее объективных данных желательнее не ограничиваться единственным наблюдением, а иметь данные по изменению массы материала в динамике.

Схожий параметр предлагает А. Д. Фокин (1986): «относительная скорость разложения ( $\beta$ ), характеризующая уменьшение содержания вещества за год в долях; за единицу принимается количество вещества на начало каждого года».

Схема, представленная на рис. 14, иллюстрирует принципы расчёта основных показателей изменения массы материалов в процессе разложения. Если построить кривые изменения каждого из этих показателей с течением времени<sup>12</sup> (рис. 15), становится видно, что ценную информацию об исследуемом явлении содержит кривая остатка массы ( $OM_T$ ), на которой заметна сезон-

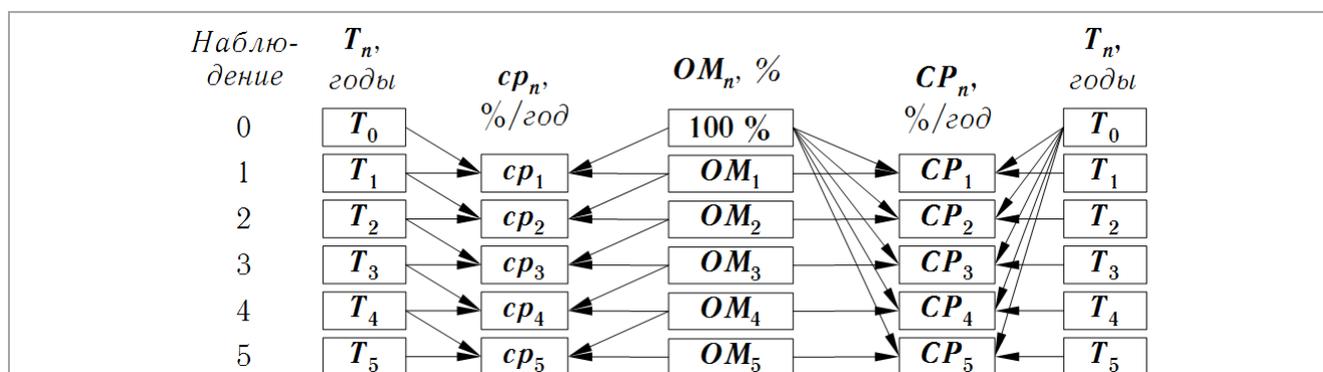


Рис. 14. Варианты расчёта скорости разложения.

О б о з н а ч е н и я .  $OM_n$  — остаток массы материала на момент  $n$ -ного наблюдения, %;  $cp_n$  — скорость разложения между  $n-1$ -м и  $n$ -ным наблюдениями,  $\%/год^{-1}$ ;  $CP_n$  — скорость разложения за период от начала экспозиции до  $n$ -ного наблюдения,  $\%/год^{-1}$ ;  $T_n$  — общая продолжительность экспозиции на момент  $n$ -ного наблюдения,  $годы$ ; индексы 1, 2, ...,  $n$  — номера наблюдений.

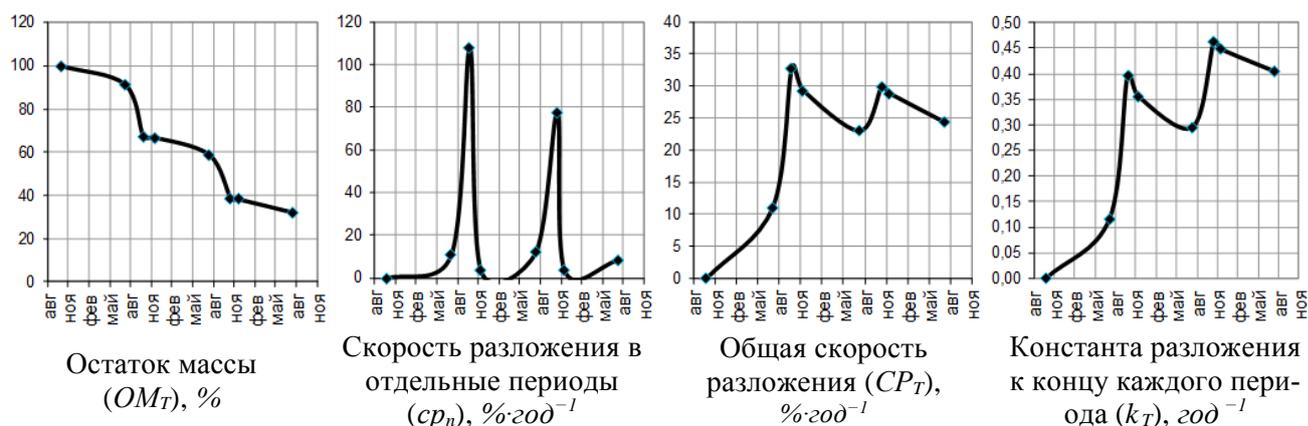


Рис. 15. Основные показатели скорости разложения, рассчитанные по гипотетическому набору данных, представленные в динамике. По оси абсцисс — даты наблюдений.

<sup>12</sup> В качестве примера использован правдоподобный набор данных, схожий с реальной динамикой разложения древесины, наблюдавшейся в экспериментах автора.

ная цикличность динамики разложения, и кривая скорости разложения в каждый период между наблюдениями ( $cp_n$ ), которая наглядно иллюстрирует, в какие месяцы разложение наиболее интенсивное. Форма кривой общей скорости разложения, и форма кривой константы разложения не представляют важной информации об исследуемом процессе, и, вместе с тем, являются наглядной иллюстрацией того, насколько значительно может варьировать значение этих показателей в зависимости от момента наблюдений.

Следует отметить, что, хотя изменение массы и является, в силу наглядности и простоты определения, наиболее часто используемым параметром образца, аналогичным образом можно представить и изменение содержания в образце тех или иных компонентов — минеральных примесей, водорастворимых соединений, углерода, азота, органических веществ и пр., а также изменение соотношения компонентов.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗЛОЖЕНИЯ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЁТА

Для детального описания динамики разложения материалов используется непосредственно **остаток массы** образцов после определённой продолжительности экспозиции ( $OM_T$ , %).

Для получения параметров, **обобщающих** скорость разложения каждого материала на каждой опытной площадке, имеющиеся значения  $OM_T$  аппроксимировали экспоненциальной и линейной функциями с помощью программы Microsoft Excel 2003 (функции ЛГРФПРИБЛ и ЛИНЕЙН) с дополнительным условием — прохождение линии тренда через точку  $T = 0$ ;  $OM_T = 100$  %. Без этого условия получаемое уравнение будет некорректным, поскольку начальная масса образца ( $OM_T$  при  $T = 0$ , или  $OM_0$ ) по определению равняется 100 %, и не подвержена варьированию или каким-либо ошибкам, в отличие от экспериментальных значений  $OM_T$ .

Уравнение экспоненциальной функции, описывающей изменение остатка массы образцов с течением времени, имеет вид:

$$OM_T = OM_0 \cdot e^{-k \cdot T}, \text{ или } OM_T = 100 \cdot e^{-k \cdot T}, \quad (9)$$

где  $OM_T$  — остаток массы образца после  $T$  лет экспозиции, %;  $OM_0$  — начальная масса образца ( $OM_0 \triangleq 100$  %);  $k$  — константа разложения, год<sup>-1</sup> (см. также формулу 6).

Иногда оказывается, что линейная функция лучше (с бóльшим значением коэффициента детерминации  $R^2$ ) аппроксимирует динамику разложения материала, чем экспоненциальная — например, когда материал разлагается сравнительно медленно и экспоненциальный тренд не успевает проявиться, или при большом варьировании, обусловленном сезонными или пространственными особенностями процесса. Линейная функция имеет вид:

$$OM_T = -CP \cdot T + OM_0, \text{ или } OM_T = -CP \cdot T + 100, \quad (10)$$

где  $OM_T$  — остаток массы материала после  $T$  лет экспозиции, %;  $CP$  — скорость разложения, %·год<sup>-1</sup>;  $OM_0$  — начальная масса образца ( $OM_0 \triangleq 100$  %).

Таким образом, в каждом из двух последних уравнений есть величина, значение которой не зависит от продолжительности экспозиции ( $T$ ), и которая может служить обобщающей характеристикой скорости разложения — константа разложения  $k$  ( $\text{год}^{-1}$ ) для экспоненциальной функции и скорость разложения  $CP$  ( $\% M_0 \cdot \text{год}^{-1}$ ) — для линейной. Следует обратить внимание, что скорость разложения  $CP$  для любого участка кривой  $OM = f(T)$  измеряется в процентах от начальной массы образца ( $M_0$ ), в то время как константа разложения  $k$  для отрезка кривой  $OM(T_n) \dots OM(T_{n+1})$  измеряется в долях от  $OM(T_n)$ . Таким образом, несмотря на то, что обе величины измеряются в *долях массы образца за год*, их значения (при прочих равных условиях) не равны, и сравнение их значений не правомерно.

В случаях, когда речь идёт о выборе подходящей продолжительности экспозиции при планировании новых наблюдений, удобно в качестве обобщающей характеристики динамики разложения материала использовать величину, измеряемую в единицах времени. В качестве такой величины предлагается использовать период, за который образец теряет 50 % массы. По аналогии с *периодом полураспада* квантовомеханической системы, назовём этот показатель *периодом полуразложения* ( $T^{1/2}$ ). Этот показатель впервые предложен для описания разложения детрита А. Д. Фокиным (1986) под названием «*время половинного разложения*». Автор также предлагает использовать *время практически полного разложения* — на 95 %. Период полуразложения в настоящей работе рассчитывается из уравнения функции, аппроксимирующей динамику изменения массы образцов. Если динамика потери массы описывается экспоненциальной функцией  $OM_T = OM_0 \cdot e^{-kT}$ , то

$$T = -\frac{\ln\left(\frac{OM_T}{OM_0}\right)}{k}, \Rightarrow T^{1/2} = -\frac{\ln\left(\frac{50\%}{100\%}\right)}{k}, \Rightarrow T^{1/2} = -\frac{0,693147}{k}, \quad (11)$$

где  $OM_T$  — остаток массы материала после  $T$  лет экспозиции (в данном случае  $OM_T = 50\%$ );  $OM_0$  — начальная масса образца ( $OM_0 \triangleq 100\%$ ),  $k$  — константа разложения,  $\text{год}^{-1}$ .

Если динамика потери массы описывается линейной функцией  $OM_T = -CP \cdot T + OM_0$ , то

$$T = \frac{OM_0 - OM_T}{CP}, \Rightarrow T^{1/2} = \frac{50\%}{CP}, \quad (12)$$

где  $OM_T$  — остаток массы материала после  $T$  лет экспозиции (в данном случае  $OM_T = 50\%$ );  $CP$  — скорость разложения,  $\% \cdot \text{год}^{-1}$ ;  $OM_0$  — начальная масса образца ( $OM_0 \triangleq 100\%$ ).

Если аппроксимировать один и тот же набор данных и экспоненциальной функцией, и линейной, и из уравнений этих функций рассчитать период полуразложения (обозначим эти варианты расчёта как  $T^{1/2}_{(\text{эксп.})}$  и  $T^{1/2}_{(\text{лин.})}$  соответственно), то  $T^{1/2}_{(\text{эксп.})}$  и  $T^{1/2}_{(\text{лин.})}$  будут различны: если линейная и экспоненциальная функции пересекаются при  $OM < 50\%$ , то  $T^{1/2}_{(\text{лин.})} > T^{1/2}_{(\text{эксп.})}$ . При этом, если имеются данные только для начальных этапов разложения (минимальные зна-

чения  $OM$ , которые удалось получить, составляют  $> 50\%$ ), следует ожидать, что пересечение линий тренда окажется на значениях более  $50\%$ , и, соответственно,  $T^{1/2}_{(эксп.)}$  будет больше, чем  $T^{1/2}_{(лин.)}$ . Таким образом, несмотря на то, что динамика разложения зачастую лучше аппроксимируется линейной функцией, чем экспоненциальной, для сравнения обобщающих параметров разложения ( $k$ ,  $CP$ ,  $T^{1/2}$ ) всё равно приходится использовать только один из вариантов аппроксимации для всех сравниваемых случаев.

**Параметры линейной аппроксимации** в программе MS Excel получали с помощью функции ЛИНЕЙН<sup>13</sup>, но вместо функции  $OM_T = -CP \cdot T + OM_0$  (формула 10) использовали функцию  $ПМ_T = CP \cdot T + ПМ_0$ , где  $ПМ$  — потеря массы ( $ПМ = 100 - OM$ , %), что позволяет задать дополнительное условие  $ПМ_0 = 0$ , что соответствует  $OM_0 = 100\%$ .

Доверительный интервал для  $CP$  вычисляли как  $\Delta = t_{0,05;df} \cdot SE$ , где  $t_{0,05;df}$  — критерий Стьюдента для уровня значимости  $0,05$  и числа степеней свободы  $df$ ;  $SE$  — стандартная ошибка для  $CP_T$  (вычисляется с помощью функции ЛИНЕЙН).

**Параметры экспоненциальной аппроксимации** получали с помощью функции ЛГРФПРИБЛ<sup>14</sup>, которая возвращает параметры аппроксимации для функции вида

$$OM_T = OM_0 \cdot m^T, \quad (13)$$

где  $OM$  — остаток массы образцов после  $T$  лет экспозиции (в долях от начальной массы);  $OM_0$  — начальная масса образцов (задаётся равной единице);  $m$  — коэффициент, полученный с помощью программы. Поскольку функция  $OM_T = m^T$  и функция  $OM_T = e^{-k \cdot T}$  (формула 9) совпадают, константу разложения  $k$  из уравнения 13 вычисляли следующим образом:

$$m^T = e^{-k \cdot T}, \Rightarrow \log_m(e^{-k \cdot T}) = T, \Rightarrow -k \cdot T \cdot \log_m(e) = T, \Rightarrow -k \cdot \log_m(e) = 1, \Rightarrow k = -\frac{1}{\log_m(e)}. \quad (14)$$

Доверительные границы для  $k$  рассчитывали следующим образом:

$$k \in \left( -\frac{1}{\log_{m+\Delta}} \dots -\frac{1}{\log_{m-\Delta}} \right), \quad (15)$$

где  $\Delta$  — доверительный интервал, рассчитываемый как  $\Delta = t_{0,05;df} \cdot SE$ , где  $df$  — число степеней свободы,  $SE$  — стандартная ошибка для  $m$  (вычисляется с помощью функции ЛГРФПРИБЛ). Поскольку  $k_{\max} - k \neq k - k_{\min}$ , в таблицах будут приводиться доверительные границы в виде « $k_{\min} \dots k_{\max}$ », а не в виде « $x \pm \Delta$ », как для остальных величин.

<sup>13</sup> Функция ЛИНЕЙН // support.microsoft.com (интернет-ресурс). <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/функция-линейн-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d>.

<sup>14</sup> Функция ЛГРФПРИБЛ // support.microsoft.com (интернет-ресурс). <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/функция-лгрфприбл-f27462d8-3657-4030-866b-a272c1d18b4b>.

**Уровень значимости получаемых значений  $CP$  (формула 10) и  $m$  (формула 13) проверяли с помощью  $t$ -критерия. Значение тестовой статистики  $t_0 = \frac{CP}{SE_{CP}}$  или  $t_0 = \frac{m}{SE_m}$ , где  $SE$  — стандартная ошибка  $CP$  или  $m$  (вычисляется с помощью функции ЛИНЕЙН или ЛГРФПРИБЛ), сравнивали с пороговым значением  $t_{\alpha, df}$ , где  $\alpha$  — уровень значимости (0,05),  $df$  — число степеней свободы).  $t_0 > t_{\alpha, df}$  свидетельствует о том, что проверяемые значения  $CP$  или  $m$  не являются случайными<sup>15</sup>. Для оценки соответствующей вероятности  $p(t_0 > t_{\alpha, df})$  использовали функцию СТЬЮДРАСП (двустороннее распределение).**

### 3.2.3. ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕТРИТА (ДЕРИВАТОГРАФИЯ)

Одним из методов исследования органического вещества является термический анализ с получением термогравиметрических кривых (ТГ) и деривативных термогравиметрических кривых (ДТГ). Этот метод обладает рядом преимуществ как в отношении пробоподготовки, так и в отношении информативности (Reh et al., 1987), и может быть использован для диагностирования лигнина и целлюлозы в органогенных материалах, в т. ч., в целях исследования процессов разложения (Трофимов и др., 1999). Метод был опробован на серии образцов нативного материала с площадки 30 (грабник БС МГУ). Анализировали 11 образцов, разлагавшихся в подстилке в течение от  $T = 0$  (исходный образец) до  $T = 2$  года, с величинами остатка массы соответственно от 100 до ~ 35 %, по 1—2 образца для каждого значения продолжительности экспозиции  $T$ . Образцы растирали до пудры, помещали по 80—90 мг в платиновые тигли, и анализировали в воздушно-сухом состоянии на дериватографе Q—1500 D (Паулик и др., 1980) в диапазоне температур 18—1000°C, при скорости нагрева ~10°/мин.

## 3.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛОК

В рамках данной работы на большинстве площадок проводили морфологическое описание подстилок, определение их классификационной принадлежности (Богатырев, 1990) и запасов. Более подробные наблюдения были выполнены для подстилок Ботанического сада. Было проведено два наблюдения. В июне 2017 г. проводили отбор подстилок в пяти повторностях для каждого БГЦ. Пробы отбирали по подгоризонтам, затем пробу каждого подгоризонта разбирали на фракции (компоненты), и каждую фракцию анализировали на содержание сырой золы. Озольнение образцов проводили согласно рекомендациям Л. Е. Родина с соавт. (1968), но с меньшими

---

<sup>15</sup> Простая линейная регрессия в EXCEL. // Excel2.ru (интернет-ресурс). <https://excel2.ru/articles/prostaya-lineynaya-regressiya-v-ms-excel#standart-error-slope>.

массами исходных навесок, составлявшими обычно 1—5 г, в фарфоровых тиглях без крышек, в муфельной печи при постепенном повышении температуры с 200—250 до 450°C. Взвешивание тиглей с золой выполняли на аналитических весах с точностью  $\pm 0,0001$  г. В сентябре 2019 г. был проведён дополнительный отбор подстилок в трёхкратной повторности для определения содержания и общих запасов углерода и азота в подстилках.

Н. И. Базилевич с соавторами предлагают вырезать фрагменты подстилок с помощью металлической рамки 20×20 см (0,04 м<sup>2</sup>) с заострёнными краями, и рекомендуют делать 50 повторностей, указывая, что на однородных пробных площадях можно сократить их число до 20—30 (Базилевич и др., 1978). Поскольку в представляемом исследовании подстилки отбирали или в небольших по площади модельных БГЦ, или непосредственно на площадках, где проводились опыты по разложению стандартизированных образцов, а также в силу того, что в условиях полевых выездов зачастую не было возможности отбирать большое число проб, число повторностей составляло обычно от трёх до пяти, поэтому отметим, что полученные данные в большинстве случаев следует рассматривать как ориентировочные. Для отбора подстилок применяли прямоугольный шаблон пл.  $\sim 0,07$  м<sup>2</sup>. Шаблон прижимали к поверхности подстилки, затем с помощью остро заточенной сапёрной лопаты с прямым лезвием, или с помощью ножа, вырезали фрагмент подстилки по краям шаблона. Не отбираемую подстилку отбрасывали на  $\sim 10$  см от краёв шаблона. С вырезанного участка подстилку отбирали, в зависимости от её строения, или целиком, или, в отдельных случаях, по подгоризонтам или слоям.

В БГЦ, где подстилки характеризуются высокой пространственной неоднородностью, площадки располагали таким образом, чтобы, по возможности, включить в число проб все основные варианты, встречающиеся в биогеоценозе, пропорционально их участию в общей площади. Таким образом, положение тессерах учитывали, но не фиксировали. На площадках 18—21 (УОПЭЦ «Чашниково») и 1—16 (биогеоценозы зонального ряда) подстилки отбирали непосредственно на опытных площадках, на которых закладывали стандартизированные образцы.

В рамках одного отдельного наблюдения на лизиметрах почвенного стационара МГУ в 2013 и 2014 гг., отбор проводили со всей площади каждого лизиметра (в случаях, когда подстилка оказывалась достаточно однородной — с половины площади, или с двух квадратов по  $\frac{1}{4}$  площади). В этом наблюдении отбору подлежал преимущественно лиственный материал — опад текущего года и прошлых лет. Собранный материал взвешивали во влажном состоянии и, после отбора проб на влажность, возвращали на поверхность почвы соответствующих лизиметров.

### 3.4. ОБЩИЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Отбор навесок** из проб большого объёма проводили с особым вниманием к тому, чтобы соотношение компонентов в малой пробе сохранялось неизменным. Для объёмных (5—10 дм<sup>3</sup> и более) проб применяли следующий метод: из большой пробы брали небольшие порции материала и поочерёдно помещали их в две ёмкости, пока исходная проба не оказывалась разделена на две. При необходимости процедуру повторяли. Этот метод позволяет разделить пробу на части, достаточно однородные по содержанию компонентов, и избежать потери мелких фракций. Для небольших образцов, состоящих из более мелких фракций, применяли метод, который используют в минералогии для разделения шлихов на малые однородные пробы: пробу формируют в дорожку, которую частыми движениями кисточки разделяют на две. Процедуру повторяют до тех пор, пока не будет получена проба нужного объёма. **Измельчение проб** до размерности частиц ~ 1 см и менее проводили с помощью ножниц или других ручных инструментов, затем с помощью ножевой мельницы, стараясь не распылять образцы — для этого после ~ 5—10 секунд помола отсеивали фракции, измельчённые до нужной размерности, и продолжали помол более крупных фракций. Измельчение проб до пудры проводили на вибрационной лабораторной мельнице. **Восстановление общих проб** из фракций подстилок проводили, смешивая отобранные ранее фракции в тех же соотношениях, в которых они присутствовали в пробах, согласно результатам фракционирования. **Взвешивание** образцов опада и подстилок, включая отдельные фракции, а также взвешивание стандартизированных образцов, выполняли на технических весах ( $\pm 0,01$  г).

**Содержание углерода и азота** в опаде и подстилках определяли на элементном CNSH-анализаторе твёрдых проб Vario EL III (Elementar, Германия), температура сжигания 1200°C. Анализировали отдельные фракции опада, отобранного в течение примерно одного года — с 15 ноября 2018 по 11 ноября 2019 (всего — 29 проб для 27 фракций), а также общие пробы отдельных подгоризонтов или слоёв подстилок, отобранных 9 сентября 2019 г. (всего — 26 проб для 24 отдельных подгоризонтов, отобранных с 18 площадок, по 3 площадки в каждом БГЦ). Образцы для анализа растирали до пудры.

### 3.5. ОБЩИЕ МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для обработки данных использовали программы Microsoft Office Excel 2003 и 2016, а также StatSoft STATISTICA 10. Во всех расчётах использовали уровень значимости  $\alpha = 0,05$ , если в тексте не указано иного.

**Доверительный интервал ( $\Delta$ )** для средних значений рассчитывали по формуле:

$$\Delta = t_{0,05} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (16)$$

где  $t_{0,05}$  — критерий Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и  $n - 1$  степеней свободы;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение;  $n$  — объём выборки. Для расчёта доверительного интервала в программе MS Excel 2016 используется функция ДОВЕРИТ.СТЮДЕНТ; в MS Excel 2003 доверительный интервал рассчитывается с помощью функций СТЮДРАСПОБР (возвращает значение  $t$ -критерия для заданного уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы) и СТАНДОТКЛОН (возвращает среднеквадратическое отклонение). В тексте после знака « $\pm$ » приводится доверительный интервал. Про доверительный интервал коэффициентов в уравнениях аппроксимации см. с. 98.

Оценку **статистической значимости различий средних значений** проводили с помощью  $t$ -критерия Стьюдента (инструменты «Т-критерий для зависимых выборок» и «Т-критерий для независимых выборок» в программе STATISTICA). В качестве зависимых рассматриваются выборки равного объёма ( $n$ ), в которых каждому значению из одной выборки соответствует значение из другой, например — значения одного и того же параметра, измеренное двумя методами в каждой из  $n$  точек опробования. В работе приводится уровень значимости различия ( $p$ ) — вероятность того, что наблюдаемое различие является случайным. Различия считаются значимыми при  $p \leq 0,05$ . Слова «значимость»; «значимые различия» и т. п. в тексте всегда указывают на статистическую значимость.

**Уровень значимости коэффициента детерминации  $R^2$**  определяли с помощью критерия Фишера, как вероятность того, что величина  $F$ -статистики, рассчитанная для исследуемой выборки, меньше критического значения  $F$  для тех же степеней свободы ( $k_1$  и  $k_2$ ). В программе MS Excel для расчёта  $R^2$  и  $F$ -статистики исследуемой выборки используется функция ЛИНЕЙН для линейной аппроксимации и ЛГРФПРИБЛ для экспоненциальной; для расчёта вероятности  $p(F < F_{\text{критич.}})$  — функция ФРАСП. В работе приводится уровень значимости ( $p$ ) коэффициента детерминации  $R^2$  — вероятность того, что полученное значение  $R^2$  является случайным.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В основе **структуры изложения результатов** данной работы лежит представление об этапах, или составляющих детритогенеза, сформулированное в начале работы (с. 16).

В разделе, посвящённом растительному опаду, сначала приводятся данные, характеризующие используемую методику, поскольку они необходимы для более объективной интерпретации данных по основным наблюдениям. Затем приводятся данные о динамике и общем поступлении опада и его компонентов, затем — данные наблюдений, посвящённых переносу опада как специфической особенности городских ФЦ. Во втором разделе результатов приводятся данные о строении и запасах подстилок исследуемых биогеоценозов. Далее приводятся некоторые параметры биологического круговорота, рассчитанные с использованием полученных данных по опаду и подстилкам.

Сравнение городских биогеоценозов с естественными, данные по которым взяты из литературных источников, вынесено в отдельный раздел, поскольку по сравнению данных одновременно по опаду, подстилкам и параметрам биологического круговорота даёт более полное представление об особенностях функционирования биогеоценозов, нежели сравнение этих данных по отдельности.

Это сравнение не учитывает данных об особенностях разложения материалов стандартизированных образцов, представленных в последнем разделе результатов работы. В работе использованы авторские модификации методики стандартизированных образцов, и в литературе не удалось найти данных по достаточно схожим материалам в биогеоценозах, достаточно схожих по флористическому составу и климатическим условиям. Вместо этого приводятся данные, полученные с использованием однотипных образцов как в городских, так и в фоновых биогеоценозах, а также в ряде биогеоценозов зонального ряда, что позволяет избежать ошибок, связанных с различиями техники приготовления образцов разными исследователями, с внутренними различиями материалов, и с различиями гидротермических условий в разные годы, и таким образом установить влияние климатических особенностей вообще, и особенностей городской в частности, на разложение материалов.

## 4.1. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОСТУПЛЕНИЕМ И СОСТАВОМ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА

### 4.1.1. ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДОВ ОТБОРА И УЧЁТА ОПАДА<sup>16</sup>

#### 4.1.1.1. СРАВНЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ОПАДА С ЕГО ЗАПАСАМИ В ПРОДОЛЬНЫХ РЯДАХ ЛИЗИМЕТРОВ (2013, 2014 ГГ.)

Поскольку лизиметры имеют малую площадь (8,3 м<sup>2</sup>), и отчуждение большого количества материала нежелательно, в начальный период наблюдений (до 2015 года) на каждом лизиметре для режимных наблюдений использовали по 1—2 ОУ  $\varnothing$  16 см (0,02 м<sup>2</sup>), что существенно меньше, чем обычно рекомендуется в литературе.

Поэтому, в первую очередь, для оценки пригодности получаемых данных был проведён полный отбор опада с поверхности почв лизиметров, с тем чтобы сопоставить запасы опада и его поступление, которое удаётся определить с помощью ОУ (подробности методов описаны в соответствующих разделах). Было сделано предположение, что с поверхности почвы будет отобрано больше опада (в пересчёте на 1 м<sup>2</sup> площади), чем поступит в ОУ, поскольку в *полный отбор* будет частично включён опад прошлых лет. Полученные данные (рис. 16 и 17) рассчитаны для каждого лизиметра и приведены в виде кривых распределения поступления опада и кривых распределения запасов детрита на поверхности почвы по двум продольным рядам лизиметров (см. схему лизиметрической площадки на рис. 4). Результаты этого наблюдения позволяют не только сопоставить используемые методы отбора, но и выявить некоторые особенности функционирования самих фитоценозов, касающиеся распределения опада.

#### ***Результаты наблюдения***

*Поступление* опада в опадоуловители коррелирует с его *запасами* на поверхности почвы (по результатам полного отбора) — в каждом ряду лизиметров и в каждый год наблюдений — коэффициенты детерминации  $R^2$  составляют не менее 0,78 (табл. 8). Также наблюдается корреляция между двумя рядами лизиметров по указанным параметрам — поступление опада в одном ряду коррелирует с поступлением в другом; аналогично, коррелируют и запасы опада.

---

<sup>16</sup> Основные результаты, положения и выводы данного исследования опубликованы в совместной статье: Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А., и др. Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров. // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2017. — № 1. — С. 9—15 (личный вклад соискателя 40 %), а также в тезисах конференций: (Рыжиков и др., 2019; Земсков, Рыжиков, 2019) (личный вклад соискателя 50 %).

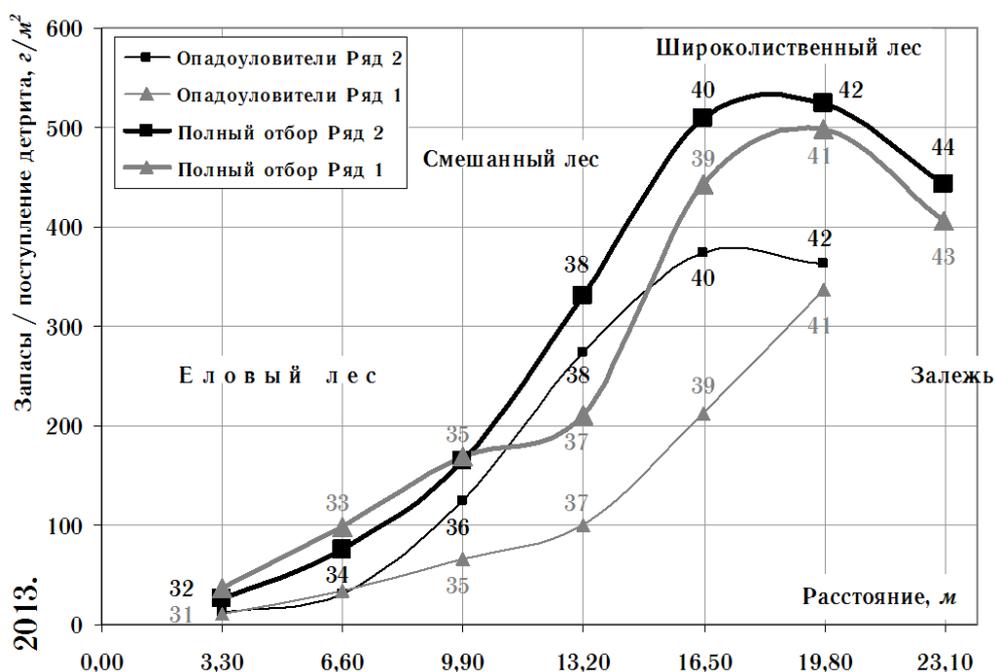


Рис. 16. Поступление опада в опадоуловители за октябрь 2013 г. и запасы детрита на поверхности почвы на 29 октября 2013 г.

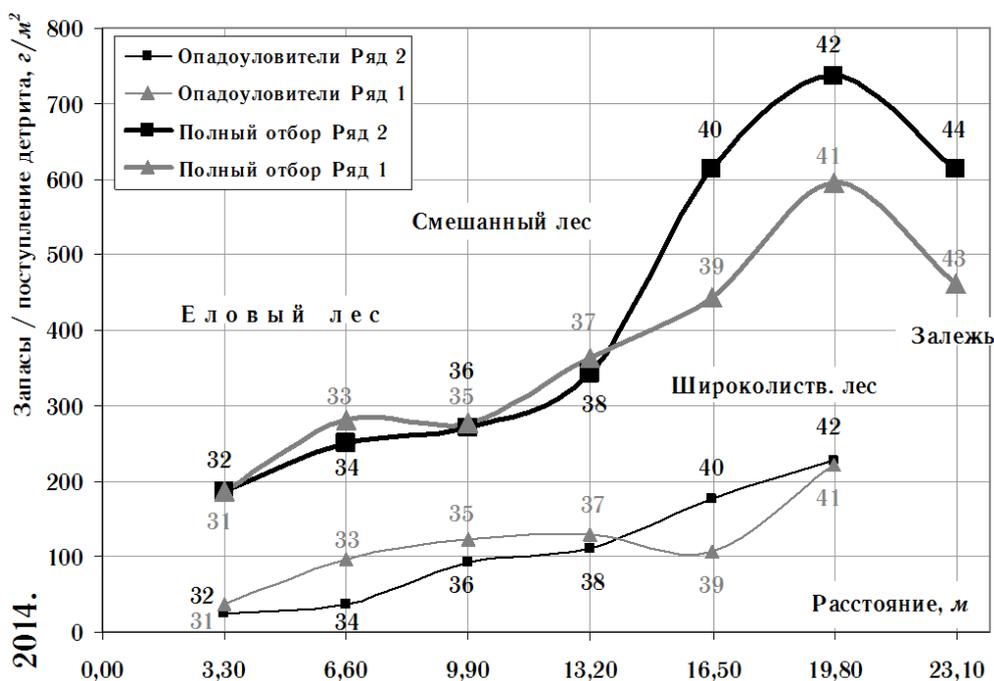


Рис. 17. Поступление опада в опадоуловители за октябрь 2014 г. и запасы детрита на поверхности почвы на 29 октября 2014 г.

Обозначения на рис. 16 и 17. Подписи данных (31, 32, ...) — номера лизиметров. По оси абсцисс — расстояние середины лизиметра от начала ряда (середины л. 29).

Оценённые запасы опада на поверхности почвы превышают его поступление на каждом лизиметре — это объясняется тем, что в полный отбор включён не только опад текущего периода (с 29 сентября по 29 октября 2013 и 2014 гг.), но и опад прошлых лет. В каждый год наблюдений кривые распределения поступления опада в двух продольных рядах лизиметров отлича-

Табл. 8. Корреляция между осенним поступлением опада и запасами опада на поверхности почвы в продольных рядах лизиметров, по наблюдениям 2013 и 2014 гг.

$R^2$ (уровень значимости $p$ )		2013				2014			
		Поступление ряд 1 ( $n = 6$ )	Поступление ряд 2 ( $n = 6$ )	Запасы ряд 1 ( $n = 7$ )	Запасы ряд 2 ( $n = 7$ )	Поступление ряд 1 ( $n = 6$ )	Поступление ряд 2 ( $n = 6$ )	Запасы ряд 1 ( $n = 7$ )	Запасы ряд 2 ( $n = 7$ )
2013	Поступление ряд 1 ( $n = 6$ )	—							
	Поступление ряд 2 ( $n = 6$ )	<b>0,78</b> ( $p = 0,02$ )	—						
	Запасы ряд 1 ( $n = 7$ )	<b>0,95</b> ( $p = 0,001$ )	—	—					
	Запасы ряд 2 ( $n = 7$ )	—	<b>0,98</b> ( $p = 0,0001$ )	<b>0,95</b> ( $p = 0,0002$ )	—				
2014	Поступление ряд 1 ( $n = 6$ )	<b>0,71</b> ( $p = 0,04$ )	—	—	—	—			
	Поступление ряд 2 ( $n = 6$ )	—	<b>0,89</b> ( $p = 0,05$ )	—	—	<b>0,70</b> ( $p = 0,04$ )	—		
	Запасы ряд 1 ( $n = 7$ )	—	—	<b>0,92</b> ( $p = 0,0006$ )	—	<b>0,79</b> ( $p = 0,02$ )	—		
	Запасы ряд 2 ( $n = 7$ )	—	—	—	<b>0,91</b> ( $p = 0,001$ )	—	<b>0,94</b> ( $p = 0,001$ )	<b>0,94</b> ( $p = 0,004$ )	—

ются, как и кривые его запасов. При этом, отличия рядов по этим параметрам не являются значимыми в рамках каждого года наблюдений (на основе  $t$ -критерия; если считать выборки зависимыми). Так, запасы детрита в одном и другом ряду не отличаются значимо ни в 2013 г. ( $p = 0,17$ ), ни в 2014 г. ( $p = 0,15$ ), как и поступление детрита ( $p = 0,08$  для 2013 г. и  $p = 0,70$  для 2014 г.). Значимые различия можно обнаружить между параметрами разных лет, или при сравнении поступления детрита с его запасами, однако, нет оснований считать, что поступление должно равняться запасам, или что эти величины должны быть постоянными в разные годы.

### **Обсуждение результатов и итоги наблюдения**

В отношении методики отбора, можно признать ОУ диаметром 16 см пригодными для ориентировочной оценки поступления опада, особенно если учесть, что по мере накопления статистических данных в ходе многолетних наблюдений ошибки не будут иметь столь существенного значения для расчёта среднегодовых величин поступления опада.

В отношении характеристики исследуемых биогеоценозов примечательно, что в продольных рядах лизиметров запасы опада и его поступление распределяются континуально — разница этих параметров между любыми двумя одноимёнными ФЦ, соседствующими в продольном ряду, может быть столь же велика, как и между разноимёнными. Это свидетельствует об интенсивном обмене опадом, что подтверждается также высокими запасами опада на лизиметрах, занятых залежью (лл. 43, 44), сопоставимыми с запасами опада под широколиственным лесом (лл. 39—42). Небольшие несоответствия между двумя рядами лизиметров по форме кривых поступления детрита и кривых его запасов также могут иметь причиной различия в переносе опа-

да в разные годы. Эти особенности свидетельствуют о том, что лизиметры, занятые одноимёнными ФЦ, не следует считать полноценными повторностями, поскольку варьирование внутри такой группы сопоставимо с отличиями от соседних групп. Руководствуясь этим, в дальнейших исследованиях автор и коллеги, по возможности, избегали того, чтобы приводить только средние значения по группам или парам лизиметров, или экстраполировать результаты, полученные по одним лизиметрам, на другие.

#### 4.1.1.2. СРАВНЕНИЕ ОПАДОУЛОВИТЕЛЕЙ РАЗНОЙ ПЛОЩАДИ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТБОРА ОПАДА

В табл. 9 приведены результаты сравнения количества общего опада, а также отдельных фракций опада (на единицу площади), отбираемого большими опадоуловителями  $\varnothing$  36 см (ОУ-36) и малыми опадоуловителями  $\varnothing$  16 см (ОУ-16), расставленными попарно. Приводятся результаты сравнения частных случаев (выборки по отдельным фитоценозам), а также выборки, включающих несколько фитоценозов, и выборки, включающих все фитоценозы.

Табл. 9 (окончание на след. стр.). Сравнение опадоуловителей  $\varnothing$  16 см (пл. 0,02 м<sup>2</sup>) и  $\varnothing$  36 см (пл. 0,10 м<sup>2</sup>) по эффективности отбора опада и его компонентов (фракций).

Группы наблюдений	Фитоценозы или фракции опада	Среднее поступление опада, г/м <sup>2</sup>				Средняя разность	Дов. инт. ср. разности	Отношение средних	R <sup>2</sup>	p (R <sup>2</sup> )	Значимо различаются **
		ОУ-16	V*, %	ОУ-36	V*, %						
Лизиметры (2016 г.)	Ельник (n = 4)	158,0	91	129,0	49	-29,1	± 109	0,82	0,13	0,64	Нет (p = 0,46)
	Смешанный лес (n = 4)	154,5	51	227,0	29	72,5	± 64	1,47	0,77	0,12	Да (p = 0,04)
	Широколист. лес и залежь (n = 5)	310,3	25	481,9	51	171	± 338	1,55	0,03	0,78	Нет (p = 0,23)
	Все ФЦ лизиметров (n = 12)	215,5	45	294,9	74	79,4	± 111	1,37	0,31	0,05	Нет (p = 0,15)
БС МГУ (рандомная расстановка, 2018 г.)	Ельник (n = 5)	327,1	16	351,9	13	24,9	± 51	1,08	0,28	0,36	Нет (p = 0,25)
	Берёза+Клён (n = 5)	101,3	21	124,4	18	23,2	± 31	1,23	0,04	0,75	Нет (p = 0,11)
	Сосняк (n = 4)	69,3	64	85,9	50	3,1	± 71	1,24	0,09	0,69	Нет (p = 0,90)
	Все ФЦ Ботанич. сада (n = 14)	172,8	71	190,8	69	18,0	± 21	1,10	0,93	4·10 <sup>-8</sup>	Нет (p = 0,08)
Трансекта Берёза+Клён — Лиственничник (2019 г., n = 11)	Хвоя лиственницы	83,2	27	78,8	19	-4,4	± 7,4	0,95	0,78	0,0003	Нет (p = 0,21)
	Ветки и шишки лиственницы	11,5	173	53,6	163	42,0	± 79	4,64	0,03	0,60	Нет (p = 0,26)
	Листья и семена берёзы и клёна	109,0	15	145,8	25	36,9	± 43	1,34	0,07	0,42	Нет (p = 0,08)
	Ветки берёзы и клёна	0,0	—	2,05	115	2,0	± 3,0	—	—	—	Нет (p = 0,17)
	Сумма фракций	210,9	35	292,6	37	81,8	± 103	1,39	0,16	0,23	Нет (p = 0,11)

Группы наблюдений	Фитоценозы или фракции опада	Среднее поступление опада, г/м <sup>2</sup>				Средняя разность	Дов. инт. ср. разности	Отношение средних	R <sup>2</sup>	p (R <sup>2</sup> )	Значимо различаются **
		ОУ-16	V*, %	ОУ-36	V*, %						
Трансекта Ельник—Грабинник (2019 г., n = 12)	Листья и семена граба	93,2	29	97,9	21	4,70	± 8,3	1,05	0,98	5·10 <sup>-10</sup>	Нет (p = 0,24)
	Прочие листья и семена	22,2	61	23,6	68	1,40	± 8,9	1,06	0,29	0,07	Нет (p = 0,74)
	Ветки граба	2,4	137	8,5	130	6,11	± 10	3,59	0,002	0,88	Нет (p = 0,22)
	Хвоя ели	69,7	25	71,9	14	2,17	± 6,4	1,03	0,96	3·10 <sup>-8</sup>	Нет (p = 0,47)
	Ветки и шишки ели	3,3	151	5,8	49	2,45	± 4,1	1,74	0,11	0,30	Нет (p = 0,22)
	Сумма фракций	183,2	41	215,6	31	32,4	± 46	1,18	0,24	0,11	Нет (p = 0,15)
Всего по трансектам (n = 23)	Хвоя ели и лиственницы	76,2	27	75,2	24	-0,99	± 4,7	0,99	0,92	6·10 <sup>-13</sup>	Нет (p = 0,44)
	Мелкий детрит, в т. ч. семена	7,6	93	11,5	97	3,85	± 4,1	1,50	0,28	0,009	Нет (p = 0,06)
	Все грубые фракции	8,5	201	34,0	229	25,5	± 35	3,99	0,02	0,56	Нет (p = 0,15)
Все наблюдения (n = 50) (суммы фракций)		194,8	49	246,2	60	51,4	± 35	1,26	0,30	3·10 <sup>-5</sup>	Да (p = 0,005)

Примечания. \* Коэффициент вариации V рассчитан только для поступления неперенесённого опада (n = 4 для берёзово-кленовой полосы, n = 5 для грабинника, n = 7 для лиственничника и ельника). \*\* По t критерию для зависимых выборок; p — уровень значимости различия.

Как и ожидалось, в большинстве случаев сравнения большие ОУ накапливают больше опада на единицу площади, чем малые. Однако, во всех частных случаях кроме одного, значения средней разности между парными ОУ по накоплению опада не превышают её доверительного интервала. Соответственно, только в одном случае (смешанный лес на лизиметрах, 2016 г.) поступление опада в большие и малые опадоуловители значимо различается по t-критерию для зависимых выборок на уровне значимости ≤ 5 % (ещё в трёх случаях наблюдается различие на уровне значимости ≤ 10 %). Вместе с тем, сравнение выборок, включающих все 50 пар наблюдений, показывает, что они значимо различаются: большие опадоуловители накапливают в среднем на 51,4 ± 35 г/м<sup>2</sup> (или в 1,26 раза) больше общего опада, чем малые.

Наблюдение<sup>17</sup>, в котором опадоуловители были попарно расставлены по трансектам, позволяет более детально оценить различия в эффективности отбора. Несмотря на то, что при сравнении частных случаев значимой разницы не выявлено, следует отметить, что наибольшие расхождения наблюдаются по отбору грубых фракций — веток, шишек и т. п. Отношение их среднего поступления в ОУ-36 и в ОУ-16 составляет 1,74—4,64 (для всех грубых фракций по трансектам — 3,99). Коэффициент вариации поступления грубых фракций, как правило, пре-

<sup>17</sup> Основные результаты, выводы и положения наблюдения, описываемого в данном абзаце, получены совместно с коллегами и опубликованы в виде тезисов конференции (Макаренко и др., 2020). Личный вклад автора 50 %.

вышает 100 %, и для фракции «ветки и шишки лиственницы» достигает 173 % (для ОУ-16) или 163 % (для ОУ-36).

Наименьшие расхождения наблюдаются по отбору мелких фракций, таких как хвоя ели и лиственницы, листья и семена граба. Для них аналогичное отношение составляет 0,95—1,05 (для всей хвои по трансектам — 0,99), при этом, только для этих фракций наблюдается корреляция с  $R^2$  0,78—0,98, в то время как по отбору остальных фракций корреляция отсутствует. Коэффициенты вариации для таких фракций составляют 25—29 % для ОУ-16 и 14—19 % для ОУ-36 (соотв. 27 и 24 % для всей хвои по трансектам). Следует отметить, что варьирование поступления этих фракций обусловлено не столько неточностью опадоуловителей, сколько закономерным пространственным распределением поступления этих фракций в пределах трансект, что будет показано далее (с. 129). В целом, варьирование поступления опада в большие ОУ, как правило, ниже, чем варьирование поступления в малые.

Промежуточное положение занимает опад берёзы и клёна, содержащий крупные листья — отношение его поступления в ОУ-36 к поступлению в ОУ-16 составляет 1,34.

Схожие отношения поступления опада (с учётом его состава) получены по предварительным наблюдениям на лизиметрах (2016 г.) и в БС МГУ (при случайной расстановке ОУ, 2018 г.): 0,82 и 1,08 для ельников, 1,23—1,55 для смешанных и лиственных фитоценозов. В этом случае нет данных о поступлении активных фракций отдельно, но, как будет показано далее (с. 119), в осенний период именно они преобладают в опаде и определяют основные закономерности его поступления.

Таким образом, опадоуловители  $\varnothing$  36 см более пригодны для отбора опада по сравнению с ОУ  $\varnothing$  16 см, поскольку обеспечивают отбор мелких фракций с такой же эффективностью, что и малые, а отбор крупных фракций — с большей эффективностью. В то же время, следует признать, что точность отбора грубых фракций оставляет желать лучшего даже при использовании ОУ  $\varnothing$  36 см. Визуальные наблюдения показывают, что крупные ветки не только не всегда удерживаются над опадоуловителем (в этом случае можно было бы отрезать и отобрать ту их часть, которая находится над ним), и в отдельных случаях мешают попаданию в опадоуловители других фракций, или даже ломают опадоуловители. По этой причине, для увеличения точности отбора крупных фракций предпочтительно увеличение общей площади отбора за счёт площади каждого опадоуловителя, а не только за счёт их числа. Интересно, что в литературе описаны случаи (Búrques et al., 1999), когда, вопреки ожиданиям, ОУ меньшей площади оказываются более эффективными в некоторых специфических условиях. Поэтому можно рекомендовать при планировании многолетних наблюдений за поступлением опада предусмотреть опробование разных ОУ в течение первого года, что позволит выяснить, какие устройства целесообразнее применять в тех или иных ФЦ в те или иные сезоны.

### 4.1.1.3. СРАВНЕНИЕ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗИМНЕГО ПОСТУПЛЕНИЯ ОПАДА

В предыдущем наблюдении (табл. 9) каждому большому опадоуловителю соответствовал малый, и можно было рассматривать выборки по любому набору объектов как зависимые. В наблюдении, описанном далее (табл. 10), значения, полученные с помощью каждого из трёх методов, не связаны между собой аналогичным образом, поэтому данные по каждому фитоценозу сравниваются (по *t*-критерию) как независимые выборки. В свою очередь, три выборки, соответствующие трём методам, состоящие из пяти средних значений, соответствующих пяти фитоценозам, могут уже рассматриваться как зависимые выборки — их сравнение приведено в последней строке табл. 10.

Из данных табл. 10 следует, что снегомер, как правило, отбирает меньше детрита на единицу площади, чем опадоуловители или полотна. Эта разница статистически значима в двух случаях из четырёх. В одном случае, в грабиннике, снегомер отбирает немного больше детрита по сравнению с ОУ и полотнами, но это различие не является статистически значимым.

Значимой разницы между накоплением детрита на полнах и в опадоуловителях не наблюдается, однако на полотнах, как правило, накапливается несколько больше опада.

Различия в эффективности отбора опада оказались вполне ожидаемыми. Меньшую эффективность отбора опада снегомером можно объяснить тем, что он не всегда способен разрезать

Табл. 10. Сравнение различных способов определения запасов детрита в снежной толще.

Фитоценозы	Запасы детрита в снегу, определённые с помощью					Сравнение методов определения запасов детрита								
	снегомера (n = 6)		опадоуловителей (n = 5)		полотно (n = 1)	Снегомер vs ОУ-36			Снегомер vs Полотно			ОУ-36 vs Полотно		
	Среднее $\pm \Delta$ , $z/m^2$	V, %	Среднее $\pm \Delta$ , $z/m^2$	V, %		Разность средних	Отношение средних	p различия	Разность средних	Отношение средних	p различия	Разность средних	Отношение средних	p различия
Лиственничник	11,9 $\pm$ 6,5	52	32,4 $\pm$ 26	64	49,8	20,4	2,7	0,04	37,9	4,2	0,002	17,5	1,5	0,48
Сосняк	29,8 $\pm$ 20	64	38,7 $\pm$ 21	43	88,5	8,8	1,3	0,43	58,7	3,0	0,04	49,8	2,3	0,051
Ельник	104,8 $\pm$ 46	41	172,4 $\pm$ 57	26	182,4	67,6	1,6	0,03	77,6	1,7	0,16	10,0	1,1	0,85
Берёза+Клён	33,8 $\pm$ 16	44	79,3 $\pm$ 13	13	50,0	45,5	2,3	0,0003	16,2	1,5	0,36	-29,3	0,6	0,06
Грабинник	51,4 $\pm$ 32	60	41,0 $\pm$ 7,4	15	43,7	-10,4	0,8	0,48	-7,7	0,9	0,83	2,8	1,1	0,69
Все						26,4	1,6	0,05	40,6	1,9	0,09	14,2	1,2	0,72
Все (сравн. зависимых выборок, n = 5)	46,4 $\pm$ 15 (n = 30)	87 (n = 30)	72,7 $\pm$ 24 (n = 25)	80 (n = 25)	87,0 $\pm$ 92 (n = 5)	Ср. разн.	Ср. отн.	p различия	Ср. разн.	Ср. отн.	p различия	Ср. разн.	Ср. отн.	p различия
						26,4 $\pm$ 38	1,8 $\pm$ 1,0	0,12	36,5 $\pm$ 42	2,2 $\pm$ 1,6	0,07	10,2 $\pm$ 35	1,3 $\pm$ 0,8	0,47

объекты, которые не помещаются в него целиком (ветки, листья) — в этом случае такие объекты соскальзывают, или продавливаются до поверхности почвы, и не попадают в пробу. Полотна, по сравнению с опадоуловителями, вероятно, обеспечивают более эффективный отбор грубых фракций — как было показано в предыдущем разделе, для опадоуловителей может быть свойственен некоторый недоотбор веток и других крупных объектов. На основании полученных данных можно **сделать вывод**, что снегомер пригоден лишь для ориентировочной оценки запасов опада в снежной толще, а ОУ в большинстве случаев столь же эффективны, как и сетчатые полотна; случаи, когда различия существенны, имеют понятные причины.

#### 4.1.2. ПОСТУПЛЕНИЕ ОПАДА В ФИТОЦЕНОЗАХ ЛИЗИМЕТРОВ<sup>18</sup>

При неравной длительности периодов накопления опада, динамику его поступления логично было бы приводить на графиках в единицах скорости ( $\text{г/м}^2\cdot\text{месяц}$ ). В таком случае, теоретически, длительность периода накопления опада может быть произвольной. В таком представлении количество опада, поступившего за тот или иной период, будет характеризоваться не высотой пиков, а их площадью. Однако на практике оказывается, что при значительном варьировании величин поступления опада и разной длительности периодов его накопления, данные, представленные таким образом, неудобны для восприятия. Если провести генерализацию полученных данных, пересчитав их на стандартные периоды (как на рис. 18, 19 и далее), закономерная цикличность поступления опада проявляется более отчётливо, и варьирование поступления опада в те или иные сезоны от года к году проявляется наиболее наглядно. Поэтому величины поступления опада в каждый ОУ были просуммированы по следующим периодам: *осенний* (с начала сентября по конец ноября), *зимний* (с начала декабря по конец марта) и *весенне-летний*

---

<sup>18</sup> Результаты, положения и выводы этих наблюдений (полученные к моменту подготовки соответствующих публикаций) частично опубликованы в совместных статьях:

*Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А. и др.* Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2017. — № 1. — С. 9–15 (личный вклад соискателя 50 %);

*Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И. и др.* О динамике растительного опада и составе лизиметрических вод в условиях стационарных почвенных лизиметров. // Естественные и технические науки. — 2015. — № 11. — С. 148—151 (личный вклад соискателя 35 %);

*Анохина Н.А., Завгородняя Ю.А., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И., Демин В.В.* Динамика содержания ароматических кислот в биогеоценозах стационарных почвенных лизиметров // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2018. — № 4. — С. 3–10 (личный вклад соискателя 15 %);

а также частично использованы в тезисах конференций (Богатырев, Погожева и др., 2015; Земсков, Жилин и др., 2017; Антонова и др., 2017; Земсков, 2014, 2015; Земсков, Богатырев и др., 2017; Земсков, Жилин, 2017).

(с начала апреля по конец августа) — каждый из этих периодов включает один или несколько фактических периодов накопления опада.

### ДИНАМИКА ПОСТУПЛЕНИЯ ОПАДА В ФИТОЦЕНОЗАХ ЛИЗИМЕТРОВ

Поступление опада на лизиметрах 29 и 30, занятых паром (рис. 18), невелико, поскольку вблизи от них практически отсутствуют лиственные деревья, с которых опад мог бы переноситься, и не подчиняется чётким закономерностям. Поступление опада в листопадный период не превышает 30—40 г/м<sup>2</sup>. Отсутствие данных за зимний период 2016—2017 гг. обусловлено тем, что в это время проводился ремонт теплицы, примыкающей к лизиметрам. Опадоуловитель на лизиметре 29 в процессе ремонта был сломан, а на лизиметре 30 отмечено поступление 114 г/м<sup>2</sup> строительного мусора (битые стёкла, штукатурка) — это значение было выбраковано.

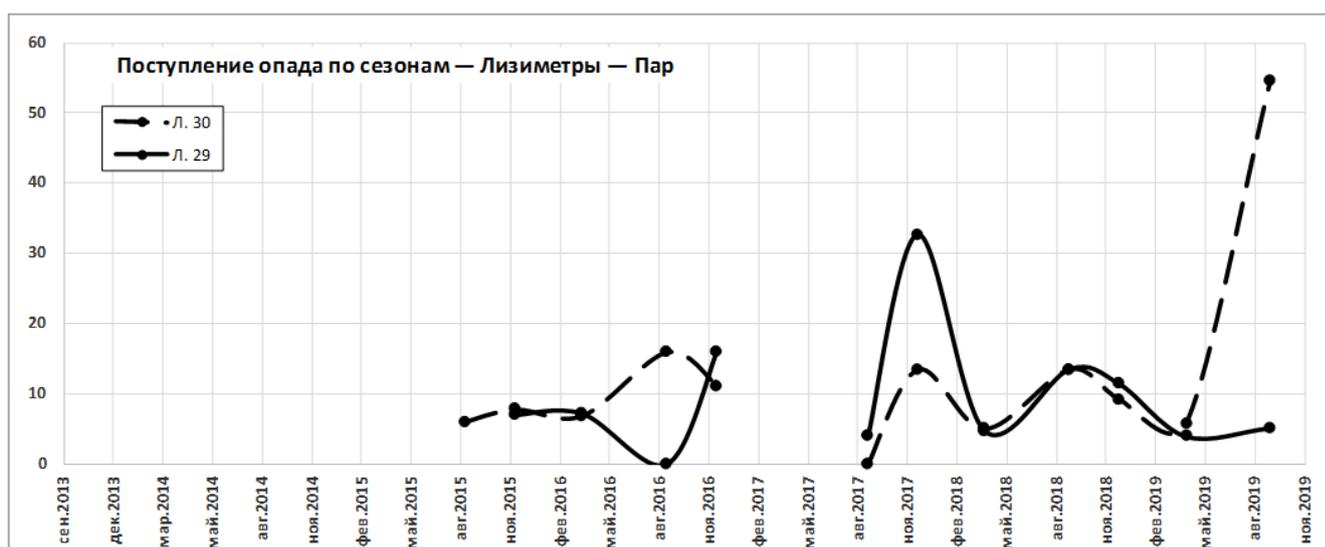


Рис. 18. Динамика поступления опада на лизиметрах 29 и 30, занятых паром, г/м<sup>2</sup>.

По оси абсцисс — даты наблюдений.



Рис. 19. Динамика поступления опада на лизиметрах 31—34, занятых ельником, г/м<sup>2</sup>.

По оси абсцисс — даты наблюдений.

На лизиметрах 31—34, занятых **ельником** (рис. 19), намечается закономерность — наблюдаются осенние максимумы поступления опада, которые, впрочем, иногда сдвигаются на зиму, а иногда практически не выражены. Поступление опада елей в меньшей степени подчиняется сезонным закономерностям, а осенние максимумы обусловлены по большей части поступлением опада из соседних ФЦ или с местных лиственных деревьев и кустарников, постепенно засоряющих бывшую монокультуру ели. Типичные величины осеннего поступления опада составляют здесь около 100—200 г/м<sup>2</sup>, максимальное осеннее поступление опада — до 300 г/м<sup>2</sup>, а в 2018 г. этот осенний максимум достигает 500 г/м<sup>2</sup> на лизиметрах 33 и 34, соседствующих со смешанным лесом. Типичные минимальные величины поступления опада, наблюдаемые, как правило, в летний и зимний периоды, составляют около 40—50, редко более 100 г/м<sup>2</sup>.

**Смешанный лес** на лизиметрах 35—38 характеризуется более выраженными сезонными

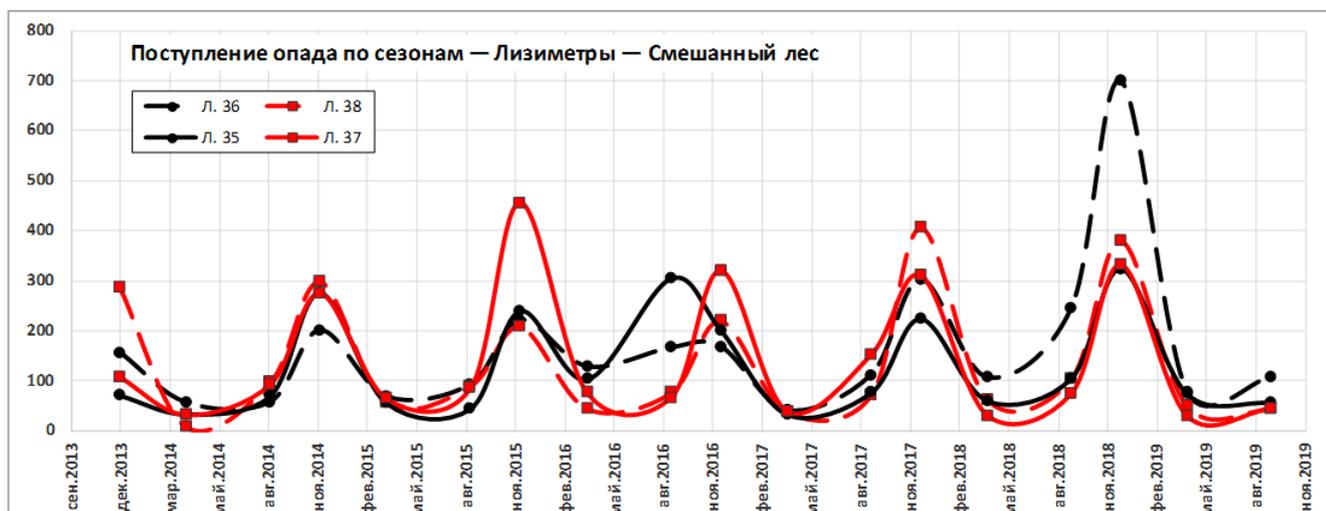


Рис. 20. Динамика поступления опада на лизиметрах 35—38, занятых смешанным лесом, г/м<sup>2</sup>. По оси абсцисс — даты наблюдений.



Рис. 21. Динамика поступления опада на лизиметрах 39—42, занятых широколиственным лесом, г/м<sup>2</sup>. По оси абсцисс — даты наблюдений.

закономерностями, несмотря на то, что осеннее поступление опада лишь ненамного превосходит поступление в еловом лесу и составляет порядка 200—300 г/м<sup>2</sup>, иногда достигая 400—500 г/м<sup>2</sup> (рис. 20). В 2016 году максимум поступления опада на лизиметрах 35 и 36, соседствующих с ельником, сдвигается с осени на лето, хотя на лизиметрах, занятых ельником, подобного сдвига не наблюдается. Минимальные величины поступления опада, наблюдаемые в летний и зимний периоды составляют порядка 50—100 г/м<sup>2</sup>, что несколько больше, чем на лизиметрах, занятых ельником.

**Широколиственный лес** (лизиметры 39—42) характеризуется наиболее чёткими закономерностями поступления опада — в отличие от остальных ФЦ минимумы и максимумы поступления опада практически не сдвигаются по времени (рис. 21). Типичное осеннее поступление опада составляет 300—400 (до 500—700) г/м<sup>2</sup> на лизиметрах 39 и 40, соседствующих со



Рис. 22. Динамика поступления опада на лизиметрах 43 и 44, занятых травяно-кустарниковой залежью, г/м<sup>2</sup>. По оси абсцисс — даты наблюдений.

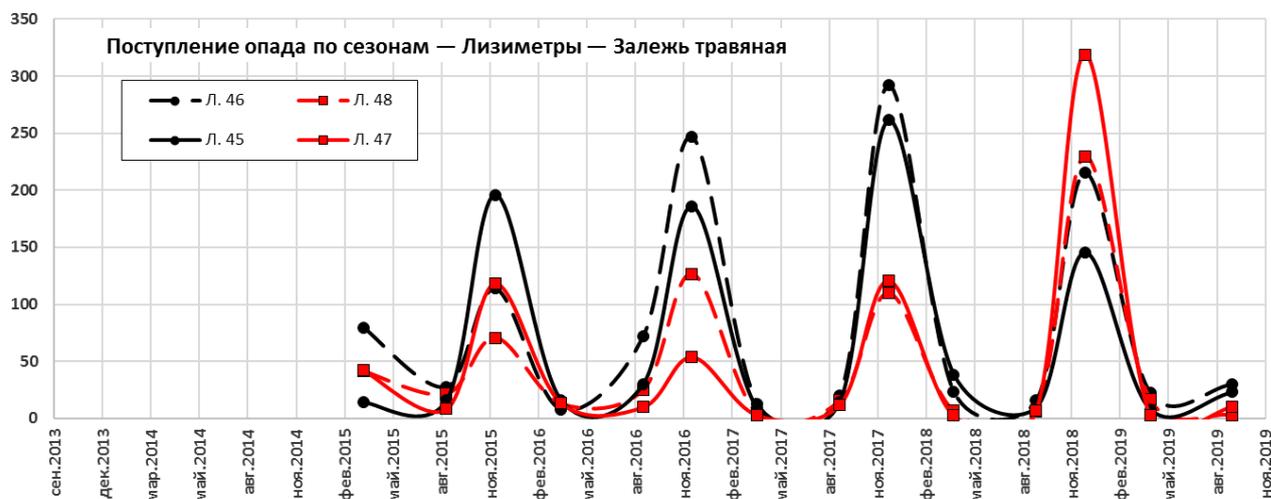


Рис. 23. Динамика поступления опада на лизиметрах 35—38, занятых травяной залежью, г/м<sup>2</sup>. По оси абсцисс — даты наблюдений.

смешанным лесом, и 400—600 г/м<sup>2</sup> на лизиметрах 41 и 42, соседствующих с залежью. В этих ФЦ проявляется ещё одна закономерность, которая, как правило, слабо выражена или вовсе отсутствует в предыдущих — зимнее поступление опада (около 10—20 г/м<sup>2</sup>) заметно меньше весенне-летнего (~ 100 г/м<sup>2</sup>).

Те же закономерности сохраняются и на **травяно-кустарниковой залежи** на лл. 43 и 44 (рис. 22), хотя по количеству опада (300—500 г/м<sup>2</sup> в осенние периоды) эти фитоценозы ближе к смешанному лесу, в котором такие закономерности не выражены. Поступление опада за зимний период составляет 5—20 г/м<sup>2</sup>, за весенне-летний — 90—150 г/м<sup>2</sup>.

На лизиметрах 45—48, занятых **травяной залежью** (рис. 23) осеннее поступление опада (100—250 г/м<sup>2</sup>) схоже с таковым в ельнике, но в отличие от последнего существенно лучше выражены отличия между осенним поступлением опада и его поступлением в другие периоды. Различия между поступлением опада в зимний (5—20 г/м<sup>2</sup>) и в весенне-летний (10—25 г/м<sup>2</sup>) сезоны, как правило, не столь хорошо выражено.

## **СРЕДНЕГОДОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОСТУПЛЕНИЯ ОПАДА И ЕГО**

### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКЕ**

В табл. 11 приводятся основные обобщающие параметры поступления опада на лизиметрах (строительный мусор, который обнаруживали на лизиметрах 29, 30 и некоторых других, не учитывается). Доверительный интервал для среднегодовых величин не приводится, поскольку поступление опада естественным образом варьирует в течение года, а учитывая особенности вегетационного процесса в разные сезоны, и различия в направлении и силе ветра, обуславливающие особенности переноса, нет оснований полагать, что поступление опада должно быть в разные годы одинаковым. Коэффициент вариации  $V$  рассчитан для четырёх или шести величин годового поступления опада, и характеризует многолетнее варьирование поступления опада.

В качестве интегральной количественной характеристики динамики поступления опада в таблице приводится доля среднегодового осеннего опада от общего среднегодового поступления. Так, наименьшая доля осеннего опада от общего характерна для ельника (0,53—0,62), что лишней раз иллюстрирует более равномерную динамику поступления опада в хвойных фитоценозах. Заметно более высокая доля осеннего опада характерна для широколиственного леса (0,77—0,82), а наибольшая — для залежи (0,79—0,91), где поступает преимущественно перенесённый опад, а доля неактивных фракций, поступление которых не подчиняется сезонным закономерностям, наименьшая.

Данные табл. 11 визуализированы на рис. 24, что позволяет более наглядно представить распределение опада на лизиметрической площадке. В ряду лизиметров, расположенном ближе к территории БС МГУ (ряд 2, чётные номера, см. также рис. 4 — Схема лизиметрической

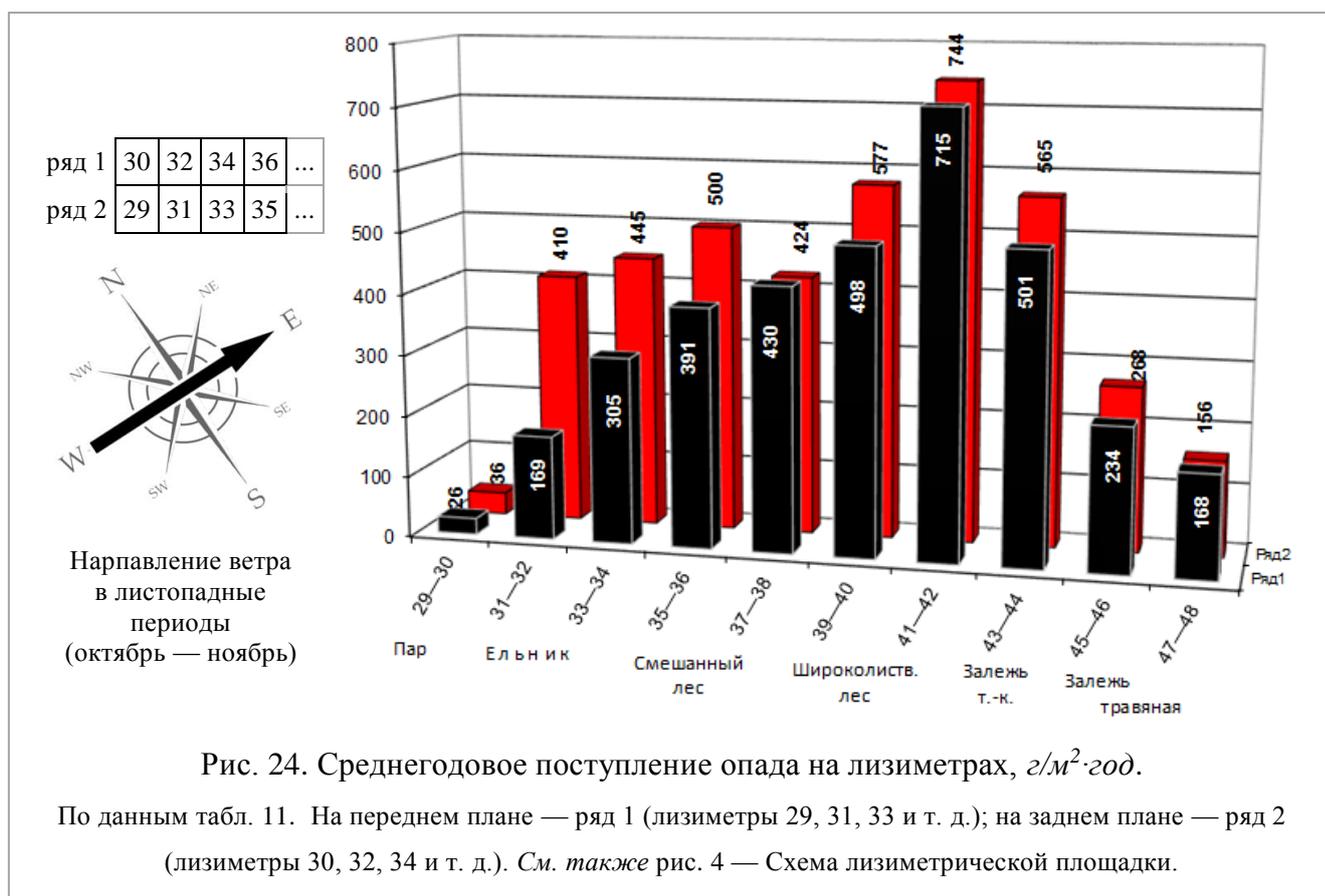
Табл. 11. Параметры поступления опада на лизиметрах почвенного стационара МГУ.

Группы лизиметров	№ лизиметра	Общее поступление опада			Активные фракции*, %	Поступление за листопадные периоды**					
		Среднегодовое, г/м <sup>2</sup> ·год	Коэф. вар. V, %	Среднее, г/м <sup>2</sup> ·год		Среднегодовое, г/м <sup>2</sup>	Коэф. вар. V, %	Среднее, г/м <sup>2</sup>	Доля от среднегодового		
Пар	29	<b>26</b>	54	*** 31	99,7	73,9	<b>17</b>	67	14	0,64	0,46
	30	<b>36</b>	59		48,0		<b>10</b>	24		0,29	
Ельник	31	<b>169</b>	76	332	81,8	90,1	<b>89</b>	113	166	0,53	0,51
	32	<b>410</b>	50		94,9		<b>185</b>	85		0,45	
	33	<b>305</b>	31		89,3		<b>190</b>	44		0,62	
	34	<b>445</b>	49		94,3		<b>201</b>	86		0,45	
Смешанный лес	35	<b>391</b>	36	436	96,6	89,1	<b>222</b>	38	278	0,57	0,64
	36	<b>500</b>	43		83,9		<b>291</b>	71		0,58	
	37	<b>430</b>	26		87,0		<b>299</b>	38		0,70	
	38	<b>424</b>	20		89,0		<b>299</b>	27		0,71	
Широколиственный лес	39	<b>498</b>	33	633	92,8	89,1	<b>386</b>	44	504	0,77	0,79
	40	<b>577</b>	13		91,7		<b>459</b>	15		0,80	
	41	<b>715</b>	18		85,9		<b>562</b>	22		0,79	
	42	<b>744</b>	30		85,8		<b>610</b>	38		0,82	
Залежь трав.-куст.	43	<b>502</b>	48	533	94,6	92,5	<b>397</b>	47	435	0,79	0,82
	44	<b>565</b>	39		90,4		<b>474</b>	30		0,84	
Залежь травяная	45	<b>234</b>	48	207	99,3	99,3	<b>197</b>	24	175	0,84	0,85
	46	<b>268</b>	33		98,6		<b>217</b>	35		0,81	
	47	<b>168</b>	69		99,1		<b>152</b>	75		0,91	
	48	<b>157</b>	45		100,0		<b>134</b>	51		0,86	

Примечания. Для лизиметров 29—30 и 43—48  $n = 19$  (за 4 года наблюдений); для лизиметров 31—42  $n = 37$  (за 6 лет); всего — 596 наблюдений. Коэффициент вариации  $V$  рассчитан соответственно для 4 или 6 величин годового поступления опада. \* Активные фракции — листья, хвоя, семена, травы, мелкий детрит (Карпачевский и др., 1980). \*\* Листопадный период — с начала октября по конец ноября. \*\*\* В объединённых ячейках — средние значения основной величины для каждой группы лизиметров.

площадки), как правило, поступает больше опада, чем на лизиметрах, расположенных со стороны автомобильной дороги (ряд 1, нечётные номера). Это различие наиболее велико на лизиметрах 31—34, занятых ельником, а также на лизиметрах 35 и 36, занятых смешанным лесом. Среднегодовое поступление опада на лизиметрах первого и второго ряда значительно различается (по  $t$ -критерию для зависимых выборок): средняя разность составляет  $68,20 \pm 55,9$  г/м<sup>2</sup>·год ( $p = 0,02$ ,  $n = 10$ ). Данные по полному отбору 2013 и 2014 гг. (рис. 16, 17) также свидетельствовали о том, что во втором ряду лизиметров накапливается больше опада, однако эта разница была более выражена в широколиственном лесу и отсутствовала в ельнике.

Поступление каждой фракции в ОУ значительно варьирует, что не позволяет достаточно точно оценить динамику поступления каждой из них, однако, по итогам многолетних наблюдений, интегрирующих множество значений для каждого лизиметра, можно охарактеризовать общие закономерности поступления активных фракций, к которым относятся листья, хвоя, мелкий детрит, семена и травы (Карпачевский и др., 1980). К неактивным фракциям те же авто-



ры относят ветки, шишки и кору, поступление которых в нашем случае варьирует намного значительно. Поступление активных фракций подчиняется тем же общим закономерностям, что и среднегодовое поступление опада.

На рис. 25 и 26 приводится среднегодовое поступление **активных и неактивных фракций** за период с июня 2015 г. по май 2019 г. — за этот период имеются данные о фракционном составе проб со всех лизиметров (фракционирование опада проводили не с самого начала наблюдений в 2013 г., а лишь с 2015 года). Доля активных фракций в общей массе опада составляет от 86 до 100 %. Значения в 99—100 % наблюдаются на лизиметрах, занятых залежью, где опад представлен травами (учитывали только части трав, попадающие в опадоуловители) и переносимыми компонентами, а также на лизиметрах 29 и 30 (пар), где весь поступающий опад является перенесённым.

Имеющиеся данные о поступлении активных и неактивных фракций не свидетельствуют о систематическом различии среднегодовых величин поступления опада в первом и втором продольных рядах лизиметров, о котором говорилось выше (рис. 24). Поступление активных фракций (рис. 25) в первом и втором ряду различается не значительно (по *t*-критерию для зависимых выборок): средняя разность составляет  $22,1 \pm 73,9$  г/м²·год ( $p = 0,52$ ;  $n = 10$ ). Средняя разность поступления неактивных фракций (рис. 26) составляет  $3,7 \pm 15,7$  г/м²·год ( $p = 0,61$ ), средняя разность общего поступления —  $25,8 \pm 72,1$  г/м²·год ( $p = 0,44$ ). Таким образом, по имеющимся данным нельзя с уверенностью сказать, что указанное различие обусловлено особенностями

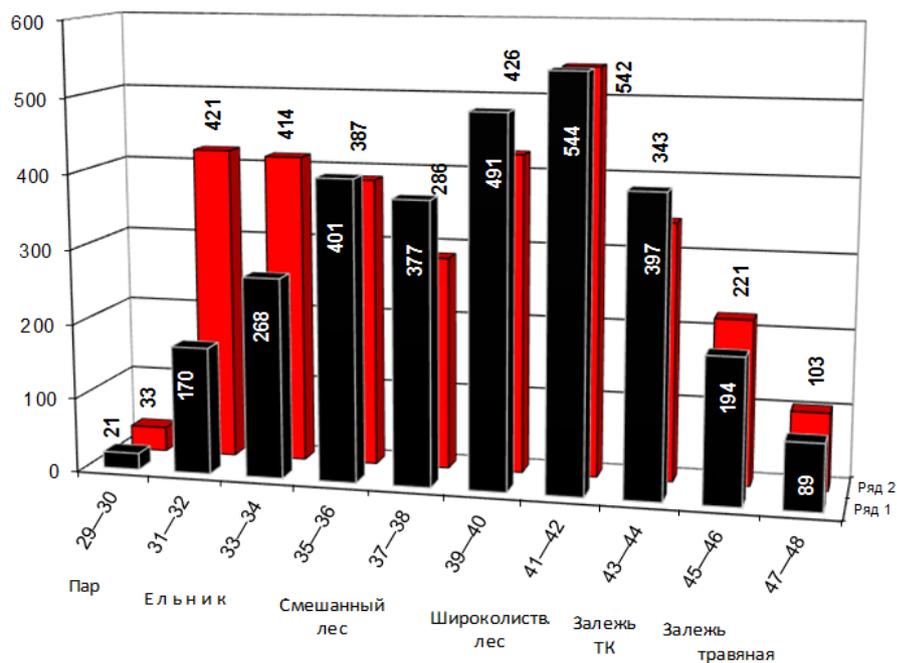


Рис. 25. Среднегодовое поступление активных фракций опада на лизиметрах,  $г/м^2 \cdot год$ .

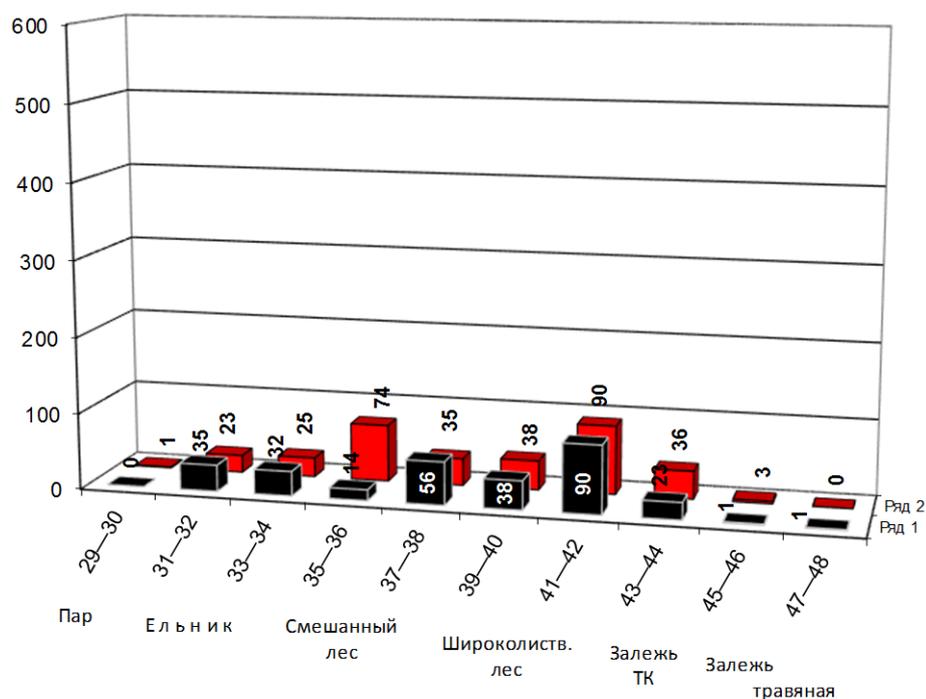


Рис. 26. Среднегодовое поступление неактивных фракций опада на лизиметрах,  $г/м^2 \cdot год$ .

Обозначения к рис. 25 и 26. На переднем плане — ряд 1 (лизиметры 29, 31, 33 и т. д.); на заднем плане — ряд 2 (лизиметры 30, 32, 34 и т. д.) (см. также рис. 4 — Схема лизиметрической площадки). Приведены данные за период с июля 2015 г. по май 2019 г.

распределения активных фракций. Однако, такое объяснение представляется вполне правдоподобным: учитывая, что активные фракции составляют большую часть поступающего опада, а в осенний период преобладает западное направление ветра (Справочник..., 2005, т. 2), можно предположить, что распределение опада на лизиметрической площадке в значительной степени обусловлено ветровым переносом активных фракций.

В некоторых случаях различия в поступлении опада между одноимёнными лизиметрами, занимающими одинаковое положение в продольном ряду, может быть связано с различием плотности древостоев, или с особенностями поступления неактивных фракций, которое почти не подчиняется каким-либо закономерностям и сильно зависит от случайных факторов, и потому подвержено наиболее высокому варьированию.

#### 4.1.3. ПОСТУПЛЕНИЕ ОПАДА В ФИТОЦЕНОЗАХ БОТАНИЧЕСКОГО САДА<sup>19</sup>

К настоящему времени имеются данные по поступлению опада с 12 апреля 2016 г. до октября 2020 года. Обобщающие параметры поступления опада представлены в табл. 12. Коэффициент вариации, как и в табл. 11, характеризует варьирование поступления опада в разные годы. На рис. 27 показана динамика поступления опада. Выше (стр. 111) обсуждалось, что наиболее удобными для графического представления являются данные, пересчитанные на унифицированные периоды, соответствующие вегетационным сезонам. Для фитоценозов Ботанического сада генерализация выполнена по следующим стандартным периодам: зимний (начало декабря — конец марта), весенний (начало апреля — середина июня) и летний (середина июня — конец сентября), осенний (начало октября — конец ноября).

Динамика поступления опада в фитоценозах Ботанического сада не столь чёткая и закономерная, как в фитоценозах лизиметров. В большинстве случаев наблюдается осенний пик поступления опада, однако он часто сдвигается на летние месяцы — даже с учётом проведённой генерализации полученных данных. Это можно объяснить тем, что фитоценозы Ботанического сада имеют более развитый древостой, поэтому с опадом поступает больше крупных ветвей, шишек и тому подобного, что может вносить дополнительное варьирование в получаемые значения. Действительно, содержание активных фракций в опаде фитоценозов БС МГУ (59—92 %) в целом несколько ниже, чем в опаде фитоценозов лизиметров (в лесных ФЦ 74—90 %, в остальных — до 99 %). Кроме того, в ФЦ Ботанического сада время от времени проводятся ра-

---

<sup>19</sup> Некоторые результаты, выводы и положения данных наблюдений (полученные к моменту подготовки соответствующих публикаций) получены совместно с коллегами и опубликованы в совместных статьях:

*Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И. и др.* Типология лесных подстилок некоторых типов насаждений ботанического сада МГУ имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы). // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2019. — № 2. — С. 3—19 (личный вклад соискателя 40 %);

*Богатырев Л. Г., Земсков Ф. И.* Methods of studying of detritogenesis processes in model phytocenoses // Ecological Studies, Hazards, Solutions. — 2018. — Vol. 25. — P. 80 (личный вклад соискателя 50 %);

а также в тезисах конференции (Рыжиков, Земсков, 2018) (личный вклад соискателя 50 %).

Табл. 12. Фракционный состав и среднегодовые параметры поступления опада в фитоценозах Ботанического сада МГУ.

Фитоценозы	Содержание фракций, %										Общее поступление		Поступление за листопадные периоды***		
	Листья	Хвоя	Семена-крылатки	Ветки и кора листвен. деревьев	Ветки и кора хвойных деревьев	Шишки	Несортируемый мелкий детрит	Прочее *	Все активные фракции **	Все грубые фракции	Среднегодовое, г/м <sup>2</sup> ·год	V, %	Среднегодовое, г/м <sup>2</sup>	V, %	Доля от общего среднегодового
<b>Лиственничник</b>	22,0	31,1	0,6	3,3	32,8	12,8	4,8	1,5	58,5	41,5	<b>539</b>	24	<b>216</b>	12	0,40
<b>Сосняк</b>	15,2	35,7	0,9	2,9	9,4	25,8	9,2	0,7	61,4	38,6	<b>657</b>	16	<b>177</b>	45	0,27
<b>Ельник ****</b>	14,1	55,9	0,3	3,8	8,5	5,9	7,7	3,9	77,9 (70,2)	22,1 (29,8)	<b>718</b>	39	<b>240</b>	54	0,33
<b>Берёза + Клён</b>	58,6	16,6	4,1	9,5	2,9	0,3	7,1	1,0	86,3	13,7	<b>521</b>	14	<b>310</b>	10	0,60
<b>Грабинник</b>	67,1	1,2	7,1	7,6	0,0	0,0	16,8	0,1	92,3	7,7	<b>589</b>	27	<b>271</b>	5	0,46
<b>Тополёвник</b>	67,6	0,0	0,03	15,8	0,0	0,0	15,2	0,1	84,1	15,9	<b>879</b>	19	<b>389</b>	17	0,44

Примечания. Для тополёвника — 9 наблюдений по 5 повторностей,  $T = 2$  года (2018—2020). Для каждого из остальных ФЦ — 17 наблюдений по 5 повторностей,  $T = 4$  года (2016—2020); коэффициент вариации  $V$  рассчитан соответственно для 2 или 4 величин годового поступления опада. \* «Прочее» включает в основном зоогенные объекты, а также травы и антропогенный мусор, содержание которых пренебрежимо мало ( $\leq 0,3\%$ ). \*\* Активные фракции — листья, семена, хвоя, травы, мелкий детрит. \*\*\* Листопадные периоды — с октября по ноябрь. \*\*\*\* В скобках — содержание активных фракций, если считать «несортируемый детрит», содержащий фрагменты шишек, в числе грубых фракций.

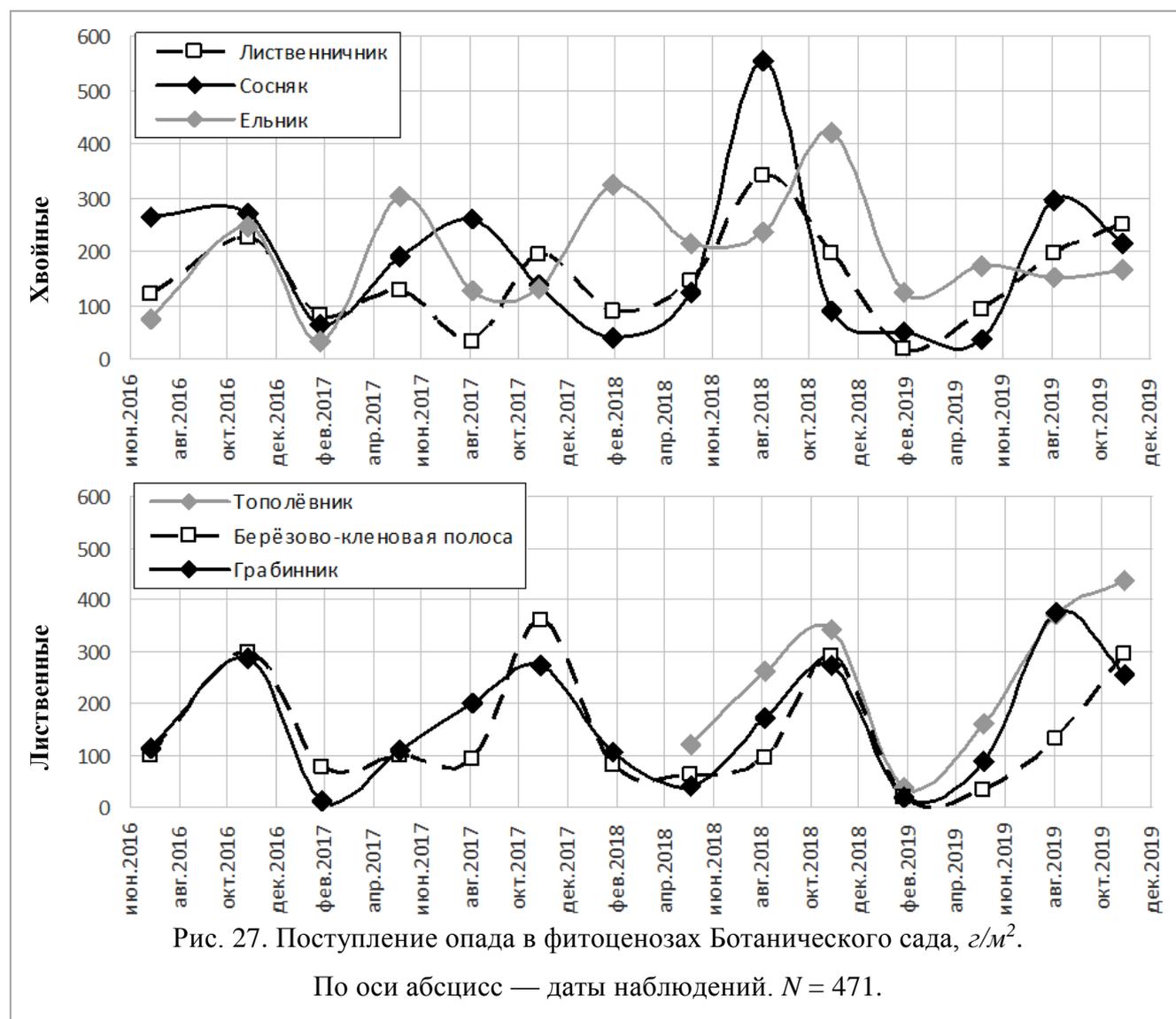
боты по прочистке подлеска, выпиливанию сломанных деревьев и т. п. (по этой причине наблюдения в тополёвнике начаты позднее, чем в остальных ФЦ), прямым или косвенным следствием чего также могут быть нетипичные величины поступления опада в некоторые периоды. Тем не менее, поступление опада в целом подчиняется сезонным закономерностям, хотя динамика сильно осложнена случайными факторами. В целом, поступление опада в фитоценозах Ботанического сада в течение года более равномерное, чем в ФЦ лизиметров — доля осеннего опада от общего составляет 0,27—0,60, в то время как в лесных фитоценозах лизиметров — 0,51—0,79.

Динамика поступления опада в хвойных фитоценозах (рис. 27) подчиняется некой сезонной цикличности, но наибольшее поступление опада не всегда приурочено к осеннему периоду, а в каждом фитоценозе — не всегда к одному и тому же сезону в разные годы. Наименьшее поступление опада чаще всего, хотя и не всегда, приурочено к зимнему периоду. Поступление активных фракций листопадных деревьев, произрастающих в подлеске и в соседних ФЦ, недоста-

точно для того, чтобы обеспечить осенние максимумы поступления опада, наблюдаемые в лиственных фитоценозах. В отдельных случаях смещение максимумов поступления опада имеет понятные причины, например, в ельнике и сосняке, наблюдается весенний пик поступления опада в 2017 году, что, предположительно, связано с воздействием шторма в мае 2017 года. При этом для активных фракций в опаде ельника в этот период (56 %) ниже средней (78 %).

В ельнике довольно высока доля активных фракций, но она, скорее всего, немного завышена, поскольку шишки ели чаще попадают в ОУ в виде отдельных чешуек, и могут быть отнесены к фракции «несортируемый детрит». Если отнести эту фракцию к неактивным (грубым), то содержание активных фракций в опаде ельника получится равным 70,2 %.

Динамика поступления опада в лиственных ФЦ характеризуется наиболее чётко выраженными сезонными закономерностями, подобно смешанному и широколиственному лесу на лизиметрах (рис. 21). Минимальное поступление наблюдается в зимний период. Поступление опада за листопадный период составляет 300—350 г/м<sup>2</sup>, что несколько меньше, чем в широколиственном лесу на лизиметрах. При этом, весеннее и летнее поступление опада находится



примерно на том же уровне. Как и на лизиметрах, занятых широколиственным лесом, здесь отчётливо видны различия между зимним и весенне-летним поступлением опада. Для грабинника характерно более высокое, чем в прочих лиственных насаждениях, поступление опада в летний период (до 200 г/м<sup>2</sup>), которое оказывается ненамного ниже осеннего, составляющего до 300 г/м<sup>2</sup>. Для лиственных ФЦ Ботанического сада характерно также меньшее варьирование значений в каждый из периодов, по сравнению с хвойными ФЦ.

В берёзово-кленовой полосе поступление хвои из лиственничника приводит к тому, что в среднем 17 % массы опада составляет хвоя лиственницы, и 3 % — ветки лиственницы. В опаде грабинника содержится около 1,2 % еловой хвои, переносимой из соседнего ельника.

#### 4.1.3.1. УГЛЕРОД И АЗОТ В ОПАДЕ ФИТОЦЕНОЗОВ БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Содержание углерода и азота определяли в фракциях опада, отобранного в течение примерно одного года — с 15 ноября 2018 по 11 ноября 2019 (табл. 13).

Содержание углерода в *общем* опаде (включая как местный, так и перенесённый опад) составляет ~ 43—47 %; в опаде хвойных ФЦ оно немного выше, чем в опаде лиственных. Средневзвешенное содержание углерода в активных и неактивных фракциях отличается не более чем на 1 % в каждом фитоценозе, вне зависимости от преобладающей растительности. Содержание азота в опаде варьирует сильнее; в лиственных ФЦ оно обычно выше, чем в хвойных, в активных фракциях содержание азота выше, чем в неактивных. Отношение C/N в общем опаде хвойных ФЦ выше, чем в общем опаде лиственных; ельник и берёзово-кленовая полоса занимают по этому параметру промежуточное положение. Отношение C/N в активных и в неактивных фракциях различается в пользу последних и коррелирует с  $R^2 = 0,52$ .

Из данных табл. 13 не столь очевидны различия состава опада хвойных и лиственных деревьев, поскольку они учитывают как хвойный опад, так и лиственный для каждого ФЦ. Если

Табл. 13. Поступление опада и поступление углерода и азота с опадом в биогеоценозах Ботанического сада МГУ.

Биогеоценозы	Годовое поступление опада, г/м <sup>2</sup> ·год	Углерод в опаде			Азот в опаде			Отнош. C/N	
		% *	% * в АФ	г/м <sup>2</sup> ·год	% *	% * в АФ	г/м <sup>2</sup> ·год	общее	в АФ
Лиственничник	551	45,2	45,2	249	0,94	1,16	5,20	47,9	39,0
Сосняк	591	47,0	46,7	278	1,06	1,26	5,02	44,4	37,2
Ельник	596	46,5	46,6	277	1,18	1,18	7,05	39,3	39,5
Тополёвник	822	42,8	43,0	352	1,29	1,46	10,6	33,2	29,5
Берёза+Клён	421	43,2	44,8	182	1,12	1,18	4,7	38,7	38,1
Грабинник	716	45,4	45,3	325	1,27	1,30	9,13	35,6	34,8

Примечания. \* — Средневзвешенное содержание элементов в фракциях опада, с учётом поступления каждой фракции. АФ — активные фракции опада (листья, хвоя, семена и т. п.).

Табл. 14. Отношение C/N в хвойном, лиственном и общем опаде фитоценозов Ботанического сада.

Фитоценозы	Хвойный опад *			Лиственный опад *			Общий опад	
	г/м <sup>2</sup> ·год	% от общего	C/N**	г/м <sup>2</sup> ·год	% от общего	C/N**	г/м <sup>2</sup> ·год	C/N**
Лиственничник	367	66,7	52,7	140	25,3	43,9	551	47,9
Сосняк	391	66,1	69,3	124	21,0	24,4	591	44,4
Ельник	430	72,2	44,5	97	16,2	31,9	596	39,3
Тополёвник	0	0,00	—	822	100,0	33,2	822	33,2
Берёза+Клён	112	26,7	39,8	256	60,9	41,7	421	38,7
Грабинник	21	2,9	46,5	532	74,3	33,5	716	35,6

Примечания. \* Учитываются активные и грубые фракции. Несортируемый детрит не учитывается.

\*\* По средневзвешенному содержанию элементов в фракциях опада, с учётом поступления фракций.

рассмотреть для каждого ФЦ отдельно хвойный и лиственный опад (табл. 14), становится видно, что в лиственничнике, ельнике, сосняке и грабиннике отношение C/N в хвойном опаде существенно выше, чем в лиственном, но в общем опаде эти различия сглаживаются. Только в берёзово-кленовой полосе отношения C/N в хвойном опаде лиственницы и в лиственном опаде почти одинаковы.

Значимой разницы между отношением C/N в хвойном и в лиственном опаде по данным табл. 14 не наблюдается (по *t*-критерию для зависимых выборок,  $p = 0,09$ , средняя разность 9,3,  $n = 5$ ). Однако, если рассмотреть отдельно активные фракции хвойного и лиственного опада, оказывается (рис. 28), что содержание азота в активных фракциях опада лиственных деревьев выше, чем в активных фракциях опада хвойных деревьев (по *t*-критерию для независимых выборок,  $p = 0,02$ ), а содержание углерода и, соответственно, отношение C/N — ниже ( $p = 0,01$ ). В частности, в листьях содержится в среднем 42,9 % C и 1,4 % N, соответственно C/N = 30,4, в хвое — 47,5 % C и 1,0 % N, соответственно C/N = 47,1.

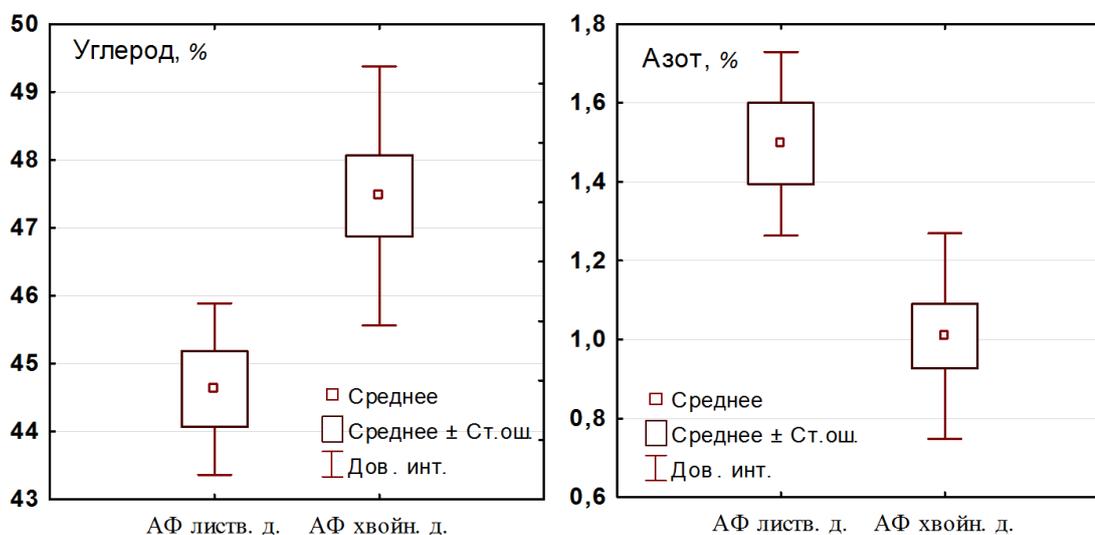


Рис. 28. Среднее содержание углерода и азота в активных фракциях (АФ) опада лиственных ( $n = 10$ ) и хвойных ( $n = 4$ ) деревьев фитоценозов Ботанического сада МГУ.

Азот необходим микроорганизмам в достаточном количестве для синтеза белковых клеток, поэтому чем ниже отношение C/N, тем быстрее идут процессы разложения (Базилевич, Титлянова, 2008). В опаде хвойных деревьев обычно содержится меньше азота, и больше относительно устойчивых компонентов, поэтому для хвойных экосистем типично более медленное разложение органического вещества подстилок (Аристовская, 1980). Поступление легкоминерализуемого листового опада с повышенным содержанием азота, переносимого в хвойные БГЦ, может компенсировать медленное высвобождение азота из хвойного опада, и обуславливать повышенные скорости разложения, наблюдаемые в хвойных биогеоценозах БС МГУ.

#### 4.1.4. СРАВНЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ОПАДА В СХОЖИХ ФИТОЦЕНОЗАХ БОТАНИЧЕСКОГО САДА И ЛИЗИМЕТРОВ

Общим отличием фитоценозов лизиметров от фитоценозов БС МГУ является более высокая доля осеннего опада от общего, а также более высокое содержание активных фракций в опаде (табл. 11 и 12). Поступление грубых фракций также определяет большее варьирование данных в БС МГУ, вплоть до того, что обычная сезонная цикличность общего поступления опада существенно нарушается в некоторые периоды. На лизиметрах грубые фракции в меньшей степени искажают динамику поступления опада — эти фракции сами по себе более мелкие, так как древесина лизиметров моложе, не только по абсолютному возрасту, но и по степени развития отдельных деревьев.

Имеются данные ФЦ лизиметров и Ботанического сада можно пересчитать на 12 периодов накопления опада, охватывающих примерно одни и те же даты для ФЦ лизиметров и ФЦ Ботанического сада, и сравнить динамику поступления опада.

Для фитоценозов со значительным участием лиственных деревьев наблюдается корреляция по поступлению опада (табл. 15). Корреляция сама по себе не является достаточным свидетельством схожести режима функционирования сравниваемых ФЦ, поскольку обусловлена естественной сезонностью процессов, которая в одних и тех же климатических условиях будет схожей. Но отсутствие корреляции, особенно если один из сравниваемых ФЦ характеризуется достаточно чёткой сезонной цикличностью поступления опада, может свидетельствовать о некоторой нарушенности динамики поступления опада, обусловленной случайным поступлением грубых фракций, антропогенным воздействием, или иными причинами. В нашем случае отсутствие корреляции обнаруживается только при сравнении ельников, и предположительно объясняется случайным поступлением грубых фракций (веток, шишек и пр.), доля которых в ельниках выше, чем в смешанных и лиственных ФЦ. Лесохозяйственные работы в ельнике БС МГУ в период наблюдений не проводились.

Поступление опада в **ельнике** на лизиметрах существенно ниже, чем в ельнике БС МГУ (табл. 15, а также табл. 11, 12), различие значимо на уровне  $\alpha = 0,05$ . Это может быть связано с меньшим возрастом древостоев на лизиметрах; другим объяснением может быть интенсивный некомпенсированный вынос опада за пределы лизиметрической площадки (см. описание объекта на стр. 58), который затрагивает по большей части активные фракции опада. Тем не менее, доля осеннего опада от общего в ельнике на лизиметрах составляет 45—62 %, тогда как в ельнике БС МГУ — 33 %.

Динамика поступления опада в **смешанном лесу** лизиметров 35—38 сходна с динамикой, наблюдаемой в берёзово-кленовой полосе и в грабиннике БС МГУ (табл. 15). Величины общего поступления опада в этих ФЦ близки.

Интересно, что среднегодовое поступление опада на лизиметрах 39—42, занятых **широколиственным лесом**, в 1,1—1,7 раза выше, чем в берёзово-кленовой полосе и в грабиннике БС МГУ (различие значимо только для отношения 1,7, лл. 41—42), несмотря на то, что ФЦ лизиметров развиваются в ограниченном пространстве, подвержены интенсивному некомпенсированному выносу опада за пределы лизиметрической площадки, имеют меньший возраст, толщину стволов и высоту крон деревьев, а также несмотря на то, что почвы (или, скорее, поч-

Табл. 15. Сравнение поступления опада в фитоценозах лизиметров и Ботанического сада.

ФЦ лизиметров	№№ лизим.	vs	ФЦ БС МГУ	Средняя разность*, $г/м^2$		$p$ различия**		Отношение средних		$R^2$ (линейн.)		$p$ ( $R^2$ )	
Ельник	31—32	vs	Ельник	-94,6	-79,7	<b>0,006</b>	<b>0,01</b>	2,0	1,7	0,07	0,21	0,42	0,13
	33—34			-64,9		<b>0,02</b>		1,5		0,28		0,08	
Смешанный лес	35—36	vs	Ельник	-42,5	-55,6	0,13	0,06	1,3	1,4	<b>0,35</b>	0,29	<b>0,04</b>	0,07
	37—38			-68,7		<b>0,04</b>		1,6		0,19		0,16	
Смешанный лес	35—36	vs	Берёза + Клён	19,1	6,0	0,40	0,73	0,9	1,0	<b>0,61</b>	<b>0,78</b>	<b>0,003</b>	$1 \cdot 10^{-4}$
	37—38			-7,1		0,61		1,1		<b>0,90</b>		$2 \cdot 10^{-6}$	
Широколист. лес	39—40	vs	Берёза + Клён	17,7	<b>51,4</b>	0,39	<b>0,05</b>	0,9	0,7	<b>0,80</b>	<b>0,85</b>	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
	41—42			<b>85,1</b>		0,6		<b>0,84</b>		$3 \cdot 10^{-5}$			
Залежь	43—44	vs	Берёза + Клён	5,7	<b>-25,1</b>	0,77	<b>0,05</b>	1,0	1,2	<b>0,84</b>	<b>0,89</b>	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$
	45—46			-55,9		<b>0,01</b>		1,8		<b>0,78</b>		$1 \cdot 10^{-4}$	
Смешанный лес	35—36	vs	Грабинник	10,0	-3,2	0,61	0,83	0,9	1,0	<b>0,66</b>	<b>0,82</b>	<b>0,001</b>	$4 \cdot 10^{-5}$
	37—38			-16,3		0,17		1,1		<b>0,91</b>		$1 \cdot 10^{-6}$	
Широколист. лес	39—40	vs	Грабинник	8,5	42,2	0,61	0,10	0,9	0,8	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
	41—42			<b>75,9</b>		0,6		<b>0,84</b>		$3 \cdot 10^{-5}$			
Залежь	43—44	vs	Грабинник	-3,5	<b>-34,3</b>	0,89	<b>0,03</b>	1,0	1,3	<b>0,73</b>	<b>0,84</b>	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
	45—46			-65,1		<b>0,001</b>		1,9		<b>0,87</b>		$1 \cdot 10^{-5}$	

П р и м е ч а н и я . По данным с апреля 2016 г. по май 2019 г.,  $n = 12$ . Для каждой величины приводятся значения, рассчитанные для среднего по двум лизиметрам, в объединённых ячейках — для среднего по четырём лизиметрам. \* Поступление на лизиметрах *минус* поступление в БС МГУ. \*\* По  $t$  критерию для зависимых выборок;  $p$  — уровень значимости различия. Значимые различия и значимые корреляции выделены жирным шрифтом.

воподобные тела) лизиметров изначально представляли собой покровный суглинок без органо-генных горизонтов, и в них не вносили удобрения, в отличие от почв БС МГУ (Раппопорт, 2004). В то же время, древостои на лизиметрах заметно загущены по сравнению с древостоями БС МГУ. И лизиметрическая площадка, и берёзово-кленовая полоса расположены под одним и тем же углом к направлению преобладающих ветров, однако следует учесть, что вынос опада из берёзово-кленовой полосы частично скомпенсирован привносом из лиственничника.

Поступление опада на **залежи** на лизиметрах 43—46 в целом ниже, чем в берёзово-кленовой полосе и грабиннике БС МГУ (табл. 15), а корреляция обусловлена тем, что динамика поступления опада на залежи определяется переносимым листовым опадом.

Полученные данные свидетельствуют, что для лиственных ФЦ лизиметров не свойственно существенное снижение общих величин продукции органического вещества, хотя его структурная и функциональная организация имеет специфические черты. Таким образом, сужение пространства, доступного для развития корневых систем, не становится лимитирующим фактором для лиственных фитоценозов, при условии, что пространство, доступное для развития крон, достаточно велико, но может иметь значение для еловых фитоценозов.

#### 4.1.5. ОЦЕНКА ПЕРЕНОСА ОПАДА

##### 4.1.5.1. ПЕРЕНОС ОПАДА В ПРЕДЕЛАХ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКИ

Среднегодовые величины поступления опада (рис. 24, 25) уже сами по себе свидетельствуют о наличии переноса опада, а возможно и о наличии последствий этого переноса, выраженных в изменении видового состава растительности: в каждой группе лизиметров, занятых одноимёнными ФЦ, наблюдается значительная разница по поступлению опада в зависимости от расположения лизиметра на площадке. Имеющиеся данные о фракционном составе позволяют ориентировочно оценить масштабы переноса опада в пределах лизиметрической площадки.

Поступление опада на лизиметрах 29—30 (пар) невелико (табл. 11), но целиком обеспечивается опадом, сформировавшимся в ельнике (лп. 31—34). На лизиметрах 31 и 32 (ельник, ближе к паре; см. рис. 4) доля листьев в опаде составляет 13 и 3 % соответственно, а на лизиметрах 33 и 34 (ельник, ближе к смешанному лесу) — 34 и 17 %. При этом на лизиметрах 35—36 (смешанный лес) обнаруживается 31 и 18 % листьев в опаде, то есть, примерно столько же, сколько и в соседнем ельнике.

Доля всего опада лиственных деревьев, включая листья, ветки и семена, на лизиметрах 31—34 (ельник) составляет 5,4—39,9 % (в среднем 21,1 %), причём на лизиметрах, расположенных ближе к смешанному лесу — больше (30,8 %), чем на тех, что находятся со стороны чистого пара (11,4 %). Доля елового опада (хвои, веток, шишек) на лизиметрах без елей (широколиственный лес и залежи, лизиметры 39—48) невелика, и составляет в среднем 0,9 % (макси-

мум — 2,7 %). На лизиметрах 45—48 (травяная залежь) в опаде содержится в среднем 40,0 листьев и 16,1 % семян, поступление которых полностью обеспечивается переносом.

Учитывая площадь и расположение ФЦ почвенных лизиметров, можно предположить, что вынос опада из этих ФЦ имеет бóльшие величины, чем вынос из фитоценозов БС МГУ, однако точная оценка этого явления невозможна, поскольку опад переносится на проезжие части и прочие неогороженные территории, где он не может быть отобран опадоуловителями.

#### 4.1.5.2. ПЕРЕНОС ОПАДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ В БИОГЕОЦЕНОЗАХ БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Здесь приводятся результаты сравнения *поступления опада в опадоуловители* (с бортами) с его *накоплением на полотнах* (без бортов) (см. с. 85). Сравнение показало, что, как правило, в ОУ накапливается больше опада (на единицу площади), чем на полотнах (табл. 16), то есть, в большинстве биогеоценозов складывается отрицательный баланс опада. При этом, только в трёх случаях из шести различие является значимым (на основании доверительного интервала средней разности накопления и поступления опада). Значимой также является средняя разность по всем наблюдениям ( $n = 30$ ). Наибольший вынос характерен для лиственничника, расположенного на небольшом возвышении; отсутствие выноса — для грабинника; значительный по величине, но не значимый вынос — для тополёвника. Для сосняка характерен привнос опада, который можно было бы объяснить тем, что опад задерживается густым подлеском, характерным именно для этого фитоценоза. Однако, в данном случае разность не является значимой.

Преобладание выноса опада по поверхности почвы представляется вполне закономерным: общая площадь поверхности БС МГУ больше площади, занятой древостоями, за счёт аллей и мощёных дорожек, поэтому, даже если предположить, что опад распределяется по поверхности равномерно, следует ожидать, что его *накопление*, то есть запасы, которые остаются на поверхности почвы после перераспределения ветром, будет меньше *поступления*.

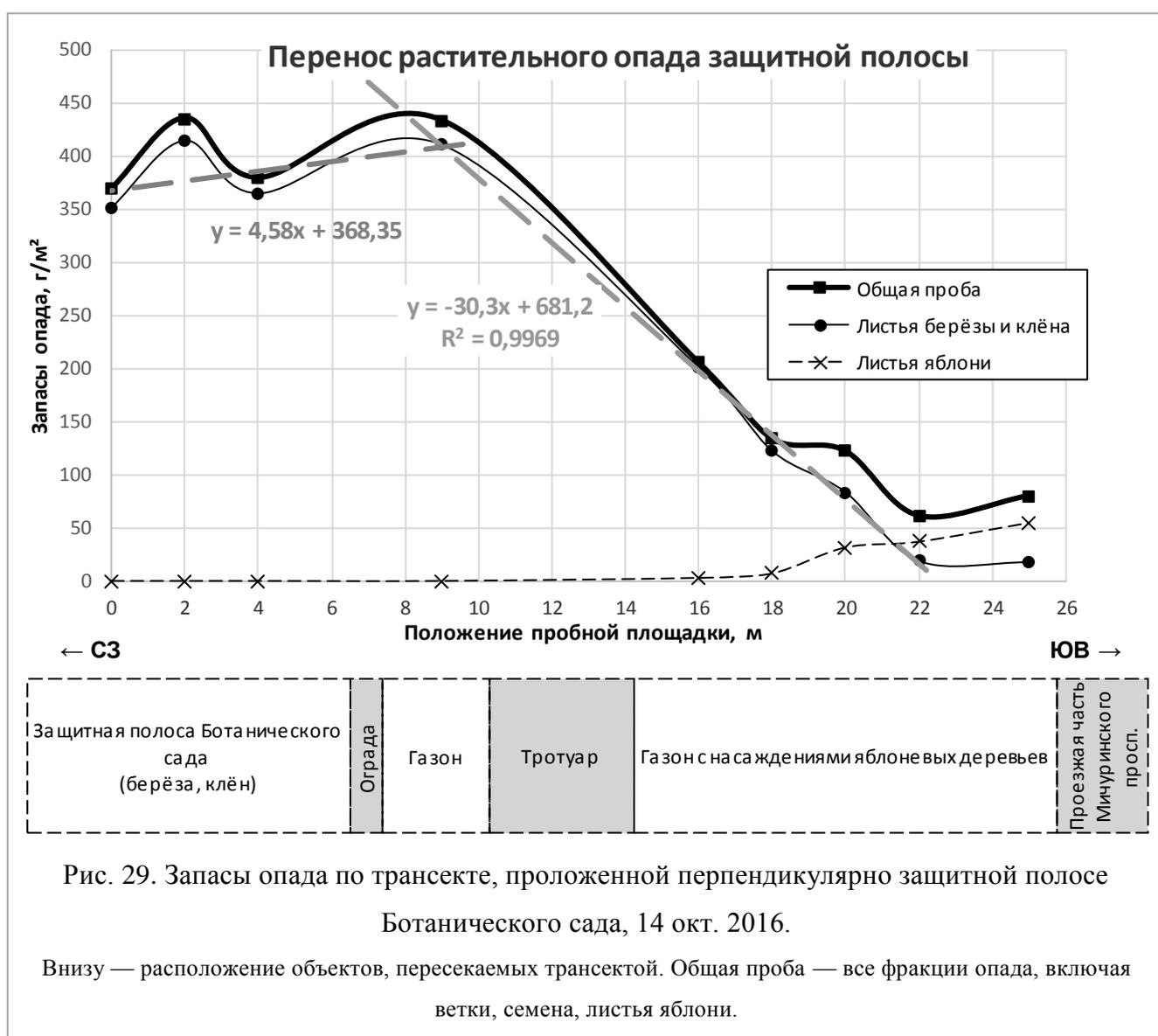
Табл. 16. Сравнение поступления опада в опадоуловители с бортами ( $\varnothing$  36 см, пл. 0,10 м<sup>2</sup>) с его накоплением на полотнах без бортов (пл. не менее 2 м<sup>2</sup>).

Фитоценозы	Поступление опада (в ОУ $\varnothing$ 36 см) ( $n = 5$ ), г/м <sup>2</sup>	Коэф. вариации V, % ( $n = 5$ )	Накопление опада (на полотне, $n = 1$ ), г/м <sup>2</sup>	Перенос опада (средняя разность накопления и поступления)	
				г/м <sup>2</sup> $\pm \Delta$	% от поступления
Лиственничник	<b>181</b>	11,7	<b>112</b>	<b>-68 <math>\pm</math> 26</b>	<b>-38</b>
Сосняк	<b>86</b>	49,7	<b>115</b>	<b>+29 <math>\pm</math> 53</b>	<b>+33</b>
Ельник	<b>352</b>	13,3	<b>238</b>	<b>-114 <math>\pm</math> 58</b>	<b>-32</b>
Тополёвник	<b>239</b>	69,4	<b>155</b>	<b>-84 <math>\pm</math> 206</b>	<b>-35</b>
Берёза + Клён	<b>124</b>	17,9	<b>74</b>	<b>-50 <math>\pm</math> 28</b>	<b>-40</b>
Грабинник	<b>151</b>	10,2	<b>145</b>	<b>-6 <math>\pm</math> 19</b>	<b>-4</b>
Все наблюдения	<b>189</b>	58,9	<b>140</b>	<b>-49 <math>\pm</math> 31</b>	<b>-26</b>

Отметим, что в данном методе оценки присутствует элемент условности: поверхность полотен более гладкая, чем поверхность, по которой опад переносится в естественных условиях, включающая неровности почвы и подстилки, стебли растений, ветки и т. п., задерживающие переносимый опад, поэтому величины выноса опада могут быть несколько завышены. В то же время, опадоуловители могут недоотбирать некоторое количество наиболее крупных веток, что может, напротив, приводить к занижению величин выноса опада.

#### 4.1.5.3. ПЕРЕНОС ОПАДА ЗАЩИТНОЙ ПОЛОСЫ БОТАНИЧЕСКОГО САДА

В ходе данного наблюдения опад отбирали с поверхности почвы по пунктирной трансекте (см. с. 85). На рис. 29 показано распределение запасов опада в пределах трансекты. Запасы листового опада непосредственно под кронами составляют 350—415 г/м<sup>2</sup>. На площадке, расположенной за оградой, над которой нависают ветви деревьев, запасы опада примерно такие же. Затем, начиная от последней площадки, находящейся в проекции крон деревьев, по мере удаления от защитной полосы, на протяжении следующих тринадцати метров запасы опада уменьшаются на



30 г/м<sup>2</sup> через каждый метр, до незначительных величин — около 19 г/м<sup>2</sup>. Распределение запасов на этом отрезке аппроксимируется линейной функцией с  $R^2 \rightarrow 1$  ( $n = 5$ ,  $p = 7 \cdot 10^{-5}$ ).

Сравнение запасов опада под кронами (от  $x_1 = 0$  до  $x_2 = 9$ ) и запасов перенесённого опада (от  $x_2 = 9$  до  $x_3 = 22$ ), вычисленных с помощью линейных функций, аппроксимирующих распределение опада (рис. 29), показывает, что примерно 44,0 % опада, формирующегося в защитной полосе, переносится на близлежащие участки. Первая площадка трансекты находилась примерно в середине защитной полосы, поэтому такое сопоставление правомерно, если принять допущение, что опад переносится примерно в равном количестве в обе стороны — в направлении Мичуринского проспекта, и в противоположном. Трансекта располагается под углом  $\sim 45^\circ$  к преобладающему западному (Справочник..., 2005, т. 2) направлению ветра, таким образом, что ветер дует в направлении от защитной полосы в сторону проспекта.

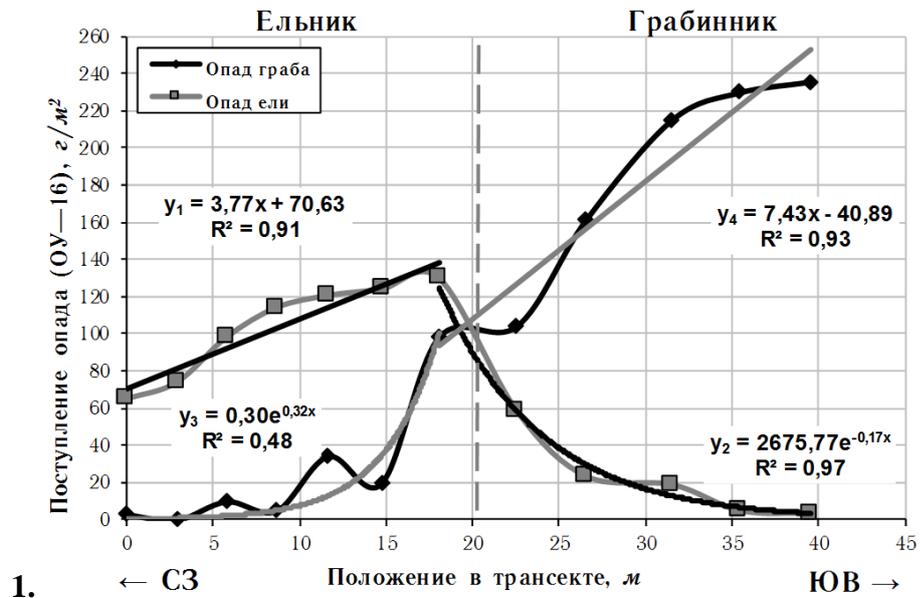
#### **4.1.5.4. ОЦЕНКА ПЕРЕНОСА ОПАДА В ФИТОЦЕНОЗАХ БОТАНИЧЕСКОГО САДА С ПОМОЩЬЮ ОПАДОУЛОВИТЕЛЕЙ<sup>20</sup>**

Предыдущие наблюдения, посвящённые переносу опада, позволяют оценить это явление лишь в общих чертах, но, вместе с тем, свидетельствуют, что перенос опада может быть весьма значительным по сравнению с его поступлением. Поэтому было решено исследовать это явление более подробно с помощью больших (ОУ-36) и малых (ОУ-16) опадоуловителей ( $\varnothing$  36 и 16 см соответственно), попарно расставленных по двум трансектам, одна из которых пересекала по прямой линии ельник и грабинник БС МГУ, другая — берёзово-кленовую полосу и лиственничник, по 12 пар в каждой (подробнее о методе и способах расчёта — см. с. 85). Полученные данные были использованы также для сопоставления ОУ по эффективности отбора разных компонентов опада (см. с. 107).

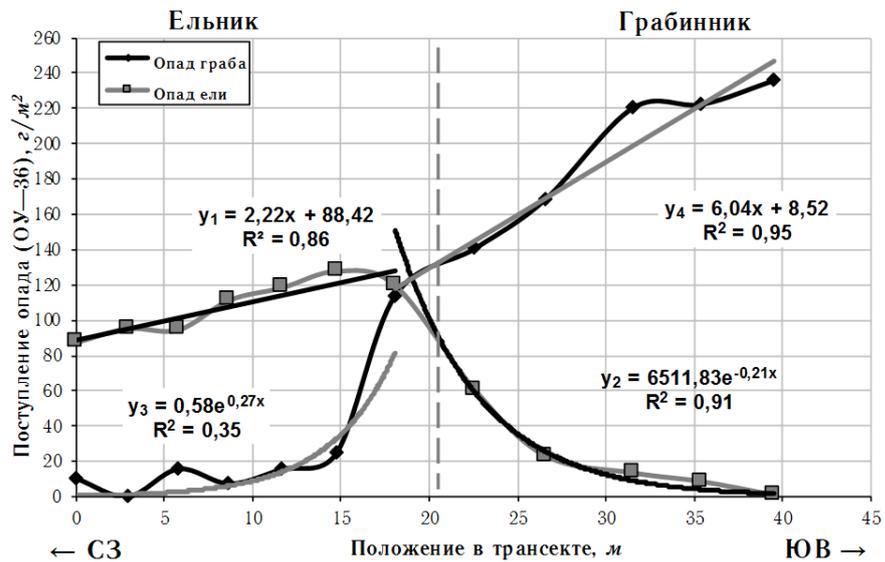
Здесь приводятся данные по поступлению только активных фракций опада (листьев, семян, хвои), поскольку распределение поступления грубых фракций крайне неравномерно, и не может быть аппроксимировано какими-либо функциями. В то же время, грубые фракции в меньшей степени подвержены переносу. По результатам отбора большими ОУ, в перенесённом опаде лиственницы содержится 51,0 % грубых фракций, в перенесённом — 7,8 %; в опаде ели — 8,1 и 1,5 % соответственно, в опаде граба — 8,1 и 6,8 % соответственно (без учёта мелкого несортируемого детрита), однако исходные данные малопригодны для детальной оценки переноса грубых фракций, поскольку характеризуются высоким варьированием, и нередко содержат в одной выборке как выбросы, так и нулевые значения.

---

<sup>20</sup> Основные результаты, положения и выводы этого наблюдения получены совместно с коллегами и опубликованы в тезисах конференции (Макаренко и др., 2020). Личный вклад соискателя 50 %.



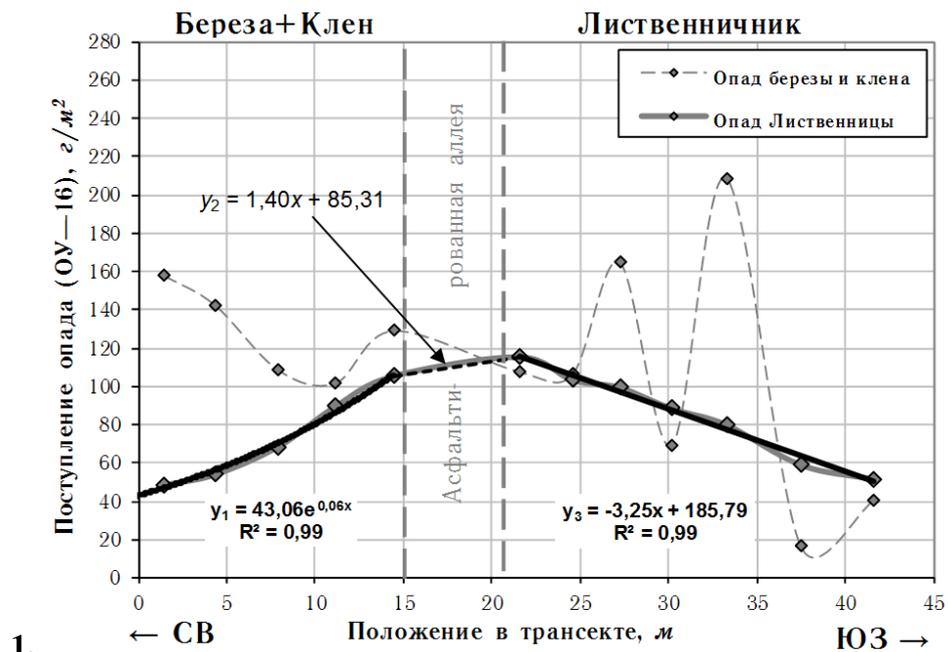
1.



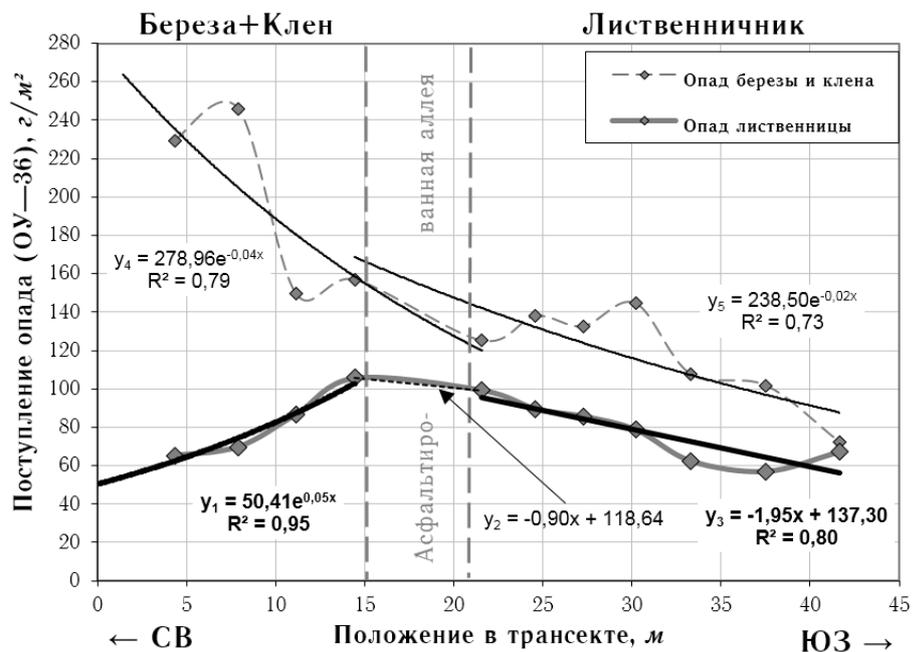
2.

Рис. 30. Распределение активных фракций опада ели и опада граба по трансекте ельник—грабинник. Отбор опадоуловителями  $\varnothing$  16 см (1) и  $\varnothing$  36 см (2).

Распределение неперенесённых активных фракций **опада ели и граба** (рис. 30) описывается линейными функциями с коэффициентами детерминации  $R^2$  0,86—0,95 ( $p \leq 0,003$ ). При этом, общее поступление неперенесённого опада как ели, так и граба, возрастает в направлении грабинника. Поступление перенесённого опада распределяется экспоненциально, и на расстоянии  $\sim 20$  м от границы ФЦ снижается до незначительных величин. Значимость экспоненциальной аппроксимации выше для распределения перенесённого елового опада ( $R^2$  0,97 и 0,91,  $p \leq 0,003$ ), чем для опада граба ( $R^2$  0,48 и 0,35,  $p > 0,08$ ). Если границей между ФЦ считать середину дорожки, проходящей между ними ( $x = 20,35$ ), расчёты по формулам 2 и 3 показывают, что вынос опада граба в сторону ельника составляет 15,8 % (по данным, полученным с помощью ОУ-16) или 13,3 % (по данным ОУ-36) от его общего поступления в пределах трансекты (табл. 17), а вынос опада ели в сторону грабинника — 18,2 % (по ОУ-16) или 14,4 % (по ОУ-36).



1.



2.

Рис. 31. Распределение активных фракций опада лиственницы по трансекте *берёза+клён* — *лиственничник*. Отбор опадоуловителями  $\varnothing 16$  см (1) и  $\varnothing 36$  см (2).

Интересно, что, хотя из грабинника выносятся большее количество опада по общей массе, чем из ельника, в относительном выражении вынос елового опада превосходит вынос опада граба.

Происхождение, а, следовательно, и перенос **опада берёзы и клёна** (рис. 31) установить невозможно, поскольку эти растения встречаются не только в берёзово-кленовой полосе, но и в подлеске лиственничника, и в соседствующих с ним ФЦ. Однако, по мере удаления от берёзово-кленовой полосы поступление соответствующего опада закономерно снижается.

Распределение перенесённой **хвои лиственницы** в берёзово-кленовой полосе также описывается экспоненциальными функциями с  $R^2 = 0,99$  для ОУ-16 и  $R^2 = 0,95$  для ОУ-36 ( $p \leq 0,02$ )

Табл. 17. Параметры расчёта поступления и переноса опада по трансектам.

Трансекта	Активные фракции опада	Ø ОУ, см	Рисунок	Общее поступление по трансекте*, г/м	Неперенесённый опад				Перенесённый опад					
					Функция (на соотв. рис.)	$R^2$ (p) ***	Пределы интегрирования, м	Поступление*, г/м	Функция (на соотв. рис.)	$R^2$ (p) ***	Пределы интегрирования, м	Поступление*, г/м	От общего, %	От перенесённого, %
Ельник — Грабинник	ели	16	30-1	<b>2712</b>	$y_1$	0,91 (0,001)	0;	2217	$y_2$	0,97 (0,000)	20,35;	495	<b>18,2</b>	22,3
		36	30-2	<b>2637</b>	$y_1$	0,86 (0,003)	20,35	2258	$y_2$	0,91 (0,003)	+∞	379	<b>14,4</b>	16,8
Грабинник	граба	16	30-1	<b>4128</b>	$y_4$	0,93 (0,002)	20,35;	3477	$y_3$	0,48 (0,085)	-∞;	650	<b>15,8</b>	18,7
		36	30-2	<b>4184</b>	$y_4$	0,95 (0,001)	39,5	3627	$y_3$	0,35 (0,163)	20,35	558	<b>13,3</b>	15,4
Берёза+Клён — Лиственничник	лиственницы	16	31-1	<b>4157</b>	$y_3$	0,99 (0,000)	21,6; 41,7	1665	$y_1$ ;	0,99 (0,001);	-∞; 21,6	2492	<b>59,9</b>	149,6
		36	31-2	<b>4333</b>	$y_3$	0,80 (0,007)		1518	$y_1$ ;	0,95 (0,024);		2815	<b>65,0</b>	185,5
									$y_2$	1**				

Примечания. \* Соответствует общему поступлению на полосе шириной в 1 м в пределах интегрирования. \*\* Функции построены по двум точкам. \*\*\*  $p$  — уровень значимости  $R^2$  (см. с. 102).

(рис. 31). Распределение неперенесённого опада лиственницы довольно равномерное, и описывается линейными функциями с  $R^2 = 0,99$  для ОУ-16 и  $R^2 = 0,80$  для ОУ-36 ( $p \leq 0,007$ ). Поступление опада на поверхность асфальтированной аллеи рассчитано по крайним ОУ, установленным вблизи границ фитоценозов с аллеей. Поступление опада лиственницы в берёзово-кленовой полосе ненамного ниже, чем в самом лиственничнике, и не достигает величин, близких к нулю — существенная его часть выносится ещё дальше. Расчёт (по формулам 2 и 3) показывает, что вынос опада лиственницы за границу лиственничника с аллеей ( $x = 21,6$ ) в направлении берёзово-кленовой полосы и далее ( $x = -\infty$ ) составляет 59,9 % (по ОУ-16) или 65,0 % (по ОУ-36) от его общего поступления в пределах трансекты (табл. 17).

Преобладающие направления переноса и перераспределения опада в пределах трансект соответствуют преобладанию в октябре западных ветров (Научно-прикладной справочник..., 1990, вып. 8, с. 127). Трансекты располагаются под углом  $\sim 45^\circ$  к направлению преобладающего ветра, таким образом, что ветер дует в направлении от ельника к грабиннику, и от лиственничника — к берёзово-кленовой полосе.

## 4.2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ЗАПАСЫ ПОДСТИЛОК

Для сохранения целостности общего описания объектов, более подробные описания морфологии подстилок были помещены в главе «Объекты исследований», вместе с описаниями растительности и почв. В сводной таблице 18 приведены основные сведения о запасах, строении, и преобладающих компонентах подстилок по всем исследуемым объектам.

Табл. 18 (окончание на след. стр.). Основные характеристики и запасы подстилок исследуемых биогеоценозов.

Группа объектов	№ пл.	Название объекта	Тип подстилки	Состав подстилки	Запасы подстилки $\pm \Delta$ , г/м <sup>2</sup>	n	
Зона смешанных (широко-лиственно-еловых) лесов — Московская обл., Чашниково	18	Переувлажнённый смешанный лес	Деструктивная	Лиственно-хвойная	524 ± 285	3	
	19	Ельник-кисличник	Гумифицированная	Хвойная	2555 ± 862	4	
	20	Смешанный лес	Деструктивная	Лиственная	399 ± 143	4	
	21	Лиственный лес	Деструктивная	Лиственная	557 ± 413	4	
	22	Залежь берёзовая на среднесмытой почве	Деструктивная	Лиственно-травяная	—	—	
	23	Залежь берёзовая на слабосмытой почве			—	—	
Зона широколиств. лесов — Тульская обл.	1	Широколиств. лес	Деструктивная	Лиственная	457 ± 370	4	
	2	Лесополоса берёзовая	Деструктивная	Лиственно-травяная	358 ± 167	4	
	3	Широколиств. лес	Деструктивная	Лиственная	598 ± 262	4	
Зона лесостепей — Липецкая обл.	4	Широколиств. лес	Деструктивная	Лиственная	633 ± 230	4	
	5	Лесополоса осиновая	Деструктивная	Лиственно-травяная	556 ± 280	4	
	6	Лесополоса липово-кленовая	Деструктивная	Лиственная	908 ± 517	4	
	7	Залежь	Деструктивная	Травяная	164 ± 90	4	
Южная граница зоны лесостепей — Воронежская обл.	Солонцов. комплекс	8	Осиновый лес	Деструктивная, ферментативная	Лиственная	1333 ± 395	4
		9	Луг разнотравно-злаковый	Деструктивная	Травяная	373 ± 220	4
	Хреновской бор	12	Смешанный лес в понижении	Ферментативная, гумифицированная	Лиственно-хвойная	2061 ± 638	4
		13	Редколесье на возвышении	Гумифицированная	Хвойная	2231 ± 546	4
		14	Смешанный лес на возвышении	Гумифицированная	Хвойная	1982 ± 815	4
	Каменная степь	10	оп. уч. Лесополоса	Деструктивная	Лиственная	553 ± 142	4
		11	оп. уч. Некосимая степь	Деструктивная, ферментативная	Лиственная	1357 ± 340	4
Зона сухих степей — Волгоград. обл.	15	Лесополоса дубовая	Деструктивная, ферментативная	Травяно-лиственная	1752 ± 507	4	
	16	Степь типчаково-полынная	Деструктивная	Травяная	516 ± 441	4	

Группа объектов		№ пл.	Название объекта	Тип подстилки	Состав подстилки	Запасы подстилки $\pm \Delta$ , $г/м^2$		<i>n</i>
Ботанический сад МГУ	Хвойные	27	Лиственничник	Ферментативная, гумифицированная	Лиственно-хвойная	<b>4173</b> $\pm$ 2818 (2491 $\pm$ 697) <sup>1</sup>		5
						<b>1902</b> $\pm$ 707 (2019)		3
		29	Сосняк	Деструктивная	Лиственно-хвойная	<b>1580</b> $\pm$ 1238 (2017)		5
						<b>1076</b> $\pm$ 729 (2019)		3
		31	Ельник	Деструкт., фермент., гумифицир.	Лиственно-хвойная	<b>2498</b> $\pm$ 2113 (1926 $\pm$ 651) <sup>1</sup>		5
						<b>665</b> $\pm$ 768 (2019)		3
Ботанический сад МГУ	Лиственные	26	Тополёвник	Деструктивная	Лиственная	<b>1146</b> $\pm$ 271 (1745 $\pm$ 2102) <sup>2</sup>		4
						<b>963</b> $\pm$ 1472 (2019)		3
		28	Берёзово-кленовая полоса	Деструктивная	(Хвойно-) <sup>3</sup> лиственная	<b>652</b> $\pm$ 347 (2017)		5
						<b>684</b> $\pm$ 623 (2019)		3
		30	Грабинник	Деструктивная	(Хвойно-) <sup>3</sup> лиственная	<b>848</b> $\pm$ 469 (2017)		5
						<b>576</b> $\pm$ 21 (2019)		3
Лизиметры МГУ	л. 29	Чистый пар	(Отсутствует)	—	—		—	
	л. 30				—		—	
	л. 31	Ельник	Деструктивная	Хвойная	187	<b>226</b> $\pm$ 75 <sup>4</sup>	4	
	л. 32				186			
	л. 33				281			
	л. 34				250			
	л. 35	Смешанный лес	Ферментативная	Хвойно-лиственная	278	<b>314</b> $\pm$ 74	4	
	л. 36				270			
	л. 37				364			
	л. 38				343			
	л. 39	Широколиственный лес	Ферментативная	Лиственная	443	<b>597</b> $\pm$ 191	4	
	л. 40				614			
	л. 41				594			
	л. 42				735			
л. 43	Залежь травяно-кустарниковая	Деструктивная	Лиственная	461	<b>538</b> $\pm$ 971	2		
л. 44				614				

Обозначения и примечания: «—» — нет данных. <sup>1</sup> В скобках — без учёта фракции «мелкий детрит + мелкозём» в подгоризонтах О2/О3. <sup>2</sup> В скобках — с учётом предположительно антропогенного подгоризонта О2/О3 (*n* = 1). <sup>3</sup> В скобках — состав подстилок на участках ФЦ, где поступает заметное количество перенесённого опада. <sup>4</sup> В объединённых ячейках — средние значения по лизиметрам с одноимёнными ФЦ.

Данные этой таблицы использованы для расчёта подстилочно-опадных коэффициентов и оценки интенсивности биологического круговорота в БГЦ Ботанического сада и лизиметров, а также для установления зональных закономерностей разложения материалов стандартизированных образцов в связи с запасами подстилок. Далее в этой главе будут приведены более подробные исследования подстилок, выполненные на примере БГЦ Ботанического сада.

Подстилки на исследуемых объектах хотя и варьируют от деструктивных до гумифицированных, и имеют различный состав, но всё же являются типичными для относительно дренированных ландшафтов, даже на площадках где признаки переувлажнения имеются в почвенном профиле. Перегнойные и торфянистые подстилки на исследуемых объектах не встречались.

## 4.2.1. Подстилки БОТАНИЧЕСКОГО САДА МГУ

### 4.2.1.1. Структурно-функциональная организация и запасы подстилок (наблюдение 2017 года)<sup>21</sup>

Исследования показали, что наиболее однотипным строением подстилок характеризуются листовенные БГЦ, где преобладают деструктивные подстилки, представленные опадом прошлых лет и текущего года. Эти подстилки чётко отделены от верхних горизонтов почв и имеют мощность не более 1—3 см. Интересно, что деструктивные подстилки преобладают также в ельнике и сосняке. При этом, если в ельнике можно встретить на приствольных повышениях незначительные площади, занятые ферментативными и гумифицированными подстилками, то в сосняке такие подстилки не встречаются. Только в листовенничнике встречаются ферментативные и гумифицированные подстилки, достигающие мощности 3—5 см и образующие сплошной покров. Анализ фракционного состава подстилок (табл. 19—24) и содержания золы в отдельных фракциях показал значительное варьирование этих параметров в зависимости от типологической принадлежности подстилок, а также их значительную дифференциацию в системе сопряжённых подгоризонтов ферментативных и гумифицированных подстилок.

**Примечание.** В строках средних значений в табл. 19—24 приводится средневзвешенное содержание золы, рассчитанное с учётом запасов каждой фракции.

#### ПОДСТИЛКИ ЛИСТВЕННИЧНИКА (ПЛОЩАДКА 27)

В листовенничнике (насаждения листовенницы даурской — *Larix gmelinii* (RUPR.) KUZEN.) формируются ферментативные и гумифицированные подстилки; последние приурочены к приствольным парцеллам и занимают значительную площадь (табл. 19).

В подгоризонте О1 **ферментативных** подстилок преобладают грубые фракции (ветки и шишки); на активные фракции приходится меньше половины общей массы подгоризонта. Значительно содержание листьев, поступающих как от произрастающих здесь листовенных деревьев подроста и подлеска, так и в результате межбиогеоценозного обмена. В подгоризонте О2 основная масса детрита приходится также на грубые фракции, притом около половины массы составляет мелкий несортируемый детрит; хвоя листовенницы отсутствует.

---

<sup>21</sup> Основные результаты, положения и выводы данного исследования получены совместно с коллегами и опубликованы в совместной статье:

Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И. и др. Типология лесных подстилок некоторых типов насаждений ботанического сада МГУ имени М. В. Ломоносова (ленинские горы) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2019. — № 2. — С. 3—19 (личный вклад соискателя 40 %),

а также в тезисах конференций (Земсков, Богатырев, Вартапов, 2018; Леонтьева и др., 2018) (личный вклад соискателя 70 и 40 % соотв.)

В гумифицированных подстилках наблюдается закономерная вертикальная дифференциация по компонентам. Активные фракции сохраняют целостность лишь в подгоризонте О1, в то время как в нижних подгоризонтах они представлены только в составе мелкого детрита. Содержание грубых фракций также снижается: 70 % в подгоризонте О1, 29 % в подгоризонте О2, 12 % в подгоризонте О2/О3, в то время как доля мелкого детрита возрастает от верхних подгоризонтов к нижним. В подгоризонте О2/О3 88 % от общих запасов представлено мелким детритом — сильноразложившимися фракциями, содержащими тонкий мелкозём с высоким содержанием органического вещества.

Обращает на себя внимание высокая зольность подгоризонта О2/О3, которая свидетельствует о большом содержании минеральных примесей, большая часть которых приходится на фракцию «мелкий детрит + мелкозём». С классификационной точки зрения подгоризонт О2/О3

Табл. 19. Фракционный состав, содержание и запасы золы в подстилках лиственничника Ботанического сада.

Типы и строение подстилок		Фракции	Запасы фракций, г/м <sup>2</sup>	Содержание фракций, %	Зола (сырая, 450°С), %	Запасы золы, г/м <sup>2</sup>
Ферментативные подстилки (О1—О2) (n = 2)	Подгоризонт О1 (n = 2)	Ветки, шишки	350	63,9	6,4	22,3
		Хвоя	119	21,6	10,5	12,4
		Листья	74	13,5	16,3	12,1
		Свежий опад	5	0,9	7,7	0,4
		<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>548</b>	<b>100,0</b>	<b>8,6</b>	<b>47,1</b>
		Мелкий детрит	776	51,3	33,4	259,0
		Ветки	681	45,0	6,0	40,8
		Кора	57	3,7	21,4	12,1
		<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>1514</b>	<b>100,0</b>	<b>20,6</b>	<b>311,9</b>
<b>Всего в подстилке</b>			<b>2061</b>	<b>100,0</b>	<b>17,4</b>	<b>359,0</b>
Гумифицированные подстилки (О1—О2—О2/О3) (n = 3)	Подгоризонт О1 (n = 3)	Ветки, шишки	7178	57,8	5,0	35,6
		Хвоя	295	23,7	10,6	31,3
		Кора	150	12,1	7,2	10,9
		Листья	71	5,7	18,2	12,9
		Свежий опад	8	0,7	8,3	0,7
		<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>1241</b>	<b>100,0</b>	<b>6,3</b>	<b>91,3</b>
	Подгоризонт О2 (n = 3)	Мелкий детрит	822	71,3	41,4	340,2
		Ветки	137	11,9	8,1	11,1
		Кора	101	8,8	11,4	11,5
		Шишки	93	8,1	39,9	37,1
	<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>1152</b>	<b>100,0</b>	<b>34,7</b>	<b>399,9</b>	
	Подгоризонт О2/О3 (n = 3)	Мелкий детрит + мелкозём	2804	88	49,7	1392,4
		Ветки	198	6,2	7,7	15,3
		Шишки	155	4,9	8,1	12,5
		Кора	30	0,9	22,6	6,7
<b>Всего в подгоризонте</b>		<b>3187 (383)</b>	<b>100,0</b>	<b>44,8 (9,0)</b>	<b>1427 (34,5)</b>	
<b>Всего в подстилке</b>			<b>5581 (2777)</b>	<b>100,0</b>	<b>34,1 (18,5)</b>	<b>1918,3 (525,8)</b>
<b>Среднее по пробам подстилок</b>			<b>4173 (2491)</b>	—	<b>27,5 (12,4)</b>	<b>1294,5 (459,1)</b>

Примечание: в скобках — значения без учёта фракции «мелкий детрит + мелкозём».

формально не может быть отнесён к горизонту гумификации — по содержанию золы он соответствует скорее минеральному горизонту. Ветки и шишки в подгоризонте O2/O3 не гумифицированы в значительной степени, и могут быть отнесены к вышележащему подгоризонту O2, в то время как фракция «мелкий детрит + мелкозём» в подгоризонте O2/O3 не может быть отнесена к подгоризонту гумификации, несмотря на кажущееся морфологическое соответствие материалу. Этому вопросу была посвящена одна из работ (Богатырев, Фомина, 1990), в которой рассматривалось диагностическое значение потери при прокаливании верхних и нижних подгоризонтов подстилки. Учитывая это обстоятельство, запасы подстилки рассчитывали в двух вариантах, а при расчёте подстильно-опадных коэффициентов эту фракцию не учитывали.

### Подстилки сосняка (площадка 29)

В сосняке (насаждения сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L.) развиваются деструктивные подстилки, представляющие собой опад текущего года и прошлых лет, и характеризующиеся значительным разнообразием фракций (табл. 20). В подстилке преобладают грубые фракции — ветки, кора и шишки. Общее содержание активных фракций — 20 %, грубых фракций — 80 %. Незначительная часть приходится листья и остатки мхов.

Запасы подстилок здесь существенно более низкие, чем в лиственничнике БС МГУ, а также по сравнению с Хреновским бором (пл. 12—14, см. табл. 18). В подстилках Хреновского бора содержится существенное количество несортируемого детрита — до 60 %. Несмотря на преобладание хвойных компонентов, по морфологии и запасам подстилки сосняка сближаются с подстилками лиственных биогеоценозов.

Табл. 20. Фракционный состав, содержание и запасы золы в деструктивных подстилках сосняка Ботанического сада (строение: O1,  $n = 5$ ).

Фракции	Запасы фракций, г/м <sup>2</sup>	Содержание фракций, %	Зола (сырая, 450°C), %	Запасы золы, г/м <sup>2</sup>
Шишки	643	40,7	4,7	30,2
Ветки и кора	591	37,4	8,4	49,9
Хвоя	262	16,6	5,9	15,3
Травы	50	3,2	7,3	3,6
Орехи	23	1,5	1,5	0,3
Мох	9	0,6	36,1	3,2
Листья	1	0,1	10,8	0,1
<b>Всего</b>	<b>1580</b>	<b>100,0</b>	<b>6,5</b>	<b>102,7</b>

### Подстилки ельника (площадка 31)

В ельнике (*Picea obovata* LEDEB. — ель сибирская), преобладают деструктивные подстилки, сложенные преимущественно хвоей и мелкозёмом, практически неотделимым от массы детрита (табл. 21). Эти подстилки содержат примерно по 50 % активных и грубых фракций. Доля сохранившихся активных фракций лиственных деревьев невелика, и составляет около 2 %.

Встречаются и мертвопокровные участки с гумифицированными подстилками, представляющими собой серию подгоризонтов O1—O2—O2/O3. Активные фракции (хвоя) в неразрушенном виде присутствуют в подгоризонтах O1 (25 %) и O2 (64,5 %). Содержание грубых фракций в системе подгоризонтов O1—O2—O2/O3 изменяется следующим образом: 78 % — 35 % — 8 % (от общих запасов подгоризонтов), таким образом, распределение грубых фракций в системе подгоризонтов подстилки может служить своеобразным маркером при сравнительном анализе закономерностей преобразования органических остатков. Фракция «хвоя» в подгоризонте O2 характеризуется значительной примесью мелкозёма, а в O2/O3 присутствует только в составе мелкого детрита с ещё большей примесью мелкозёма.

Так же, как и в подстилках лиственничника, здесь выделен подгоризонт O2/O3. Этот подгоризонт более переработанный, и по содержанию золы ближе к минеральному горизонту почвы. Включает хорошо сохранившиеся компоненты, которые можно отнести скорее к O2, но 92 % массы подгоризонта составляет высокозольная фракция «мелкий детрит + мелкозём», ко-

Табл. 21. Фракционный состав, содержание и запасы золы в подстилках ельника Ботанического сада.

Типы и строение подстилок		Фракции	Запасы фракций, г/м <sup>2</sup>	Содержание фракций, %	Зола (сырая, 450°С), %	Запасы золы, г/м <sup>2</sup>	
Деструктивные подстилки (строение: O1) (n = 4)		Хвоя + мелкозём	825	47,1	24,7	204,2	
		Ветки	545	31,1	6,3	34,3	
		Шишки	195	11,1	10,6	20,7	
		Орехи	70	4,0	3,8	2,7	
		Кора	64	3,6	8,5	5,4	
		Листья	36	2,1	15,0	5,4	
		Зелёные ветки ели	19	1,1	0,7	0,1	
		Серёжки	0,4	0,02	33,2	0,1	
		<b>Всего в подстилке</b>	<b>1753</b>	<b>100,0</b>	<b>15,3</b>	<b>272,9</b>	
Гумифицированная подстилка (строение: O1—O2—O2/O3) (n = 1)	Подгоризонт O1	Шишки	469	36,7	4,9	22,8	
		Ветки	342	26,8	6,4	21,7	
		Хвоя	322	25,2	21,6	69,7	
		Орехи	144	11,2	0,7	1,1	
		<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>1278</b>	<b>100,0</b>	<b>9,0</b>	<b>115,4</b>	
	Подгоризонт O2	Хвоя	703	64,5	22,5	158,0	
		Шишки	291	26,7	5,0	14,5	
		Ветки	96	8,8	11,4	11,0	
			<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>1090</b>	<b>100,0</b>	<b>16,8</b>	<b>183,5</b>
	Подгоризонт O2/O3	Мелкий детрит + мелкозём	2858	92,0	68,7	1964,5	
		Шишки	157	5,1	14,7	23,1	
		Ветки	92	3,0	7,7	7,1	
		<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>3107</b> (249)	<b>100,0</b>	<b>64,2</b> (12,1)	<b>1994,7</b> (30,2)	
		<b>Всего в подстилке</b>	<b>5475</b> (2617)	<b>100,0</b>	<b>41,9</b> (12,6)	<b>2293,5</b> (329,3)	
<b>Среднее по пробам подстилки</b>			<b>2498</b> (1926)	—	<b>20,6</b> (14,7)	<b>677,0</b> (284,1)	

Примечание: В скобках — значения, рассчитанные без учёта фракции «мелкий детрит + мелкозём».

торая представляет собой сильно разложившиеся растительные остатки со значительной долей тонких минеральных примесей. Поэтому здесь расчёт общих запасов подстилки и золы, так же, как и для подстилок лиственничника, выполнен в двух вариантах — с учётом фракции «мелкий детрит + мелкозём» и без учёта последней.

Запасы подстилок в ельнике БС МГУ ниже, чем в ельнике-кисличнике в Чашниково (пл. 19 — небольшой участок леса с относительно молодым древостоем), где они составляют 2555 г/м<sup>2</sup> (табл. 18).

### Подстилки тополёвника (площадка 26)

В тополёвнике (*Populus alba* L.) развиваются преимущественно деструктивные подстилки; основная доля в их компонентном составе приходится на ветки, на втором месте — листья (табл. 22). Остальные фракции составляют в сумме не более 14 %. Содержание активных фракций — 28 %, грубых фракций — 72 %. Присутствует незначительное (менее 1 %) количество хвои. Мощность деструктивных подстилок тополёвника несколько выше по сравнению с деструктивными подстилками остальных биогеоценозов БС МГУ.

На единственном участке обнаружена подстилка, более чётко дифференцированная на подгоризонты О1—О2/О3, что позволяет отнести её к типу гумифицированных, хотя такие подстилки всё же нетипичны для данного биогеоценоза, и могли развиваться в местах искусственных скоплений детрита, образовавшихся в ходе хозяйственных работ. Об этом свидетельствует полное отсутствие диагностируемых фракций в подгоризонте О2/О3. Поэтому, данный

Табл. 22. Фракционный состав, содержание и запасы золы в подстилках тополёвника Ботанического сада.

Типы и строение подстилок		Фракции	Запасы фракций, г/м <sup>2</sup>	Содержание фракций, %	Зола (сырая, 450°C), %	Запасы золы, г/м <sup>2</sup>	
Деструктивные подстилки (строение: О1) (n = 3)		Ветки	711	65,5	18,4	131,1	
		Листья	247	22,8	16,3	40,3	
		Семена	47	4,3	22,5	10,6	
		Орехи	47	4,3	1,3	0,6	
		Кора	25	2,3	14,9	3,7	
		Хвоя	9	0,8	6,3	0,6	
				<b>Всего в подстилке</b>	<b>1087</b>	<b>100,0</b>	<b>16,2</b>
Гумифицированная подстилка (строение: О1—О2/О3) (n = 1)	Подгоризонт О1 (n = 1)	Ветки	1005	75,9	7,9	79,6	
		Листья	255	19,2	20,9	53,2	
		Семена	36	2,8	28,9	10,5	
		Кора	23	1,7	14,8	3,4	
			<b>Всего в подгоризонте</b>	<b>1324</b>	<b>100,0</b>	<b>7,1</b>	<b>147,0</b>
		Подгор. О2/О3 (n = 1)	Мелкий детрит:	2393	100,0	—	—
		<b>Всего в подстилке</b>	<b>3717</b>	<b>100,0</b>	—	—	
<b>Среднее по пробам подстилки</b>			1744 *	—	—*	—*	
			<b>1146 **</b>	—	<b>13,9 **</b>	<b>177 **</b>	

Примечания. \* Среднее с учётом всех подгоризонтов. \*\* Только в подгоризонтах О1.

подгоризонт будет считаться нетипичным для данного БГЦ, и не будет учитываться в дальнейших вычислениях, выполненных на основе этих данных. Верхний подгоризонт этой гумифицированной подстилки по содержанию отдельных фракций, по содержанию активных (22 %) и грубых (78 %) фракций, а также по общим запасам близок к деструктивным подстилкам этого биогеоценоза.

### ПОДСТИЛКИ БЕРЕЗОВО-КЛЕНОВОЙ ЗАЩИТНОЙ ПОЛОСЫ (ПЛОЩАДКА 28)

Подстилки берёзово-кленовой (*Betula pendula* ROTM.; *Acer platanoides* L.) полосы — деструктивные, образуют равномерный покров, который только в периоды листопада полностью перекрывает поверхность почвы. Более половины массы материала приходится на ветки, на втором месте — листья; значительная часть приходится на хвою, переносимую из лиственничника (табл. 23). Около 32 % приходится на активные фракции, около 65 % — на грубые фракции, остальные 3 % — на мелкий детрит с мелкозёмом.

Табл. 23. Фракционный состав, содержание и запасы золы в деструктивных подстилках берёзово-кленовой защитной полосы Ботанического сада (строение: О1,  $n = 5$ ).

Фракции	Запасы фракций, г/м <sup>2</sup>	Содержание фракций, %	Зола (сырая, 450°С), %	Запас золы, г/м <sup>2</sup>
Ветки	408	62,6	8,0	32,5
Листья	131	20,1	15,6	20,5
Хвоя	72	11,1	17,0	12,3
Мелкий детрит + мелкозём	19	2,9	56,8	10,7
Кора	9	1,4	9,4	0,9
Семена	5	0,8	—	—
Орехи	5	0,8	9,0	0,5
Свежий опад	3	0,4	15,4	0,4
<b>Всего (по подстилке)</b>	<b>652</b>	<b>100,0</b>	<b>11,9</b>	<b>77,7</b>

### ПОДСТИЛКИ ГРАБИННИКА (ПЛОЩАДКА 30)

Подстилки грабинника (*Carpinus betulus* L.) — деструктивные, образуют почти сплошной покров, распределены наиболее равномерно по сравнению с другими БГЦ Ботанического сада. Состоят преимущественно из веток, второе место принадлежит листьям, совсем незначительная часть приходится на серёжки и орехи (табл. 24). Содержание активных фракций — 67 %, грубых фракций — 33 %.

Табл. 24. Фракционный состав, содержание и запасы золы в деструктивных подстилках грабинника Ботанического сада (строение: О1) ( $n = 5$ ).

Фракция	Запасы фракций, г/м <sup>2</sup>	Содержание фракций, %	Зола (сырая, 450°С), %	Запасы золы, г/м <sup>2</sup>
Ветки	533	62,8	6,4	34,2
Листья	263	31,1	19,1	50,2
Орехи	33	3,9	4,9	1,7
Серёжки	19	2,2	9,9	1,8
<b>Всего</b>	<b>848</b>	<b>100,00</b>	<b>10,4</b>	<b>87,9</b>

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДСТИЛОК БИОГЕОЦЕНОЗОВ БОТАНИЧЕСКОГО САДА

В целом, запасы подстилок в хвойных насаждениях (от 1580 г/м<sup>2</sup> в сосняке — до 2491<sup>22</sup> г/м<sup>2</sup> в лиственничнике) существенно выше, чем в лиственных (от 652 г/м<sup>2</sup> в берёзово-кленовой полосе — до 1146 г/м<sup>2</sup> в тополёвнике), но при этом важно отметить, что, по сравнению с естественными хвойными экосистемами, запасы подстилок в хвойных насаждениях Ботанического сада ниже, и гумифицированные подстилки играют не столь высокую роль в пространственной структуре подстилок, а в сосняке БС МГУ и вовсе не встречаются.

**Содержание золы** варьирует как по фракциям, так и по подгорizontам подстилок. В деструктивных подстилках лиственных насаждений средневзвешенное содержание золы (рассчитанное с учётом вклада отдельных фракций) оказывается схожим, и составляет 11—13 % (в отдельных случаях до 16 %).

В целом, для подстилок всех БГЦ наиболее высокое содержание сырой золы характерно для мелких фракций, и объясняется повышенным содержанием мелкозёма. Мелкие фракции, такие как хвоя, наиболее подвержены поверхностному загрязнению мелкозёмом за счёт большой удельной поверхности, а мелкий детрит также может быть перемешан с небольшими минеральными и органоминеральными агрегатами. В частности, подгорizontы O2/O3 гумифицированных подстилок ельника и лиственничника характеризуются наиболее высоким содержанием золы, что связано с высоким содержанием в них мелкозёма (табл. 19, 21), который зачастую преобладает над органическими компонентами этой фракции, а иногда и над всеми органическими фракциями такого подгорizontа. Фактически такой подгорizont можно охарактеризовать как органоминеральный, переходный между подстилкой и верхним горizontом почвы, поэтому отнесение его к лесной подстилке весьма условно.

Низкое содержание золы (не более 10 %) характерно для свежего опада, а также для объектов с наименьшей удельной поверхностью — веток, орехов, иногда — шишек и коры. Таким образом, в случае с исследуемыми подстилками содержание сырой золы определяется прежде всего содержанием мелкозёма, и в меньшей степени — зольностью самих растительных тканей, характерной для тех или иных компонентов.

Для ферментативных и гумифицированных подстилок можно также выявить некоторые закономерности изменения содержания фракций и золы **в системе сопряжённых подгорizontов** (табл. 25). В таких подстилках от верхних горizontов к нижним всегда снижается содержание грубых фракций, а часто — и их общие запасы. Содержание золы в грубых фракциях ис-

---

<sup>22</sup> Без учёта фракции «мелкий детрит + мелкозём» в подгорizontе O2/O3.

следуемых подстилок всегда возрастает в подгоризонте O2 по сравнению с O1, в то время как запасы золы грубых фракций могут как возрастать за счёт увеличения зольности последних, так и снижаться за счёт уменьшения их запасов. Общая зольность в системе подгоризонтов возрастает, главным образом — за счёт появления высокозольного мелкого детрита, загрязнённого мелкозёмом. Общие запасы золы в подгоризонте O2 в 1,6—6,6 раза выше, чем в O1, а в подгоризонте O2/O3 — в 15,6—17,3 раза выше, чем в O2. При этом в ельнике общие запасы золы в подгоризонте O2/O3 по сравнению с O2 возрастают в 10,9 раза, тогда как в лиственничнике — лишь в 3,6 раза; аналогично и содержание золы в подгоризонтах O2 и O2/O3 подстилки ельника различается значительно (на 47 %), чем в аналогичных подгоризонтах подстилки лиственничника (на 10 %). Это свидетельствует о более постепенном характере преобразования органического вещества в подстилках лиственничника.

Фракция «мелкий детрит» не выделяется в подгоризонтах O1. В гумифицированных подстилках лиственничника, где эта фракция присутствует в подгоризонтах O2 и O2/O3, её зольность возрастает незначительно (от 41,4 % в O2 до 49,6 % в O2/O3), но запасы этой фракции возрастают в 3,4 раза, а запасы золы в её составе — в 4,1 раза. Активные фракции в цельном виде встречаются только в подгоризонтах O1, что не позволяет проследить их изменения в профиле подстилки.

В подгоризонтах O1 подстилок лиственничника встречается свежий опад, зольность которого ниже, чем зольность активных фракций, выделенных из толщи этого подгоризонта.

Полученные данные могут служить основой для оценки характера преобразования орга-

Табл. 25. Изменение содержания и запасов грубых фракций и сырой золы в системе сопряжённых подгоризонтов подстилок ельника и лиственничника.

БГЦ	Подстилка	Подгоризонт	Грубые фракции			Зола грубых фракций *			Зола всех фракций *		
			Содержание, %	Запасы, г/м <sup>2</sup>	Запасы по отн. к O1	Содержание, %	Запасы, г/м <sup>2</sup>	Запасы по отн. к O1	Содержание, %	Запасы, г/м <sup>2</sup>	Запасы по отн. к O1
Ельник	Гумиф. (n = 1)	O1	74,8	956	1,00	4,8	46	1,00	9,0	115	1,00
		O2	35,5	387	0,40	6,6	26	0,56	16,8	184	1,59
		O2/O3	8,0	249	0,26	12,1	30	0,66	64,2 (12,1)	1995 (30)	17,3 (0,26)
Лиственничник	Фермент. (n = 2)	O1	63,9	350	1,00	6,4	35	1,00	8,6	47	1,00
		O2	48,7	738	2,11	7,2	53	1,52	20,6	312	6,62
	Гумиф. (n = 3)	O1	69,9	868	1,00	5,4	46	1,00	6,3	91	1,00
		O2	28,7	331	0,38	18,1	60	1,29	34,7	400	4,38
		O2/O3	12,0	383	0,44	9,0	35	0,74	44,8 (9,0)	1427 (35)	15,62 (0,38)

Примечания. \* Приводится средневзвешенное содержание золы. В скобках — значение, рассчитанное без учёта фракции мелкий детрит + мелкозём в подгоризонте O2/O3.

нического вещества в системе сопряжённых подгоризонтов подстилки.

Скорость преобразования растительных остатков определяется, в числе прочего, долей активных фракций, которые являются источником наиболее легкоразлагаемых веществ, богатых азотом и содержащих наименьшее количество лигнина, а также обладают большой удельной поверхностью, доступной для колонизации организмами-деструкторами. Активные фракции можно рассматривать как субстрат, индуцирующий микробную деятельность, таким образом, в исследуемых хвойных БГЦ приобретает особое значение поступление листьев и семян, переносимых из лиственных древостоев, а также поступающих с растений подроста и подлеска.

**Заключение.** В лиственных насаждениях БС МГУ преобладают деструктивные подстилки. В ельнике и сосняке отмечаются низкие запасы подстилок по сравнению с естественными сосняками и ельниками. Также в ельнике относительно невелико участие ферментативных и гумифицированных подстилок в пространственной структуре, а в сосняке такие подстилки и вовсе отсутствуют. Только в лиственничнике ферментативные и гумифицированные подстилки занимают бóльшую часть площади поверхности почвы. Для гумифицированных подстилок ельника и лиственничника свойственна высокая доля мелкого органоминерального детрита в нижних горизонтах. Распределение грубых фракций в профиле подстилок может служить специфическим показателем для описания особенностей преобразования органического вещества.

#### 4.2.1.2. Запасы подстилок по оценке 2019 года.

##### Углерод и азот в подстилках

Образцы подстилок для анализа на углерод и азот были отобраны 9 сентября 2019 г. (табл. 26). Данные по этим образцам подстилок не были объединены с данными по предыдущим образцам (табл. 19—24), поскольку для этих образцов были выполнены разные наборы анализов, а также потому, что подстилка довольно изменчива в течение года, и обобщать данные по её запасам, полученные в разные сезоны, представляется некорректным.

**Запасы подстилок**, отобранных в сентябре 2019 г. (табл. 26), в целом соответствуют средним величинам запасов по результатам исследования от 2017 г. (табл. 19—24) за исключением ельника, в котором по данным 2019 года запасы подстилок оказались существенно ниже. Запасы подстилок 2017 и 2019 г. коррелируют слабо ( $R^2 = 0,58$ ,  $p = 0,08$ ,  $n = 6$ ), но без учёта ельника — существенно лучше ( $R^2 = 0,95$ ;  $p = 0,005$ ,  $n = 5$ ). В среднем запасы подстилок по оценке 2019 года на  $463 \text{ г/м}^2$  ниже, чем по оценке 2017 г. ( $p = 0,053$ ,  $n = 6$ ); а без учёта ельника — на  $303 \text{ г/м}^2$  ( $p = 0,053$ ,  $n = 5$ ).

В лиственничнике, ельнике и грабиннике подстилки дифференцированы по профилю в достаточной степени, чтобы исследовать их по отдельным подгоризонтам или слоям. В лиственничнике подстилки имеют полный набор подгоризонтов О1—О2—О3, которые плавно

Табл. 26. Строение и запасы подстилок; содержание и запасы углерода и азота в подстилках Ботанического сада МГУ (по оценке 2019 года).

Биогеоценозы	Подстилки	Подгоризонты или слои *	Запасы (2019) ± Δ, г/м <sup>2</sup>	Углерод в подстилках		Азот в подстилках		C/N
				%	г/м <sup>2</sup>	%	г/м <sup>2</sup>	
Лиственничник	Гумифицированные	<b>O1...O3 (n = 3)</b>	<b>1902 ± 707</b>	<b>44,5</b>	<b>847</b>	<b>1,23</b>	<b>23,3</b>	<b>36,3</b>
		O1/O2 (n = 1)	1652	44,3	731	1,43	23,6	31,0
		O2/O3 (n = 1)	537	44,4	239	1,29	6,9	34,3
Сосняк	Деструкт.	<b>O1 (n = 3)</b>	<b>1076 ± 729</b>	<b>46,3</b>	<b>498</b>	<b>0,86</b>	<b>9,2</b>	<b>54,0</b>
Ельник	Деструкт. (фермент.)	<b>O1...O2 (n = 3)</b>	<b>665 ± 768</b>	<b>44,9</b>	<b>298</b>	<b>1,33</b>	<b>8,8</b>	<b>33,8</b>
		O1 (n = 2)	413	45,8	191	1,29	5,18	36,8
		O1/O2 (n = 2)	426	43,5	185	1,42	6,02	30,8
Тополёвник	Деструкт.	<b>O1 (n = 3)</b>	<b>963 ± 1472</b>	<b>44,9</b>	<b>433</b>	<b>1,19</b>	<b>11,5</b>	<b>37,7</b>
Берёза+Клён	Деструкт.	<b>O1 (n = 3)</b>	<b>684 ± 623</b>	<b>44,2</b>	<b>302</b>	<b>1,08</b>	<b>7,4</b>	<b>40,9</b>
Грабинник	Деструктивные	<b>O1 (n = 3)</b>	<b>576 ± 21</b>	<b>44,2</b>	<b>255</b>	<b>1,24</b>	<b>7,1</b>	<b>35,7</b>
		O1-1 (n = 3)	393	44,7	176	1,18	4,61	39,1
		O1-2 (n = 3)	183	43,2	79	1,37	2,52	31,5

Примечание: \* Для некоторых точек, на которых подстилки были отобраны по подгоризонтам (ельник) или слоям (лиственничник, грабинник).

переходят один в другой; на одной из площадок выделен слой O1/O2, имеющий признаки ферментации в нижней части, и O2/O3, в котором ферментированный материал постепенно сменяется гумифицированным. В ельнике выделяется подгоризонт O1, слабо затронутый разложением, а также подгоризонт O1/O2, содержащий ферментированный материал, количество которого, впрочем, невелико. В нижних частях подстилки можно найти даже материал с признаками гумификации, но его количество незначительно, поэтому в целом можно сказать, что подстилки ельника занимают промежуточное положение между деструктивными и ферментативными. Вместе с тем, запасы подстилок в ельнике невелики и схожи по величине с запасами деструктивных подстилок лиственных БГЦ. В грабиннике подгоризонт O1 дифференцируется на два слоя, но степень преобразованности материала нижнего слоя недостаточна для того, чтобы считать его подгоризонтом ферментации. Подстилки сосняка, тополёвника и берёзово-кленовой полосы — деструктивные, и не имеют признаков вертикальной дифференциации профиля.

Значимых различий по **содержанию элементов** в подгоризонтах или слоях подстилок не выявлено. В целом, содержание углерода в подстилках хвойных насаждений ниже, чем в опаде (см. табл. 13), а в лиственных, за исключением грабинника, наоборот, выше. Содержание азота в подстилках лиственных насаждений и сосняка ниже, чем в опаде, а в подстилках лиственничника и ельника — выше. Несмотря на то, что хвойный и лиственный опад существенно различаются по содержанию углерода и азота (см. табл. 14; рис. 28), и отношение C/N в лиственном опаде выше, чем в хвойном, отношение C/N в подстилках не обнаруживает столь же явного

различия между лиственными и хвойными биогеоценозами, что, очевидно, является следствием сближения состава общего опада за счёт межбиогеоценозного обмена. Отношения C/N в опаде и в подстилках не коррелируют.

### 4.3. НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ГОРОДСКИХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

#### 4.3.1. КРУГОВОРОТ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА, УГЛЕРОДА И АЗОТА В БИОГЕОЦЕНОЗАХ БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Пользуясь данными о поступлении опада, полученными в ходе многолетних наблюдений (см. стр. 119), а также сведениями о запасах подстилок (табл. 19—24; 26), можно в общих чертах охарактеризовать интенсивность круговорота органического вещества в исследуемых БГЦ. Оценка интенсивности круговорота проводилась в двух вариантах: по данным о запасах подстилок от июня 2017 года (табл. 27), и по данным от сентября 2019 года (табл. 28), в градациях Л. Е. Родина и Н. И. Базилевич (1965, стр. 222), основанных на величине подстильно-опадного коэффициента (*ПЭК*), а также в градациях Л. А. Гришиной (1986, стр. 74), основанных на величине *интенсивности разложения* ( $I_d = 100/ПЭК$ ).

**Данные 2017 года**<sup>23</sup> (табл. 27) свидетельствуют, что наиболее высокая интенсивность круговорота органического вещества характерна для лиственных насаждений; наименее интенсивный круговорот выявлен в лиственничнике, где подстильно-опадный коэффициент в несколько раз выше. Ельник и сосняк занимают по этому параметру промежуточное положение. В целом, интенсивность круговорота тем ниже, чем более сложное строение имеют лесные подстилки: наименьшая — в БГЦ с преобладанием деструктивных подстилок, наибольшая — в БГЦ с преобладанием ферментативных и гумифицированных.

В сосняке и ельнике не наблюдается существенного снижения интенсивности разложения, и по этому параметру он оказывается ближе к лиственным биогеоценозам, чем к лиственничнику. Морфологическое описание подстилок сосняка действительно свидетельствует о том, что

---

<sup>23</sup> Основные результаты, положения и выводы данного исследования (2017 года) получены совместно с коллегами и опубликованы в совместной статье:

Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И. и др. Типология лесных подстилок некоторых типов насаждений ботанического сада МГУ имени М. В. Ломоносова (ленинские горы) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2019. — № 2. — С. 3—19 (личный вклад соискателя 40 %),

а также в тезисах конференций (Земсков, Богатырев, Варганов, 2018; Леонтьева и др., 2018) (личный вклад соискателя 70 и 40 % соотв.)

Табл. 27. Поступление опада, типы и запасы подстилок, параметры биологического круговорота в биогеоценозах Ботанического сада МГУ (по оценке 2017 года).

Биогеоценозы	Типы подстилок	Среднегодовое поступление опада, $г/м^2 \cdot год$	Запасы подстилок (2017) $г/м^2$	Подстильно-опадный коэфф. (ПОК)	Интенсивность разложения, $\% \cdot год^{-1}$	Тип круговорота (по Родину и Базилевич, 1965) <sup>3</sup>	Разложение, степень проявления процесса (по Гришиной, 1986) <sup>3</sup>	Скорость разложения нативных материалов <sup>4</sup> , $\% \cdot год^{-1}$
Лиственничник	Ферментативные ( $n = 2$ ); Гумифицированные ( $n = 3$ )	539	<b>2491</b> <sup>1</sup>	4,62	21,6	заторможенный	слабое	18,6
Сосняк	Деструктивные ( $n = 5$ )	657	<b>1580</b>	2,40	41,6		интенсивное	35,6
Ельник	Деструктивные ( $n = 4$ ); Гумифицированные ( $n = 1$ )	718	<b>1926</b> <sup>1</sup>	2,68	37,3		малоинтенсивное	29,7
Тополёвник	Деструктивные ( $n = 3$ ); Ферментативные ( $n = 1$ )	879	<b>1146</b> <sup>2</sup>	1,30	76,7	интенсивный	весьма интенсивное	22,4
Берёзово-кленовая полоса	Деструктивные ( $n = 5$ )	521	<b>652</b>	1,25	79,9			19,7
Грабинник	Деструктивные ( $n = 5$ )	589	<b>848</b>	1,44	69,4			33,5

Примечания. <sup>1</sup> Без учёта фракции «мелкий детрит + мелкозём» в подгоризонте О2/О3. <sup>2</sup> Без учёта предположительно антропогенного подгоризонта О2/О3. <sup>3</sup> См. также табл. 4 — Показатели интенсивности разложения. <sup>4</sup> Экспериментальная (табл. 37).

они маломощны и относятся к деструктивным. Это подтверждается также данными по разложению нативного материала: скорость разложения  $CP$  в сосняке составляет  $35,6 \text{ \%} \cdot \text{год}^{-1}$ , в то время как в лиственных БГЦ — от  $19,7 \text{ \%} \cdot \text{год}^{-1}$  в берёзово-кленовой полосе до  $33,5 \text{ \%} \cdot \text{год}^{-1}$  в грабиннике (см. далее в табл. 37). В лиственничнике этот параметр составляет  $18,6 \text{ \%} \cdot \text{год}^{-1}$ , что свидетельствует о наиболее медленном разложении подстилок в этом БГЦ по сравнению с прочими биогеоценозами БС МГУ.

Данные по запасам подстилки от 2019 года (табл. 28) позволяют получить дополнительные значения параметров биологического круговорота не только для общей массы детрита, но и для углерода и азота в его составе. По параметрам круговорота общей массы органического вещества (ПОК) данные за 2017 и 2019 годы отличаются по величине, но коррелируют ( $R^2 = 0,76$ ,  $p = 0,02$ ). В целом, по оценкам на сентябрь 2019 года круговорот во всех БГЦ кроме берёзово-кленовой полосы характеризуется как более интенсивный, чем по оценкам на июнь 2017 года (табл. 27), что можно отчасти объяснить разложением подстилок за летние месяцы.

Круговорот углерода в целом подчиняется круговороту общей массы органического вещества. Круговорот азота подчиняется ему в меньшей степени: в берёзово-кленовой полосе и в сосняке он оказывается ускоренным по сравнению с круговоротом органического вещества по общей массе и с круговоротом углерода — это свидетельствует, что в этих случаях азот в под-

Табл. 28. Параметры биологического круговорота в биогеоценозах Ботанического сада МГУ (по оценке 2019 года).

Биогеоценозы	Подстильно-опадный коэффициент*			Тип круговорота (по Родину и Базилевич, 1965)	Разложение, степень проявления процесса (по Гришиной, 1986)	Скорость разложения нативных материалов**, %·год <sup>-1</sup>
	общий	для углерода	для азота			
Лиственничник	3,53	3,48	4,60	Заторможенный	Слабое	18,6
Сосняк	1,64	1,61	1,32	Заторможенный	Весьма интенсивное	35,6
Ельник	0,93	0,89	1,04	Интенсивный	Очень интенсивное	29,7
Тополёвник	1,09	1,13	1,13	Интенсивный	Весьма интенсивное	22,4
Берёза+Клён	1,31	1,13	0,99	Интенсивный	Весьма интенсивное	19,7
Грабинник	0,98	1,13	1,22	Интенсивный	Очень интенсивное	33,5

Примечания. \* Рассчитан по среднегодовым величинам поступления опада. \*\* Экспериментальная (табл. 37). См. также табл. 4 — показатели интенсивности разложения опада.

стилках расходуется при разложении быстрее (в долях от общего его поступления за единицу времени), чем углерод.

Теоретически, скорость разложения, оценённая по соотношению подстилки и опада ( $I_d$ , %·год<sup>-1</sup>), должна соответствовать экспериментально определённой скорости разложения ( $CP$ , %·год<sup>-1</sup>), однако в нашем случае эти величины не коррелируют:  $R^2 = 0,01$ ,  $p = 0,88$  для данных 2017 г. (табл. 27),  $R^2 = 0,18$ ,  $p = 0,41$  для  $IP$  2019 г. (табл. 28). Это объясняется малым объёмом выборки, а также тем, что на практике скорость разложения неодинакова как у разных компонентов опада (для экспериментальных исследований использовали только активные фракции), так и на разных стадиях разложения. Кроме того, учёт опада и подстилок осложняется их пространственным варьированием, неравномерным поступлением грубых фракций, примесью мелкозёма в нижних подгоризонтах подстилок, что в совокупности может вызывать значительные расхождения.

**Заключение.** Наибольшая интенсивность круговорота, по наблюдениям 2017 года, характерна для берёзово-кленовой полосы, а по наблюдениям 2019 года — для ельника и грабинника. Наименее интенсивный круговорот в обоих случаях наблюдается в лиственничнике. Ельник и сосняк по скорости биологического круговорота занимают промежуточное положение между хвойными и лиственными БГЦ. Высокая интенсивность разложения подстилок в этих БГЦ объясняется интенсивным поступлением активных фракций опада лиственных деревьев, богатого азотом, переносимого из соседних древостоев.

#### 4.3.2. КРУГОВОРОТ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В БИОГЕОЦЕНОЗАХ ЛИЗИМЕТРОВ

Оценка скорости круговорота органического вещества выполнена в двух вариантах: (1) для поступления опада за год, предшествующий учёту подстилки, т. е. непосредственно для опада,

Табл. 29. Параметры биологического круговорота в биогеоценозах лизиметров почвенно-го стационара.

Биогеоценозы	№ лизиметра	Запасы подстилки * (2014), г/м <sup>2</sup>	То же — среднее по биогеоценозам, ± Δ	Годовое поступление опада (2013—2014), г/м <sup>2</sup> ·год	То же — среднее по биогеоценозам, ± Δ	ЛОК (для опада за 1 год 2013—2014)	То же — среднее по биогеоценозам, ± Δ	Среднегодовое поступление опада (2013—2019), г/м <sup>2</sup> ·год	То же — среднее по биогеоценозам, ± Δ	ЛОК (для среднегодового поступления опада)	То же — среднее по биогеоценозам, ± Δ
Ельник	31	187		99		<b>1,90</b>		169		<b>1,10</b>	
	32	250	226	181	209	<b>1,03</b>	<b>1,21</b>	410	332	<b>0,61</b>	<b>0,76</b>
	33	281	± 75	312	± 145	<b>0,90</b>	± 0,7	305	± 197	<b>0,92</b>	± 0,5
	34	186		245		<b>1,02</b>		445		<b>0,42</b>	
Смешанный лес	35	203		368		<b>0,75</b>		391		<b>0,52</b>	
	36	211	314	328	379	<b>0,82</b>	<b>0,83</b>	500	436	<b>0,42</b>	<b>0,55</b>
	37	202	± 74	403	± 63	<b>0,90</b>	± 0,1	430	± 73	<b>0,47</b>	± 0,3
	38	343		416		<b>0,82</b>		424		<b>0,81</b>	
Широколиственный лес	39	426		435		<b>1,02</b>		498		<b>0,86</b>	
	40	735	597	559	603	<b>1,10</b>	<b>1,00</b>	577	633	<b>1,28</b>	<b>0,95</b>
	41	594	± 191	716	± 211	<b>0,83</b>	± 0,2	715	± 185	<b>0,83</b>	± 0,4
	42	614		703		<b>1,05</b>		744		<b>0,83</b>	

\* Учитывались преимущественно активные фракции (листья, хвоя, семена и т. п.).

сформировавшего её в наибольшей степени, и (2) для среднегодового поступления опада, как для более точно рассчитанной величины (табл. 29). Оценка биологического круговорота на лизиметрах существенно осложняется тем, что поступление опада на каждом из них может значительно варьировать год от года (см. табл. 11), в зависимости от направления и силы преобладающих ветров в периоды наиболее интенсивного поступления опада, продолжительность которых составляет около одного—двух месяцев. Как уже было показано выше, одноимённые БГЦ лизиметров значительно и закономерно различаются по поступлению опада и по запасам детрита на поверхности почвы, в зависимости от взаимного расположения и особенностей переноса опада. Это и объясняет столь высокое варьирование исследуемых величин в пределах каждой группы одноимённых БГЦ.

Несмотря на это, имеется явная тенденция к повышению скорости круговорота в смешанном лесу по сравнению с ельником и широколиственным лесом. Высокую скорость разложения подстилок смешанного леса можно объяснить благоприятным взаимодействием опада хвойных и лиственных деревьев, также, как и в случае с ельником и сосняком БС МГУ.

При любом варианте расчёта круговорот во всех БГЦ лизиметров оценивается как интенсивный (в градациях Родина и Базилевич, 1965; см. табл. 4).

#### 4.4. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ПО ОПАДУ И ПОДСТИЛКАМ С ЛИТЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

В табл. 30 приводятся литературные данные о поступлении опада, о поступлении азота и о запасах подстилок в относительно схожих БГЦ, расположенных в таёжной зоне и зоне широколиственных лесов. Отметим, что сравнение БГЦ в любом случае будет весьма условным, поскольку они отличаются по возрасту и географическому положению, по плотности древостоев, которая в случае БС МГУ отчасти определена плотностью посадки, по составу и густоте подроста и подлеска, которые в БС МГУ регулируются периодическими прочистками. Поэтому, при отсутствии полных аналогов, которыми могли бы быть только зональные леса в пределах одной природной зоны, или однотипные посадки в схожих условиях, обозначим лишь самые явные различия.

В **сосняке Ботанического сада** поступление опада не демонстрирует явных отличий от литературных данных; доля активных фракций также находится на обычном уровне. В опаде довольно велико содержание азота, а поступление азота существенно превышает его поступление в естественных сосняках. Обращают на себя внимание низкие запасы подстилок в сосняке БС МГУ и нетипично высокая скорость круговорота (низкие величины *ПОК*).

Поступление опада в **ельнике БС МГУ** ( $718 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$ ) существенно выше, чем в большинстве ельников, описанных по литературным данным ( $188\text{—}710 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$ ); доля активных фракций находится на обычном уровне, а доля осеннего опада — на относительно высоком, уступая лишь сложному *ельнику осиново-берёзовому* (Родин, Базилевич, 1965), что может являться следствием поступления опада лиственных деревьев. Содержание азота находится на верхнем пределе диапазона, характерного для ельников, описанных в литературе, а поступление азота превышает максимальное поступление из приведённых для естественных ельников. В то же время, несмотря на высокое поступление опада, запасы подстилок здесь весьма низкие, что определяет высокую скорость круговорота.

В **лиственных насаждениях БС МГУ** нельзя констатировать явного отличия по поступлению опада и по содержанию и поступлению азота. Так, в **берёзово-кленовой полосе** содержание и поступление азота ниже, чем в березняке в Московской обл. (Родин, Базилевич, 1965), но, в то же время, запасы подстилок существенно выше; поступление опада ниже, чем в большинстве лиственных биогеоценозов, но доля активных фракций довольно велика. **Грабинник** БС МГУ не демонстрирует существенных отличий по поступлению опада; в **тополёвнике** поступление опада сравнительно высокое, впрочем, полных аналогов этих БГЦ в схожих климатических условиях найти не удалось.

В ельнике на лизиметрах 31—34 поступление опада ниже, чем в ельнике БС МГУ, однако не выходит за пределы диапазона значений, приведённых для ельников по литературным данным; поступление активных фракций и доля осеннего опада от общего немного превышены, что может иметь причиной перенос листового опада из соседних древостоев.

В смешанном лесу на лизиметрах 35—38 поступление опада укладывается в диапазон значений, приводимых для сложных ельников, но уступает поступлению опада в большинстве лиственных лесов.

Поступление опада в широколиственном лесу на лизиметрах 39—42, как уже отмечалось, выше, чем в берёзово-кленовой полосе БС МГУ, однако, также не выделяется на фоне величин, приводимых для лиственных лесов. Следует отметить, что поскольку имеет место интенсивный некомпенсированный вынос опада из биогеоценозов лизиметров, его продукция, по всей видимости, существенно выше, чем поступление.

В большинстве исследуемых биогеоценозов отмечается относительно высокая доля активных фракций, что, впрочем, может быть частично обусловлено особенностями методики отбора — большинство авторов в этих и других работах используют ОУ большей площади, чем те, что были установлены на наших объектах (см. с. 83).

Табл. 30 (окончание на след. стр.). Основные параметры опада, подстилок и биологического круговорота в исследуемых городских биогеоценозах в сравнении с естественными биогеоценозами в схожих климатических условиях.

Биогеоценозы	Возраст, годы	Общее поступление опада, г/м <sup>2</sup>	Активн. фракции <sup>1</sup> , % от общ. пост.	Осеннее поступление опада <sup>2</sup> , г/м <sup>2</sup>	То же, % от общего поступления	Содержание азота в опаде <sup>3</sup> , %	Поступление азота с опадом, г/м <sup>2</sup>	Запасы подстилок <sup>4</sup> , г/м <sup>2</sup>	Подстильно-опадный коэф-т	Место проведения исследований	Годы проведения исследований	Источник	В источнике
Лиственничник	64—70 <sup>5</sup>	<b>539</b>	86	<b>216</b>	40	0,94	<b>5,1</b>	<b>2491 1902</b>	3,5—4,6	Ботанический сад МГУ	2016—2020	(Наши данные)	Табл. 12, 13, 26, 27
<b>Сосняки</b>													
Сосняк	50—80	<b>469</b>	69	—	—	0,77	<b>3,6</b>	<b>3700 — 4600</b>	7,9—9,8	Воронежский гос. заповедник	1955—1956	Ремезов, 1961	С. 19, 43, 44, 45
Сосняк папоротниково-кисличный	—	<b>848</b>	49	—	—	—	—	—	—	(Ярославская обл.)	1961—1962	Смирнов, 1973	С. 170—173
Сосняк-брусничник	71	<b>470</b>	45	—	—	0,34	<b>1,6</b>	<b>4480</b>	9,5	Мордовск. заповедник	—	Родин, Базилевич, 1965	Табл. 9
Сосняк кустарничково-сфагн.	120	<b>250</b>	72	—	—	0,8	<b>2</b>	—	—	Вологодская обл.	—		
Хреновской бор	пл. 12	—	—	—	—	—	—	<b>2061</b>	—	Воронежская обл.	2017	(Наши данные)	Табл. 18
	пл. 13	—	—	—	—	—	—	<b>2231</b>	—				
	пл. 14	—	—	—	—	—	—	<b>1982</b>	—				
Сосняк	64—70 <sup>5</sup>	<b>657</b>	61	<b>177</b>	27	1,06	<b>7,0</b>	<b>1580 1076</b>	1,6—2,4	Ботанический сад МГУ	2016—2020	(Наши данные)	Табл. 12, 13, 26, 27

Биогеоценозы	Возраст, годы	Общее поступление опада, г/м <sup>2</sup>	Активн. фракции <sup>1</sup> , % от общ. пост.	Осеннее поступление опада <sup>2</sup> , г/м <sup>2</sup>	То же, % от общего поступления	Содержание азота в опаде <sup>3</sup> , %	Поступление азота с опадом, г/м <sup>2</sup>	Запасы подстилок <sup>4</sup> , г/м <sup>2</sup>	Подстильно-опадный коэф-т	Место проведения исследований	Годы проведения исследований	Источник	В источнике
<b>Ельники</b>													
Ельники-зеленомошники	38	<b>202</b>	63	<b>60</b>	30	—	—	—	—	(Европейская часть СССР)	1948—1949	Ремезов и др., 1959	С. 70
	72	<b>191</b>	84	<b>58</b>	30	—	—	—	—				
	93	<b>188</b>	75	<b>55</b>	29	—	—	—	—				
Ельник сложный	83	<b>313</b>	82	<b>79</b>	25	—	—	—	—		1946—1947	С. 137	
	115	<b>222</b>	75	<b>26</b>	12	—	—	—	—				
Ельник осиново-берёзовый	55	<b>321</b>	88	<b>204</b>	63	—	—	—	—		Новгородская обл.	1960—1962	С. 163
Ельник-липняк	51	<b>339</b>	87	—	—	—	—	—	—				
Ельник ручейниковый	—	<b>315</b>	76	<b>44</b>	14	—	—	—	—	Ярославская обл.	1962—1963	Смирнов, 1975	С. 168
Ельник-кисличник	75	<b>288</b>	71	—	—	—	—	—	—	М.: Красная Пахра	1966—1967	С. 219	
Ельник травяно-зеленомошный	130	<b>410</b>	48	—	—	1,1	<b>4,3</b>	<b>6900</b>	16,8	Вологодская обл.	—	Родин, Базилевич, 1965	Табл. 9
Ельник-черничник	110	<b>490</b>	65	—	—	1,3	<b>6,4</b>	<b>5100</b>	10,4	Великолукская обл.	—		
Ельник-зеленомошник	72	<b>390</b>	35	—	—	0,5	<b>2</b>	—	—				
Ельник сложный	83	<b>580</b>	48	—	—	0,4	<b>4,8</b>	—	—				
Ельник осиново-берёзовый	45—55	<b>710</b>	53	—	—	1,1	<b>7,9</b>	—	—	Вологодская обл.	—		
Ельник сфагново-широкотравный	70—200	<b>460</b>	59	—	—	0,78	<b>3,6</b>	—	—				
Ельник-кисличник (пл. 19)	—	—	—	—	—	—	—	<b>2555</b>	—	Московская обл.	2017	(Наши данные)	Табл. 18
Ельник	64—70 <sup>5</sup>	<b>718</b>	78	<b>240</b>	33	1,18	<b>8,5</b>	<b>1926</b> <b>665</b>	0,9 2,7	Ботанический сад МГУ	2016—2020	(Наши данные)	Табл. 12, 13, 26, 27
Ельник	56 <sup>5</sup>	<b>332</b>	90	<b>166</b>	50	—	—	226 <sup>7</sup>	0,7	Лизиметры МГУ	2013—2020	(Наши данные)	Табл. 11
Смешан. лес (ель, дуб, клён, берёза)		<b>436</b>	89	<b>278</b>	64	—	—	239 <sup>7</sup>	0,5				
<b>Лиственные леса</b>													
Дубняк осоково-снытьевый	93—104	<b>436</b>	—	—	—	1,95	<b>8,5</b> <b>4,4</b> <sup>6</sup>	<b>970</b> — <b>1420</b>	2,2— 3,3	Воронежск. гос. запов.	1948—1958	Ремезов, 1961	С. 15, 19, 20
Березняк вейнично-щучковый	—	<b>335</b>	76	—	—	—	—	—	—	(Ярославская обл.)	1962	Смирнов, 1974	С. 178
Березняк травный	40	<b>620</b>	60	—	—	1,3	<b>8,1</b>	<b>338</b>	0,5	Моск. обл.	—	Родин, Базилевич, 1965	Табл. 32
Осинник	25	<b>620</b>	55	—	—	1	<b>6,2</b>	—	—	Воронежская обл.	—		
	50	<b>1330</b>	36	—	—	0,6	<b>8</b>	—	—				
Дубрава	12	<b>540</b>	61	—	—	0,8	<b>4,4</b>	—	—				
	48	<b>550</b>	65	—	—	0,9	<b>4,9</b>	<b>97</b>	0,2				
	43	<b>690</b>	58	—	—	1	<b>7,2</b>	—	—				
Липняк осоково-снытьевый	220	<b>610</b>	63	—	—	1	<b>6,1</b>	—	—	Мордовская АССР	—		
	40	<b>530</b>	55	—	—	1,2	<b>6,6</b>	—	—				
	74	<b>580</b>	78	—	—	1,6	<b>9,4</b>	—	—		—		

Биогеоценозы		Возраст, годы	Общее поступление опада, г/м <sup>2</sup>	Активн. фракции <sup>1</sup> , % от общ. пост.	Осеннее поступление опада <sup>2</sup> , г/м <sup>2</sup>	То же, % от общего поступления	Содержание азота в опаде <sup>3</sup> , %	Поступление азота с опадом, г/м <sup>2</sup>	Запасы подстилок <sup>4</sup> , г/м <sup>2</sup>	Подстильно-опадный коэф-т	Место проведения исследований	Годы проведения исследований	Источник	В источнике
Листв. лес	пл. 21	—	—	—	—	—	—	—	<b>557</b>	—	Моск. обл.	2017	(Наши данные)	Табл. 18
Широколиственные леса	пл. 1	—	—	—	—	—	—	—	<b>457</b>	—	Тульская обл.			
	пл. 3	—	—	—	—	—	—	—	<b>598</b>	—	Липецкая обл.			
	пл. 4	—	—	—	—	—	—	—	<b>633</b>	—				
Берёзово-кленовая полоса	64—70 <sup>5</sup>		<b>521</b>	86	<b>310</b>	60	1,12	<b>5,8</b>	<b>625</b> <b>684</b>	1,3	Ботанический сад МГУ	2016—2020	(Наши данные)	Табл. 12, 13, 26, 27
Грабинник			<b>589</b>	92	<b>271</b>	46	1,27	<b>7,5</b>	<b>848</b> <b>576</b>	1,0 1,4				
Тополёвник			<b>879</b>	72	<b>389</b>	44	1,29	<b>10</b>	<b>1146</b> <b>963</b>	1,1 2,0				
Смешан. лес (ель, дуб, клён, берёза)	56 <sup>5</sup>		<b>436</b>	89	<b>278</b>	64	—	—	239 <sup>7</sup>	0,5	Лизиметры МГУ	2013—2020	(Наши данные)	Табл. 11
Широколиственный лес (дуб, клён, берёза)			<b>633</b>	89	<b>504</b>	80	—	—	592 <sup>7</sup>	0,9		2013—2020		

Примечания. <sup>1</sup> Активные фракции — листья, хвоя, семена, травы и т. п.; из (Родин, Базилевич, 1965) приводятся значения для «зелёных частей»; <sup>2</sup> Периоды накопления опада у цитируемых авторов могут не совпадать с нашими. <sup>3</sup> Для биогеоценозов БС МГУ — средневзвешенное содержание азота в фракциях опада (табл. 13). <sup>4</sup> Для биогеоценозов БС МГУ: первое значение — по данным 2017 года (табл. 27), второе — по данным 2019 года (табл. 26). <sup>5</sup> С учётом примерного возраста саженцев (~ 3 года), разницы годов посадки (в БС МГУ; см. с. 61) и годов наблюдений. <sup>6</sup> **8,5** — общее, 4,4 — только с листвой. <sup>7</sup> Могут быть занижены, т. к. учитывали преимущественно активные фракции.

Таким образом, наиболее важные особенности биогеоценозов БС МГУ и лизиметров состоят в следующем. (1) В ельнике и сосняке БС МГУ наблюдается повышенное поступление опада и сравнительно низкие запасы подстилок, и, соответственно, нетипично высокая интенсивность круговорота органического вещества, а также высокое содержание азота в опаде и его поступление с опадом. (2) В лиственных биогеоценозах БС МГУ не наблюдается критических отличий по этим параметрам от биогеоценозов, описанных по литературным данным, таким образом можно заключить, что лиственные БГЦ функционируют в нормальном режиме. (3) В БГЦ лизиметров поступление опада довольно высокое, и соответствует естественным биогеоценозам, несмотря на интенсивный вынос опада.

## 4.5. ДИНАМИКА РАЗЛОЖЕНИЯ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ДЕТРИТА<sup>24</sup>

К настоящему времени получены данные по динамике разложения в биогеоценозах БС МГУ и УОПЕЦ «Чашниково», а также в БГЦ по маршруту зональной практики, за период до 3,5 лет, и позволяющие сделать выводы не только об особенностях разложения на исследуемых объектах, но и о самой методике исследований.

Ожидалось, что, в общем случае, изменение массы образцов будет в целом подчиняться экспоненциальному закону. Однако на практике часто оказывается, что во многих случаях линейная функция лучше аппроксимирует динамику разложения материалов. По этой причине далее будут приводиться обобщающие параметры разложения, рассчитанные как из уравнений экспоненциальных функций ( $k$ ,  $T^{1/2}_{(эксп.)}$ ), так и из уравнений линейных функций ( $k$ ,  $T^{1/2}_{(лин.)}$ ). Диаграммы разложения стандартизированных образцов древесины, целлюлозы, чая и нативных материалов (активных фракций местных подстилок), содержащие все полученные значения  $OM_T$ , а также параметры аппроксимации, представлены в Приложении.

Для выявления зависимости параметров разложения материалов стандартизированных образцов от климатических параметров в зональном ряду (см. табл. 5) были выбраны только леса относительно дренированных ландшафтов, а именно: площадки 18—21 в Чашниково: 1 и 3 в Тульской обл.; 4 и 6 в Липецкой обл.; 10, 12 и 14 в Воронежской обл. (табл. 31). Травяные сообщества, залежи и лесополосы не учитываются. Также при исследовании зональных зависимостей не учитываются биогеоценозы Ботанического сада МГУ, которые рассматриваются как специфические объекты урбанизированных территорий, на которых действуют специфические факторы разложения, имеющие отношение к влиянию городской среды.

В выборку лесов относительно дренированных ландшафтов включена лесополоса в Липецкой обл. (пл. 6), на том основании, что по характеру травяно-кустарничкового яруса, по степени затенения поверхности почвы и по характеристикам лесной подстилки она схожа скорее с лесами той же местности, чем с лесополосами. То же касается опытного участка «Лесополоса» в заказнике Каменная степь.

Следует также отметить, что остальные лесополосы (пл. 2, 5, 15) рассматриваются как объекты с пониженной обеспеченностью влагой по сравнению с лесами. Одной из функций по-

---

<sup>24</sup> Некоторые результаты, выводы и положения данных исследований (полученные и обработанные к моменту подготовки соответствующих публикаций) получены совместно с коллегами и опубликованы в виде тезисов конференций (Земсков и др., 2019; Земсков, Лукин, 2020). Личный вклад соискателя 80 %.

лезачитных лесополос является удержание влаги в почве, но вследствие повышенного прогрева поверхности солнцем и лучшей продуваемости, накопленной в почве влаги и затенения кронами деревьев недостаточно для того, чтобы создать на уровне подстилки микроклимат, наблюдаемый в лесах, поэтому на уровне подстилки складываются в целом более тёплые и сухие условия, чем под полноценной лесной растительностью.

#### 4.5.1. ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

##### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

К настоящему времени получены данные по разложению древесины за период до 3,5 лет; обобщающие параметры для каждой опытной площадки, рассчитанные по результатам аппроксимации экспоненциальной и линейной функциями, приведены в табл. 31.

Табл. 31 (окончание на след. стр.). Обобщающие параметры разложения древесины, рассчитанные на основании экспоненциальной и линейной аппроксимации.

Обозначения:  $R^2$  — коэффициент детерминации;  $T^{1/2}$  — период полуразложения;  $k$  — константа разложения (второй строкой — доверительные границы, см. с. 98);  $CP$  — скорость разложения;  $n$  — число исследованных образцов (значение  $OM = 100\%$  при  $T = 0$  не учитывается); «оп. уч.» — опытный участок (в заказнике Каменная степь).

Географич. положение	№ площадки	Название биогеоценоза и тип почвы	Экспоненциальн.			Линейная			$n$
			$R^2$	$T^{1/2}$ , годы	$k$ , год <sup>-1</sup> (дов. гр.)	$R^2$ ( $p$ )	$T^{1/2}$ , годы	$CP \pm \Delta$ , % год <sup>-1</sup>	
Зона смешанных (широколиственно-еловых) лесов — Московская обл., Чашниково	18	Переувлажн. смешан. лес на дерновой грунтово-глеевой п.	0,79	2,93	0,24 0,19...0,29	0,88	2,92	17,2 ± 2,2	35
	19	Ельник-кисличник на дерново-подзолистой почве	0,45	1,40	0,49 0,20...0,92	0,77	1,88	26,6 ± 5,6	28
	20	Смешанный лес на болотно-подзолистой почве	0,83	1,68	0,41 0,32...0,52	0,89	1,99	25,1 ± 3,2	32
	21	Лиственный лес на дерново-подзолистой почве	0,53	0,66	1,05 0,38...4,36	0,76	1,44	34,6 ± 6,6	36
	22	Залежь берёзовая на среднесмытой почве	0,79	3,04	0,23 0,14...0,33	0,84	2,90	17,3 ± 4,7	12
	23	Залежь берёзовая на слабосмытой почве	0,57	2,29	0,30 0,10...0,55	0,76	2,56	19,5 ± 7,0	12
Зона широколиственных лесов — Тульская обл.	1	Широколиственный лес на серой лесной глеевой почве	0,70	3,73	0,19 0,10...0,28	0,76	3,57	14,0 ± 4,7	13
	2	Лесополоса берёзовая на серой лесной почве	0,86	8,84	0,08 0,06...0,10	0,86	7,01	7,1 ± 1,9	11
	3	Широколиственный лес на серой лесной почве	0,96	1,80	0,39 0,28...0,51	0,98	1,83	27,3 ± 3,6	6

Географич. положение	№ пло-щадки	Название биогеоценоза и тип почвы	Экспоненциальн.			Линейная			n	
			R <sup>2</sup>	T <sup>1/2</sup> , годы	k, год <sup>-1</sup> (дов. гр.)	R <sup>2</sup> (p)	T <sup>1/2</sup> , годы	CP ± Δ, %год <sup>-1</sup>		
Зона лесостепей — Липецкая обл.	4	Широколиственный лес на чернозёме типичном	0,94	6,90	0,10 0,08...0,12	0,95	5,69	8,8 ± 1,2	12	
	5	Лесополоса осиновая на чернозёме типичном	0,60	18,12	0,04 0,02...0,06	0,62	14,1	3,5 ± 1,8	12	
	6	Лесополоса липово-кленовая на чернозёме типичном	0,65	5,85	0,12 0,05...0,19	0,71	5,32	9,4 ± 4,2	10	
	7	Залежь на чернозёме типичном	0,64	41,3	0,02 0,01...0,02	0,64	30,9	1,6 ± 0,7	13	
Южная граница зоны лесостепей — Воронежская обл.	Солонцов. комплекс	8	Осиновый лес на солоди чернозёмной	0,90	2,62	0,26 0,20...0,33	0,92	2,58	19,4 ± 3,2	14
		9	Луг разнотравно-злаковый на лугово-чернозёмн. почве	0,72	3,27	0,21 0,09...0,36	0,81	3,07	16,3 ± 6,4	8
	Хреновской бор	12	Смешанный лес в понижении на песчаной почве	0,95	9,69	0,07 0,06...0,08	0,96	7,62	6,6 ± 0,9	11
		13	Редколесье на возвышении на песчаной почве	0,87	9,61	0,07 0,05...0,09	0,89	7,75	6,5 ± 1,3	13
		14	Смешанный лес на возвышении на песчаной почве	0,72	2,77	0,25 0,13...0,38	0,88	3,01	16,6 ± 3,8	12
	Каменная степь	10	оп. уч. Лесополоса (широколист. лес) на чернозёме обыкновенном	0,95	7,86	0,09 0,05...0,13	0,95	5,94	8,4 ± 3,5	3
11		оп. уч. Некосимая степь на чернозёме обыкновенном	0,88	12,32	0,06 0,04...0,07	0,89	9,34	5,4 ± 1,5	8	
Зона сухих степей — Волгоградская обл.	15	Лесополоса дубовая на каштановой почве	0,85	6,79	0,10 0,08...0,13	0,86	5,65	8,9 ± 1,8	18	
	16	Степь типчаково-полынная на каштан. почве	0,77	29,9	0,02 0,01...0,04	0,78	22,5	2,2 ± 1,2	6	
Городские территории — Москва, Ботанический сад	Хвойные	27	Лиственничник	0,89	4,71	0,15 0,12...0,17	0,92	3,95	12,6 ± 1,6	26
		29	Сосняк	0,92	5,02	0,14 0,12...0,16	0,94	4,30	11,6 ± 1,2	26
		31	Ельник	0,86	4,32	0,16 0,13...0,19	0,89	3,80	13,2 ± 1,9	26
	Лиственные	26	Тополёвник	0,91	5,18	0,13 0,11...0,15	0,92	4,39	11,4 ± 1,4	25
		28	Берёза+Клён	0,73	4,42	0,16 0,11...0,20	0,79	3,86	12,9 ± 2,8	25
		30	Грабинник	0,77	5,72	0,12 0,09...0,15	0,86	5,03	9,9 ± 1,6	26

Примечание: уровень значимости  $p < 0,01$  для всех  $R^2$ ;  $p \leq 0,04$  для всех  $k$  и  $CP$  — все значения  $R^2$ ,  $k$  и  $CP$  значимы при  $\alpha = 0,05$  (см. с. 98).

Параметры корреляции констант разложения древесины с климатическими параметрами (см. табл. 5), с географической широтой (см. гл. Объекты исследования) и запасами подстилок (табл. 18), приведены в табл. 32. Коэффициенты детерминации для линейной аппроксимации не превышают 0,37, для экспоненциальной — 0,47. Лучше всего константы разложения древесины коррелируют с суммарной солнечной радиацией, с температурой воздуха и температурой поверхности почвы, с относительной влажностью воздуха, с годовой суммой осадков (в т. ч. жидких осадков), а также непосредственно с географической широтой. Как и ожидалось, корреля-

Табл. 32. Корреляция констант разложения древесины в лесах относительно дренированных ландшафтов ( $k$ , год<sup>-1</sup>) с климатическими параметрами в зональном ряду.

Параметры	Линейная		Экспоненциальная		Направленность корреляции	n
	R <sup>2</sup>	p(R <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>	p(R <sup>2</sup> )		
Географическая широта, °	<b>0,36</b>	0,04	<b>0,43</b>	0,02	Положительная	12
Суммарная солн. радиация, МДж/м <sup>2</sup> ·год	<b>0,32</b>	0,09	<b>0,47</b>	0,03	Отрицательная	10
Радиацион. баланс деят. поверх., МДж/м <sup>2</sup> ·год	<b>0,08</b>	0,42	<b>0,04</b>	0,60	Отрицательная	10
Температура воздуха среднегодовая, °С	<b>0,37</b>	0,04	<b>0,43</b>	0,02	Отрицательная	12
Температура поверхн. почвы среднегодовая, °С	<b>0,35</b>	0,04	<b>0,47</b>	0,01	Отрицательная	12
Отн. влажность воздуха среднегодовая, %	<b>0,34</b>	0,05	<b>0,38</b>	0,03	Положительная	12
Число дней с отн. влажн. воздуха ≤ 30 %	<b>0,05</b>	0,60	<b>0,05</b>	0,58	Отрицательная	8
Число дней с отн. влажн. воздуха ≥ 80 %	<b>0,00</b>	0,88	<b>0,00</b>	0,93	Отрицательная	8
Годовая сумма осадков, мм	<b>0,27</b>	0,09	<b>0,35</b>	0,04	Положительная	12
Из них жидких осадков, мм	<b>0,34</b>	0,05	<b>0,43</b>	0,02	Положительная	12
Число дней без осадков	<b>0,11</b>	0,28	<b>0,08</b>	0,36	Отрицательная	12
Запасы подстилок, г/м <sup>2</sup> (табл. 18)	<b>0,01</b>	0,81	<b>0,00</b>	0,88	Отрицательная	12

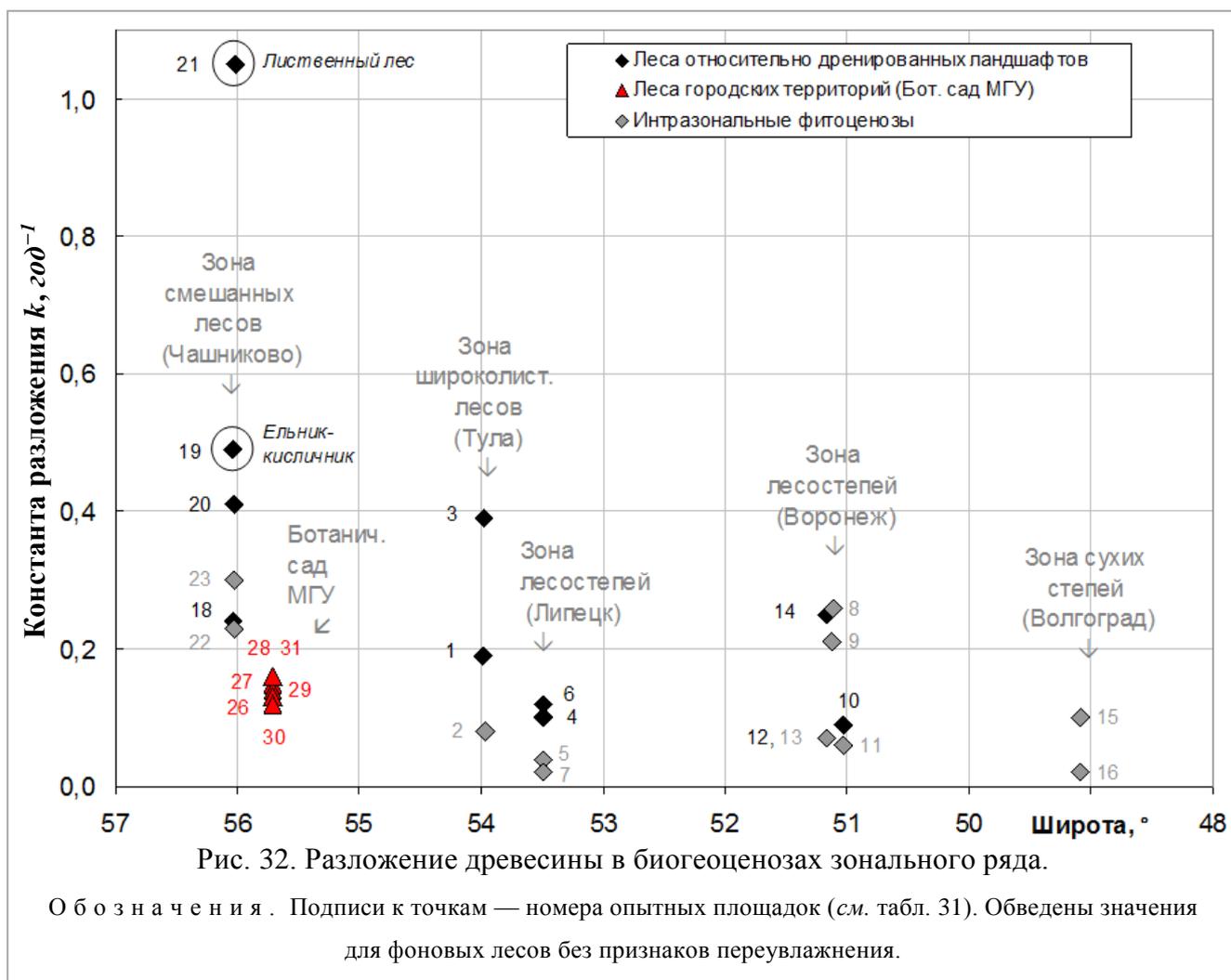
Примечания. Для данных по площадкам 18—21, 1, 3, 4, 6, 10, 12 и 14 — леса относительно дренированных ландшафтов. Интразональные БГЦ, а также урбанизированные БГЦ Ботанического сада, не учитываются.

ция констант разложения древесины с параметрами температуры и освещённости всегда отрицательная (чем выше температура и освещённость, тем медленнее идёт разложение), а с параметрами увлажнения — всегда положительная (чем выше обеспеченность влагой, тем разложение идёт быстрее), даже при самых низких значениях  $R^2$ . Это даёт основание заключить, что разложение древесины в значительной степени контролируется температурой и влажностью.

Число площадок в схожих интразональных сообществах недостаточно для того, чтобы аналогичным образом выявить корреляции с климатическими параметрами, однако в большинстве случаев оказывается, что на участках с повышенной (по сравнению с лесами той же местности) вентиляцией и инсоляцией разложение древесины идёт медленнее, что соответствует зависимостям, выявленным в зональном ряду (табл. 32).

Среди БГЦ **Чашниково (зона распространения смешанных широколиственно-еловых лесов)** наиболее быстрое разложение наблюдается в лиственном лесу в автоморфном ландшафте (пл. 21), более медленное — в ельнике-кисличнике с мощной подстилкой (пл. 19) и в смешанном лесу на болотно-подзолистой почве (пл. 20) (рис. 32). Наиболее замедленное разложение наблюдается в смешанном лесу с признаками переувлажнения (пл. 18), где  $k$  значимо ниже, чем в лиственном лесу (пл. 21), и на участках залежи (пл. 22, 23), характеризующихся лучшей вентиляцией и инсоляцией поверхности почвы по сравнению с лесами.

В **Тульской обл. (зона широколиственных лесов)** наиболее интенсивное разложение древесины отмечено в зональном широколиственном лесу на серой лесной почве (пл. 3). В схо-



жем лесу на серой лесной *глеевой* почве (пл. 1)  $k$  значительно ниже, чем на пл. 3, а в берёзовой лесополосе (пл. 2) — значительно ниже, чем в лесах.

Аналогично, в **Липецкой области (зона лесостепей)** древесина быстрее разлагается в широколиственном лесу (пл. 6) и в лесополосе, которая по характеру растительности и подстилки соответствует широколиственному лесу (пл. 4). В осиновой лесополосе (пл. 5) древесина разлагается медленнее, чем в лесу, а на залежи (пл. 7) — медленнее, чем на всех остальных объектах в этой группе (различия значимы).

Среди объектов в Хреновском бору в **Воронежской области (зона лесостепей)** наиболее интенсивное разложение древесины наблюдается под смешанным лесом на локальном повышении (пл. 14). В хорошо прогреваемом редколесье (пл. 13) и в относительно переувлажнённом понижении (пл. 12) древесина разлагается медленнее (различие значимо). В некосимой степи (пл. 11) в заказнике Каменная степь разложение древесины идёт медленнее, чем в широколиственном лесу (в т. н. лесополосе, пл. 10). В осиновом лесу на чернозёмной солоди (пл. 8) и на луго на лугово-чернозёмной почве (пл. 9) различия в скорости разложения древесины невелики, и разложение идёт в целом быстрее, чем на остальных площадках в данной природной зоне.

В Волгоградской обл. (зона сухих степей) разложение древесины на участке степи (пл. 16) существенно замедленно по сравнению с лесополосой (пл. 15) (различие значимо).

Значения обобщающих параметров разложения древесины в биогеоценозах урбанизированных территорий Ботанического сада МГУ не демонстрируют значимых различий (рис. 32, табл. 31), несмотря на принципиальные различия флористического состава ФЦ и в строения подстилок. Интересно, что для БС МГУ свойственно существенно меньшее варьирование значений остатка массы образцов древесины ( $OM_T$ ) при каждом наблюдении (рис. 33). Кроме того,

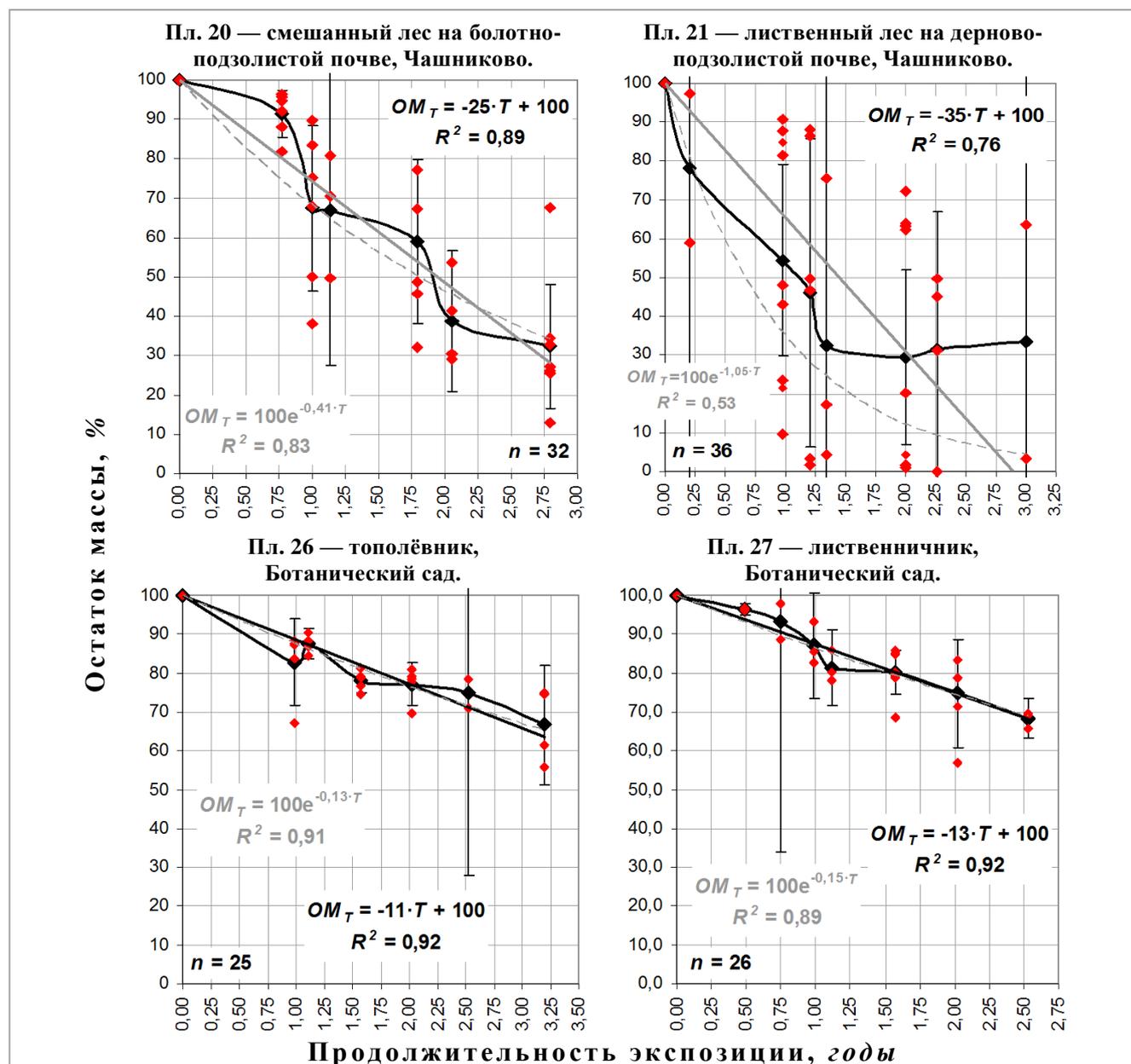


Рис. 33. Типичные кривые разложения древесины в биогеоценозах Чашниково и в биогеоценозах Ботанического сада.

О б о з н а ч е н и я . Точки, соединённые кривой — средние значения остатка массы ( $\overline{OM_T}$ ); отдельные точки — значения  $OM_T$  для каждого образца. Погрешность — доверительный интервал.  $T_0$  — 02.10.16 для пл. 20; 16.07.2016 для пл. 21; 29.09.2016 для пл. 26 и 27.

в биогеоценозах БС МГУ древесина разлагается заметно медленнее, чем в Чашниково. Особенно существенная (статистически значимая) разница наблюдается по сравнению с фоновыми лесами, не имеющими признаков переувлажнения (пл. 21 — лиственный лес и пл. 18 — ельник-кисличник). По величине констант разложения древесины (0,12—0,16, см. табл. 31) биогеоценозы БС МГУ ближе всего к широколиственным лесам в Тульской (пл. 1 —  $k = 0,19$ ) и в Липецкой области (пл. 4 —  $k = 0,10$  и пл. 6 —  $k = 0,12$ ).

Если в уравнение экспоненциальной аппроксимации  $k = bm^\phi$  ( $\phi$  — географическая широта,  $b$  и  $m$  — коэффициенты, полученные с помощью программы), описывающее связь константы разложения древесины с географической широтой (табл. 32), подставить среднее значение константы разложения древесины в БГЦ Ботанического сада, получится, что такое значение  $k$  должно наблюдаться на широте 53°78', что на 1°93' (215 км) южнее, чем расположение Ботанического сада, и соответствует точке в Тульской обл., в 47 км к югу от г. Тулы. Аналогично, максимальное значение  $k$  по Ботаническому саду ( $k = 0,16$  — берёзово-кленовая полоса, ельник) соответствует 153 км к югу, а минимальное значение ( $k = 0,12$ , грабинник) — 315 км к югу от расположения Ботанического сада.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные выше данные свидетельствуют о следующем. Во-первых, в лесных БГЦ разложение древесины замедляется в направлении с севера на юг, от более холодного и влажного климата, к более тёплому и сухому. Во-вторых, в каждой природной зоне разложение древесины замедленно в локациях с пониженным и повышенным увлажнением.

На то, что процессы, связанные с почвообразованием, замедлены в жарких и засушливых условиях, обращал внимание И. П. Герасимов (1976), подчёркивая значение периодов «жаркого покоя» и «холодного покоя» в формировании почв Средиземноморья (см. стр. 34).

Следует также обратить внимание на серии площадок со схожей растительностью, но различным увлажнением. К таким можно отнести площадки 18, 20 и 21 — смешанные и лиственные леса в Чашниково, площадки 1 и 3 — широколиственные леса в Тульской обл., площадки 12, 13 и 14 в Хреновском бору. В каждой из этих серий замедленное разложение наблюдается в локациях с повышенным или пониженным увлажнением по сравнению с площадками в автоморфных ландшафтах. Следовательно, вне зависимости от фактора растительности, разложение древесины в значительной степени контролируется увлажнением.

Наиболее замедленное разложение древесины по сравнению с зональными лесами наблюдается на залежах (пл. 22 и 23, пл. 7), в хорошо вентилируемых лесополосах (пл. 2, 5), а также на участке степи (пл. 16) — по сравнению с лесополосой (пл. 15). Это также может косвенно свидетельствовать о влиянии фактора увлажнения на разложение древесины, однако в этом

случае нельзя исключать роль специализации местных организмов-деструкторов, которая в той или иной степени определяется растительностью.

Близость величин параметров разложения древесины в биогеоценозах БС МГУ, схожих по климатическим условиям, но значительно различающихся по флористическому составу, по строению и мощности подстилок, позволяет заключить, что видовая принадлежность деревьев-эдификаторов не является важным фактором, контролирующим разложение древесины в лесах.

Разложение древесины в биогеоценозах БС МГУ замедленно по сравнению с БГЦ Чашниково, что свидетельствует о том, что режим их функционирования отличается от того, который присущ зональным лесам. Особенно велико это различие по сравнению с лиственным лесом, не имеющим признаков переувлажнения (пл. 21). Таким образом, общие особенности городского климата, и загрязнение, угнетающее местную микробиоту, обуславливают различия в интенсивности разложения, но мера влияния каждого из них остаётся неясной. Как было показано в предыдущих работах (Богатырев, Жилин и др., 2018) на примере снежного покрова, состав снегов БС МГУ сближается с таковым в Чашниково. При этом, скорости круговорота и скорости разложения нативных материалов (*см. далее* в табл. 37) в Ботаническом саду не занижены по сравнению с естественными сообществами. Это позволяет заключить, что основной причиной замедленного разложения древесины в БС МГУ является именно отличие климатических параметров, а не угнетённость организмов-деструкторов.

Большее варьирование значений  $OM_T$  в БГЦ Чашниково по сравнению с биогеоценозами БС МГУ (рис. 33) можно объяснить большей парцеллярной контрастностью, большей неоднородностью микрорельефа, подстилки, и прочих параметров, проявляющихся в схожем масштабе на поверхности почвы, в зрелых древостоях Чашниково, по сравнению с более молодыми искусственно созданными биогеоценозами БС МГУ.

## 4.5.2. ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Целлюлоза, по сравнению с древесиной, разлагается довольно быстро: медианный период полуразложения составляет 0,48—0,87 года (в зависимости от применяемой аппроксимации данных). За исключением отдельных случаев, за один год теряется более половины массы, чаще — 70—90 %. Наибольшая скорость разложения наблюдается в первые месяцы после закладки, или, если образцы были заложены осенью, в первые тёплые месяцы следующего года. В табл. 33 приведены обобщающие параметры разложения целлюлозы на каждой опытной площадке.

Табл. 33 (окончание на след. стр.). Обобщающие параметры разложения целлюлозы, рассчитанные на основании экспоненциальной и линейной аппроксимации.

Обозначения:  $R^2$  — коэффициент детерминации ( $p$  — уровень значимости  $R^2$ );  $T^{1/2}$  — период полуразложения;  $k$  — константа разложения (второй строкой — доверительные границы, см. с. 98);  $CP$  — скорость разложения; жирным шрифтом выделены значимые  $R^2$ ,  $k$  и  $CP$  (см. с. 98);  $n$  — число исследованных образцов (значение  $OM = 100\%$  при  $T = 0$  не учитывается); «оп. уч.» — опытный участок (в заказнике Каменная степь); «—» — нет данных.

Географич. положение	№ пло-щадки	Название биогеоценоза и тип почвы (если известен)	Экспоненциальная			Линейная			$n$	
			$R^2$ ( $p$ )	$T^{1/2}$ , годы	$k$ , год <sup>-1</sup> (дов. гр.)	$R^2$ ( $p$ )	$T^{1/2}$ , годы	$CP \pm \Delta$ , %·год <sup>-1</sup>		
Зона смешанных (широколиственно-еловых) лесов — Московская обл., Чашниково	18	Переувл. смеш. лес на дерновой грунтово-глееватой п.	<b>0,74</b> (0,00)	0,20	3,49 —	<b>0,87</b> (0,00)	0,59	<b>84,5</b> $\pm 20,1$	12	
	19	Ельник-кисличник на дерново-подзолистой почве	<b>0,89</b> (0,00)	0,15	4,74 —	<b>0,95</b> (0,00)	0,59	<b>84,7</b> $\pm 11,6$	12	
	20	Смешанный лес на болотно-подзолистой почве	<b>0,88</b> (0,00)	0,48	1,45 —	<b>0,83</b> (0,00)	1,01	<b>49,3</b> $\pm 14,2$	12	
	21	Лиственный лес на дерново-подзолистой почве	<b>0,94</b> (0,00)	0,15	4,65 —	<b>0,99</b> (0,00)	0,61	<b>81,4</b> $\pm 6,0$	12	
	22	Залежь берёзовая на среднесмытой почве	<b>0,94</b> (0,00)	0,44	1,59 —	<b>0,96</b> (0,00)	0,70	<b>71,8</b> $\pm 21,1$	4	
	23	Залежь берёзовая на слабосмытой почве	<b>0,71</b> (0,03)	0,34	2,02 —	<b>0,76</b> (0,02)	0,80	<b>62,7</b> $\pm 49,1$	4	
Зона широколиственных лесов — Тульская обл.	1	Широколиственный лес на серой лесной глеевой почве	<b>0,82</b> (0,01)	1,24	<b>0,56</b> 0,07...1,57	<b>0,87</b> (0,01)	1,61	<b>31,0</b> $\pm 16,5$	4	
	2	Лесополоса берёзовая на серой лесной почве	<b>0,66</b> (0,05)	0,93	0,74 —	<b>0,85</b> (0,01)	1,07	<b>46,8</b> $\pm 27,7$	4	
	3	Широколиственный лес на серой лесной почве	0,50 (0,12)	0,42	1,65 —	<b>0,85</b> (0,01)	0,82	<b>60,9</b> $\pm 35,7$	4	
Зона лесостепей — Липецкая обл.	4	Широколиственный лес на чернозёме типичном	<b>0,77</b> (0,00)	1,23	<b>0,56</b> 0,13...0,35	<b>0,85</b> (0,00)	1,65	<b>30,4</b> $\pm 12,9$	6	
	5	Лесополоса осиновая на чернозёме типичном	0,55 (0,09)	-14,7	<b>-0,05</b> -0,10...0,01	0,54 (0,10)	-10,1	-5,0 $\pm 6,3$	4	
	6	Лесополоса липово-кленовая на чернозёме типичном	0,54 (0,06)	1,03	0,67 —	<b>0,77</b> (0,01)	1,32	<b>37,9</b> $\pm 23,7$	5	
	7	Залежь на чернозёме типичном	<b>0,74</b> (0,01)	3,48	<b>0,20</b> 0,06...0,36	<b>0,76</b> (0,00)	3,24	<b>15,4</b> $\pm 8,7$	6	
Южная граница зоны лесостепей — Воронежская обл.	Солонцов. комплекс	8	Осиновый лес на солоди чернозёмной	<b>0,89</b> (0,00)	0,69	<b>1,00</b> 0,34...3,69	<b>0,95</b> (0,00)	1,13	<b>44,2</b> $\pm 9,8$	6
		9	Луг разнотравно-злаковый на лугово-чернозёмной почве	<b>0,86</b> (0,02)	9,37	<b>0,07</b> 0,02...0,13	<b>0,87</b> (0,02)	7,05	<b>7,1</b> $\pm 5,1$	3
	Хреновской бор	12	Смешанный лес в понижении на песчаной почве	<b>0,86</b> (0,02)	0,28	2,45 —	<b>0,99</b> (0,00)	0,57	<b>87,8</b> $\pm 13,5$	3
		13	Редколесье на возвышении на песчаной почве	<b>0,93</b> (0,01)	0,69	1,00 —	<b>0,97</b> (0,00)	0,81	<b>61,8</b> $\pm 20,3$	3
		14	Смешанный лес на возвышении на песчаной п.	<b>0,92</b> (0,00)	0,26	2,71 —	<b>1,00</b> (0,00)	0,55	<b>91,1</b> $\pm 8,0$	4
	Каменная степь	10	оп. уч. Лесополоса (широколист. лес) на чернозёме обыкновенном	—	—	—	—	—	—	—
11		оп. уч. Некосимая степь на чернозёме обыкновенном	<b>1,00</b> (0,00)	7,34	<b>0,09</b> 0,07...0,12	<b>1,00</b> (0,00)	5,55	<b>9,0</b> $\pm 1,8$	2	

Географич. положение	№ площадки	Название биогеоценоза и тип почвы (если известен)	Экспоненциальная			Линейная			n	
			R <sup>2</sup> (p)	T <sup>1/2</sup> , годы	k, год <sup>-1</sup> (дов. гр.)	R <sup>2</sup> (p)	T <sup>1/2</sup> , годы	CP ± Δ, %·год <sup>-1</sup>		
Зона сухих степей — Волгоградск. обл.	15	Лесополоса дубовая на каштановой почве	<b>0,86</b> (0,00)	2,00	<b>0,35</b> 0,17...0,56	<b>0,90</b> (0,00)	2,02	<b>24,7</b> ± 8,3	6	
	16	Степь типчаково-полынная на каштановой почве	<b>0,87</b> (0,07)	-6,44	<b>-0,11</b> -0,22...0,01	<b>0,86</b> (0,07)	-4,10	-12,2 ± 14,8	2	
Городские территории — Москва, Ботанический сад МГУ	Хвойные	27	Лиственничник	<b>0,79</b> (0,00)	0,42	1,65 —	<b>0,96</b> (0,00)	0,79	<b>63,0</b> ± 8,5	11
		29	Сосняк	<b>0,84</b> (0,00)	0,69	<b>1,00</b> 0,44...2,37	<b>0,84</b> (0,00)	1,19	<b>41,9</b> ± 4,9	12
		31	Ельник	<b>0,73</b> (0,00)	0,39	1,76 —	<b>0,94</b> (0,00)	0,85	<b>59,1</b> ± 9,8	12
	Лиственные	26	Тополёвник	<b>0,76</b> (0,07)	0,33	2,12 —	<b>0,94</b> (0,00)	0,87	<b>57,7</b> ± 21,6	12
		28	Берёза+Клён	<b>0,76</b> (0,00)	0,63	1,09 —	<b>0,89</b> (0,00)	1,11	<b>44,9</b> ± 10,1	12
		30	Грабинник	<b>0,83</b> (0,00)	0,39	1,76 —	<b>0,91</b> (0,00)	0,84	<b>59,8</b> ± 11,6	12

В табл. 34 приведены параметры корреляции констант разложения целлюлозы в лесах относительно дренированных ландшафтов с климатическими параметрами (табл. 5), с запасами подстилок (табл. 18) и с географической широтой. Значимая корреляция выявлена только с радиационным балансом деятельной поверхности. Однако, как и в случае с древесиной, корреляция с параметрами температуры, как правило, отрицательная, а с параметрами увлажнения —

Табл. 34. Корреляция констант разложения целлюлозы в лесах относительно дренированных ландшафтов ( $k$ , год<sup>-1</sup>) с климатическими параметрами в зональном ряду.

Параметры	Линейная		Экспоненциальная		Направленность корреляции	n
	R <sup>2</sup>	p(R <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>	p(R <sup>2</sup> )		
Географическая широта, °	<b>0,15</b>	0,27	<b>0,07</b>	0,45	Положительная	10
Суммарная солн. радиация, МДж/м <sup>2</sup> ·год	<b>0,02</b>	0,74	<b>0,00</b>	0,96	Отрицательная	8
Радиацион. баланс деят. поверх., МДж/м <sup>2</sup> ·год	<b>0,50</b>	0,05	<b>0,57</b>	0,03	Отрицательная	8
Температура воздуха среднегодовая, °С	<b>0,18</b>	0,23	<b>0,09</b>	0,39	Отрицательная	10
Температура поверхн. почвы среднегодовая, °С	<b>0,11</b>	0,36	<b>0,05</b>	0,52	Отрицательная	10
Отн. влажность воздуха среднегодовая, %	<b>0,15</b>	0,26	<b>0,07</b>	0,45	Положительная	10
Число дней с отн. влажн. воздуха ≤ 30 %	<b>0,75</b>	0,03	<b>0,64</b>	0,06	Положительная	6*
Число дней с отн. влажн. воздуха ≥ 80 %	<b>0,84</b>	0,01	<b>0,77</b>	0,02	Отрицательная	6*
Годовая сумма осадков, мм	<b>0,03</b>	0,65	<b>0,00</b>	0,92	Положительная	10
Из них жидких осадков, мм	<b>0,09</b>	0,39	<b>0,04</b>	0,59	Положительная	10
Число дней без осадков	<b>0,04</b>	0,59	<b>0,00</b>	0,88	Отрицательная	10
Запасы подстилок, г/м <sup>2</sup> (табл. 18)	<b>0,21</b>	0,19	<b>0,22</b>	0,17	Положительная	10
Константы разложения древесины (табл. 31)	<b>0,45</b>	0,03	<b>0,39</b>	0,05	Положительная	10
Константы разл. древесины (все площадки)	<b>0,53</b>	0,00	<b>0,48</b>	0,00	Положительная	<b>27</b>

Примечания. Для данных по площадкам 18—21, 1, 3, 4, 6, 12 и 14 — леса относительно дренированных ландшафтов. Интразональные БГЦ и урбанизированные БГЦ Ботанического сада не учитываются. \* Параметры корреляции получены лишь по двум значениям для каждого климатического параметра.

положительная. Константы разложения целлюлозы коррелируют с константами разложения древесины, как по выборке, учитывающей только леса, так и по общей выборке.

Далее рассмотрим особенности разложения целлюлозы в зональных и интразональных биогеоценозах каждой природной зоны (рис. 34).

В отдельных случаях, на площадках 5 и 16, значения  $T^{1/2}$  и  $k$  отрицательные, что свидетельствует об *увеличении* остатка массы образцов с течением времени. Действительно, после одного года экспозиции было отмечено увеличение массы образцов на пл. 5 до 113,8 % ( $n = 2$ ,  $\sigma = 0,89$ ), а после двух лет остаток массы составил 105,5 % ( $n = 2$ ,  $\sigma = 3,46$ ). Тот же эффект наблюдается и на площадке 16. Таким образом, потеря массы данных образцов не превосходит их загрязнения минеральными частицами.

В **Чашниково (зона смешанных лесов)** разложение целлюлозы наиболее интенсивно в лиственном лесу (пл. 21), как и разложение древесины, а также в ельнике-кисличнике (пл. 19). Несколько более медленное разложение целлюлозы наблюдается на пл. 20 (лес на болотно-подзолистой почве) (различие значимо для  $CP$ ), а также на залежах (пл. 22 и 23).

В **Тульской обл. (зона широколиственных лесов)** целлюлоза, как и древесина, разлагается наиболее интенсивно в зональном лесу (пл. 3), менее интенсивно — в схожем лесу на се-

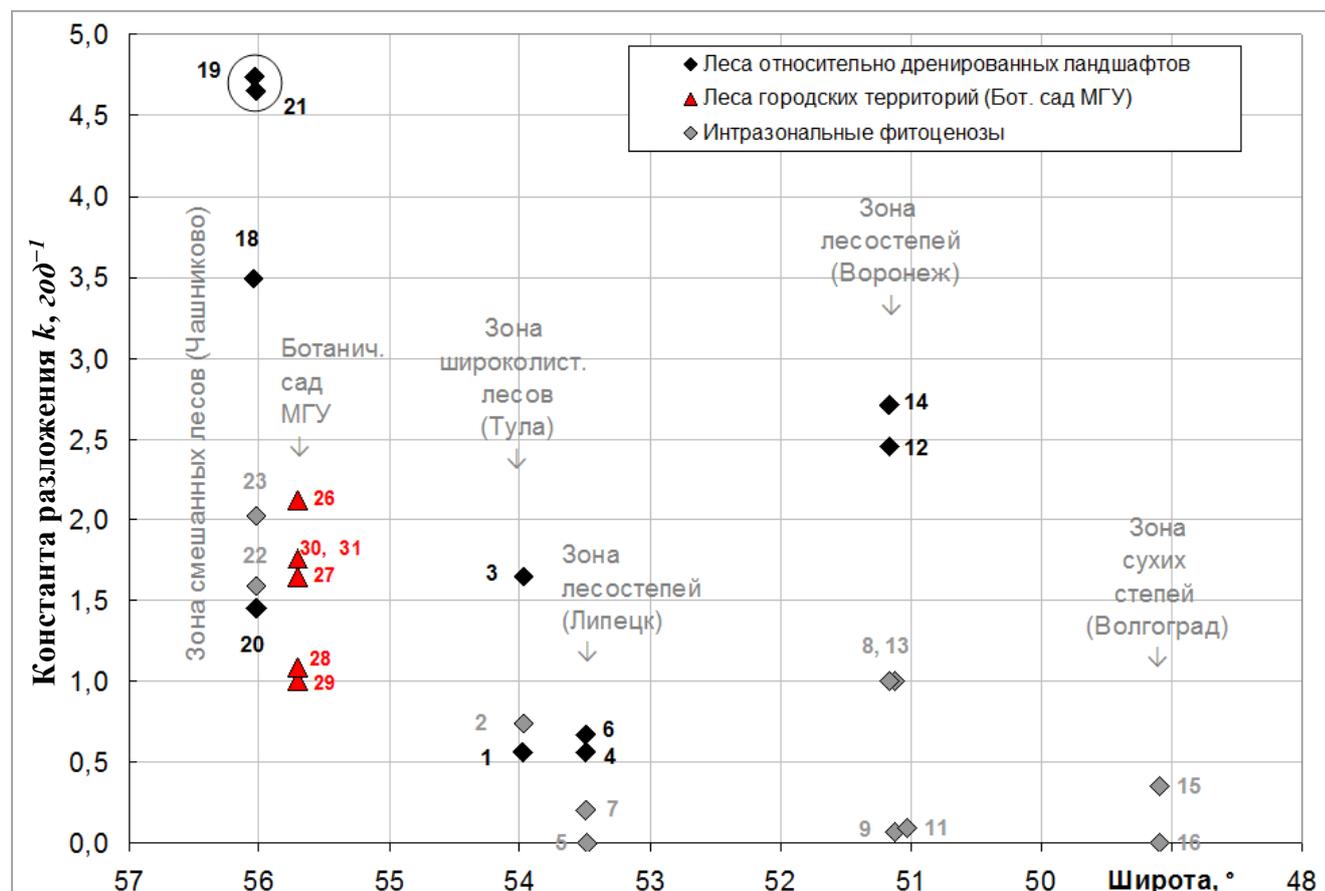


Рис. 34. Разложение целлюлозы в биогеоценозах зонального ряда.

Обозначения. Подписи к точкам — номера опытных площадок (см. табл. 33). Обведены значения для фоновых лесов без признаков переувлажнения.

рой лесной глеевой почве (пл. 1) и в лесополосе (пл. 2).

В **Липецкой обл. (зона лесостепей)** наиболее интенсивное разложение целлюлозы, как и древесины, наблюдается в широколиственном лесу (пл. 4) и в схожей с ним лесополосе (пл. 6). На залежи (пл. 7) разложение целлюлозы замедленно, а в осиновой лесополосе (пл. 5) потеря массы и вовсе не наблюдается. Отметим, что разложение древесины в лесополосе (пл. 5) и на залежи (пл. 7) также замедленно по сравнению с лесами (пл. 4 и 6).

В **Хреновском бору Воронежской обл. (зона лесостепей)** целлюлоза интенсивно разлагается под лесом, как на возвышении (пл. 14), так и в понижении (пл. 12), но медленнее — на хорошо прогреваемом и вентилируемом участке редколесья (пл. 13), что не вполне соответствует параметрам разложения древесины на той же серии площадок. Разложение целлюлозы значительно замедленно в условиях луга на лугово-чернозёмной почве (пл. 9) по сравнению с осиновым лесом на солоди (пл. 8). Довольно медленное разложение наблюдается на участке некосимой степи (пл. 11).

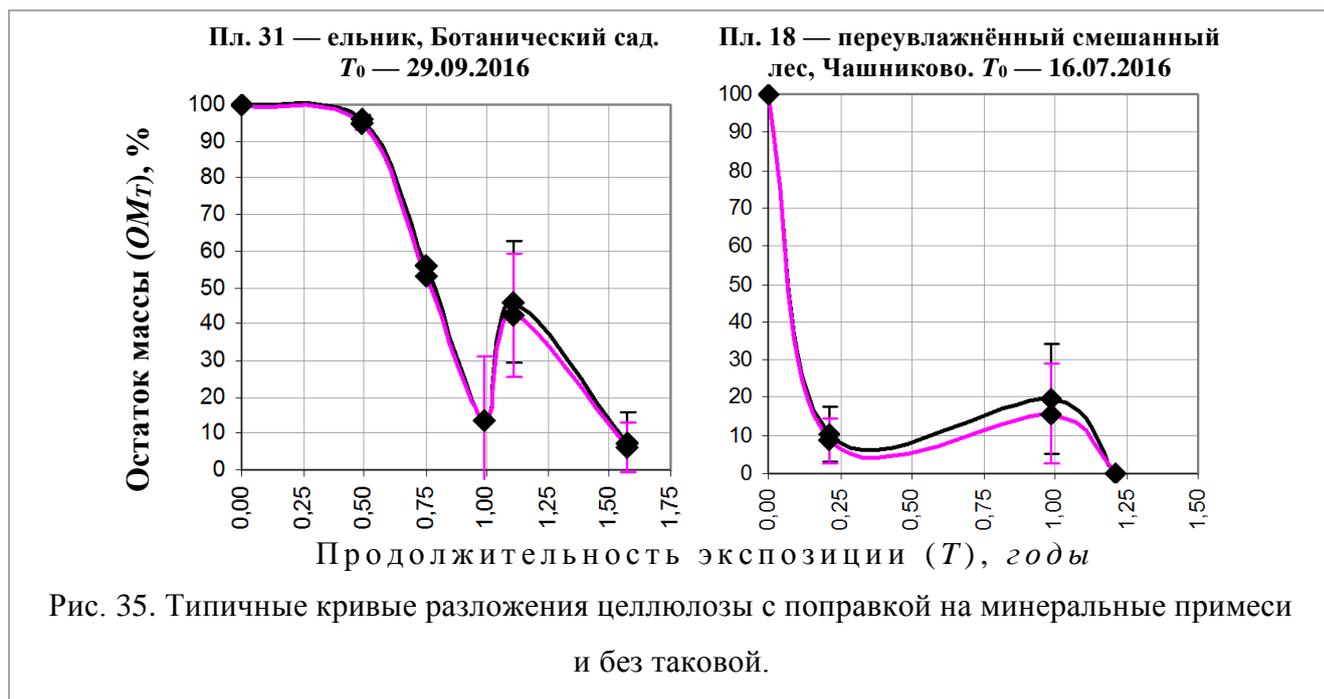
В **Волгоградской обл. (зона сухих степей)** разложение целлюлозы на участке сухой степи (пл. 16) не наблюдается; разложение целлюлозы в лесополосе (пл. 15) относительно медленное, но всё же выше, чем, например, в лесополосе в Липецкой обл. (пл. 5).

Интенсивность разложения целлюлозы **в биогеоценозах урбанизированных территорий Ботанического сада** варьирует значительно, чем интенсивность разложения древесины; в некоторых случаях наблюдаются значимые различия *СР*. Целлюлоза разлагается быстрее в тополёвнике (пл. 26), в грабиннике (пл. 30), в ельнике (пл. 31) и в лиственничнике (пл. 27), и заметно медленнее — в берёзово-кленовой полосе (пл. 28) и сосняке (пл. 29). Интересно, что для берёзово-кленовой полосы (пл. 28), которая испытывает наибольшее влияние антропогенных факторов, тем не менее, не характерно существенного замедления или ускорения процессов разложения по сравнению с остальными БГЦ Ботанического сада. В лиственничнике, где интенсивность биологического круговорота самая низкая среди биогеоценозов БС МГУ, также не наблюдается замедленного разложения целлюлозы.

В биогеоценозах БС МГУ разложение целлюлозы протекает медленнее, чем в лесах автоморфных ландшафтов Чашниково (пл. 19 и 21) (различие значимо для *СР*), и примерно с такой же скоростью, как в лесах с признаками переувлажнения (пл. 18 и 20), и в зональном широколиственном лесу в Тульской области (пл. 3).

Для целлюлозы характерен такой эффект как **увеличение остатка массы** в ходе разложения. На примере данных по площадкам 18—21 в Чашниково и площадкам 26—31 в БС МГУ такой пик наблюдается не менее чем в половине случаев не только для целлюлозы, но также для древесины, и для нативных материалов (активных фракций местных подстилок), хотя существенный разброс значений не позволяет считать этот пик статистически значимым в каждом

отдельном случае. Тем не менее, пики остатка массы одноимённых образцов на разных объектах, как правило, приурочены к одним и тем же датам, как, например, в случае с образцами целлюлозы в БС МГУ. Это явление обнаруживается в биогеоценозах БС МГУ чаще, чем в БГЦ Чашниково, однако, не исключено, что в силу различия режимов отбора этот пик в БГЦ Чашниково просто не удавалось зарегистрировать. Предположение о том, что это явление может быть обусловлено загрязнением образцов минеральными частицами почвы, не оправдалось — после озоления большей части образцов и внесения поправки на минеральные примеси, не было обнаружено принципиальных отличий остатка массы (рис. 35).



## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В силу сравнительно быстрого разложения целлюлозы, на кривых изменения массы отражаются многие сезонные колебания гидротермических условий, и отклоняют их форму от гипотетического экспоненциального вида. Так, например, в БС МГУ обнаруживается задержка разложения целлюлозы в первые месяцы, которая в БГЦ Чашниково не наблюдается (см. Приложение — рис. 47, 48, 49). Это различие обусловлено тем, что в БГЦ Чашниково образцы закладывали в июне, а в биогеоценозах БС МГУ — в конце сентября, и задержка разложения приходится на зимние месяцы. Таким образом, довольно резкий отклик на сезонные особенности гидротермических условий, при  $T^{1/2}$ , составляющем лишь около одного года, делает менее объективным сравнение данных по образцам, заложенным с большой разницей во времени.

Показатели разложения целлюлозы в одних случаях соответствуют, а в других, наоборот, противоречат тому, что можно было бы ожидать, ознакомившись с результатами разложения древесины. Обычно наиболее интенсивное разложение целлюлозы и древесины наблюдается на одних и тех же площадках, как и наиболее замедленное их разложение. Однако есть и исключе-

ния: в Хреновском бору разложение древесины замедленно и в понижении (пл. 12), и на участке редколесья (пл. 13), а разложение целлюлозы — только на участке редколесья. В отдельных случаях целлюлоза разлагается медленнее, чем древесина. Это свидетельствует о явном несоответствии интенсивности разложения этих материалов, учитывая, что в целом целлюлоза разлагается намного быстрее. К таким случаям относятся площадка 9 — луг на лугово-чернозёмной почве ( $k$  древесины = 0,22,  $n = 10$ ,  $k$  целлюлозы = 0,07,  $n = 3$ ), а также площадки 5 (лесополоса в Липецкой обл.) и 16 (степь), где разложение древесины замедленно, а разложение целлюлозы не наблюдается. Характерно, что все эти площадки характеризуются повышенной вентиляцией и инсоляцией на уровне поверхности почвы.

То обстоятельство, что замедленное разложение целлюлозы не всегда сопряжено с замедленным разложением древесины, а также на некоторых площадках целлюлоза по сравнению с древесиной разлагается даже медленнее, наглядно иллюстрирует, что реализация внешних факторов разложения определяется внутренними факторами разложения материалов — их составом и физическими свойствами. Можно предположить, что в данном случае сказывается вододерживающая способность материалов. У древесины она, очевидно, выше, чем у целлюлозы, поскольку образцы древесины имеют бóльшую массу и меньшую площадь поверхности. При частом чередовании увлажнения и иссушения целлюлоза успевает высыхать, и разложение затормаживается, в то время как древесина может сохранять некоторое количество влаги в течение более длительного времени.

Наличие корреляции констант разложения целлюлозы с радиационным балансом и с константами разложения древесины, а также наличие отклика на дефицит влаги, диагностируемый по особенностям растительного покрова, позволяют заключить, что ведущие факторы разложения целлюлозы — гидротермические. Принципиальное значение могут иметь не только обобщённые значения климатических параметров, но и *режим* увлажнения, вентиляции и прогревания поверхности почвы, поскольку разложение материала может зависеть от его вододерживающей способности, которая у используемой целлюлозы, очевидно, невелика. Сочетания подобных внутренних и внешних факторов разложения могут обуславливать непропорциональные различия в разложении различных материалов в различных условиях. Нельзя исключать также наличия связи с видовой принадлежностью растительности, влияющей на специализацию организмов-деструкторов, но имеющиеся данные не позволяют сделать такое заключение с полной уверенностью.

Остаётся неясным, чем обусловлено столь значительное увеличение массы образцов целлюлозы в ходе экспозиции. Однородность состава образцов не позволяет предположить рост биомассы организмов-деструкторов при смене субстратов питания. Нельзя исключать, что в данном случае проявляются сезонные особенности развития микроорганизмов.

В отношении использования целлюлозы в качестве стандартного материала важно, что высокая скорость её разложения приводит к тому, что динамика разложения очень плохо описывается какими-либо функциями. Следует признать, что этот материал, в том виде, в котором он был использован, плохо подходит для многолетних наблюдений и его можно рекомендовать скорее для кратковременных наблюдений с целью оценить сезонные особенности разложения.

### 4.5.3. ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЧАЯ

Для чая характерна весьма специфическая динамика разложения (рис. 36 и 37) — наблюдения в БС МГУ показали, что чай довольно быстро разлагается в первые месяцы, но затем остаток его массы выходит на плато на значениях около 40 % и задерживается на нём как минимум на два года, что позволяет использовать *минимальный остаток массы* ( $OM_{\text{мин}}$ ) как специфический показатель, характеризующий разложение чая. Динамика разложения чая плохо описывается экспоненциальной и линейной функциями. Вместе с тем, в отличие от других материалов, варьирование значений  $OM_T$  у чая очень низкое (рис. 36 и 37), поэтому значения  $T^{1/2}$  можно с достаточной точностью определить непосредственно по графику, и уже из них рассчитать константы разложения (формула 11) для сравнения интенсивности разложения чая и других материалов. Однако,  $T^{1/2}$  и  $k$  будут соответствовать лишь начальным этапам разложения, на которых кривая изменения массы чая имеет вид экспоненты.

Динамика разложения чая изучена на примере трёх подробных наблюдений в биогеоценозах БС МГУ (табл. 35). Третье наблюдение включает также объекты по маршруту зональной практики (табл. 36).

#### ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЧАЯ

Поскольку скорость разложения чая на начальных этапах сравнительно высока, значения  $k$  и  $T^{1/2}$  сильно различаются в зависимости от сезона, на который приходятся указанные этапы (табл. 35). Переход от фазы быстрого разложения к фазе стабилизации остатка массы происходит при  $T = 0,18$  года в первом наблюдении, при  $T = 0,41$  во втором наблюдении, и при  $T = 0,99$  в третьем наблюдении (рис. 36 и 37), а значения  $T^{1/2}$ , рассчитанные для наблюдений разных лет, могут различаться в четыре раза.

Третье наблюдение, наиболее продолжительное, показало, что за 0,5—0,75 года образцы разлагаются до остатка массы порядка 40—50 %, затем следует небольшое *увеличение* массы (на 0,2—4 %), которое, предположительно, объясняется ростом грибной или бактериальной биомассы по мере расхода наиболее доступных субстратов питания и освоения менее доступных. После этого остаток массы образцов стабилизируется на значениях порядка 35, 40 или

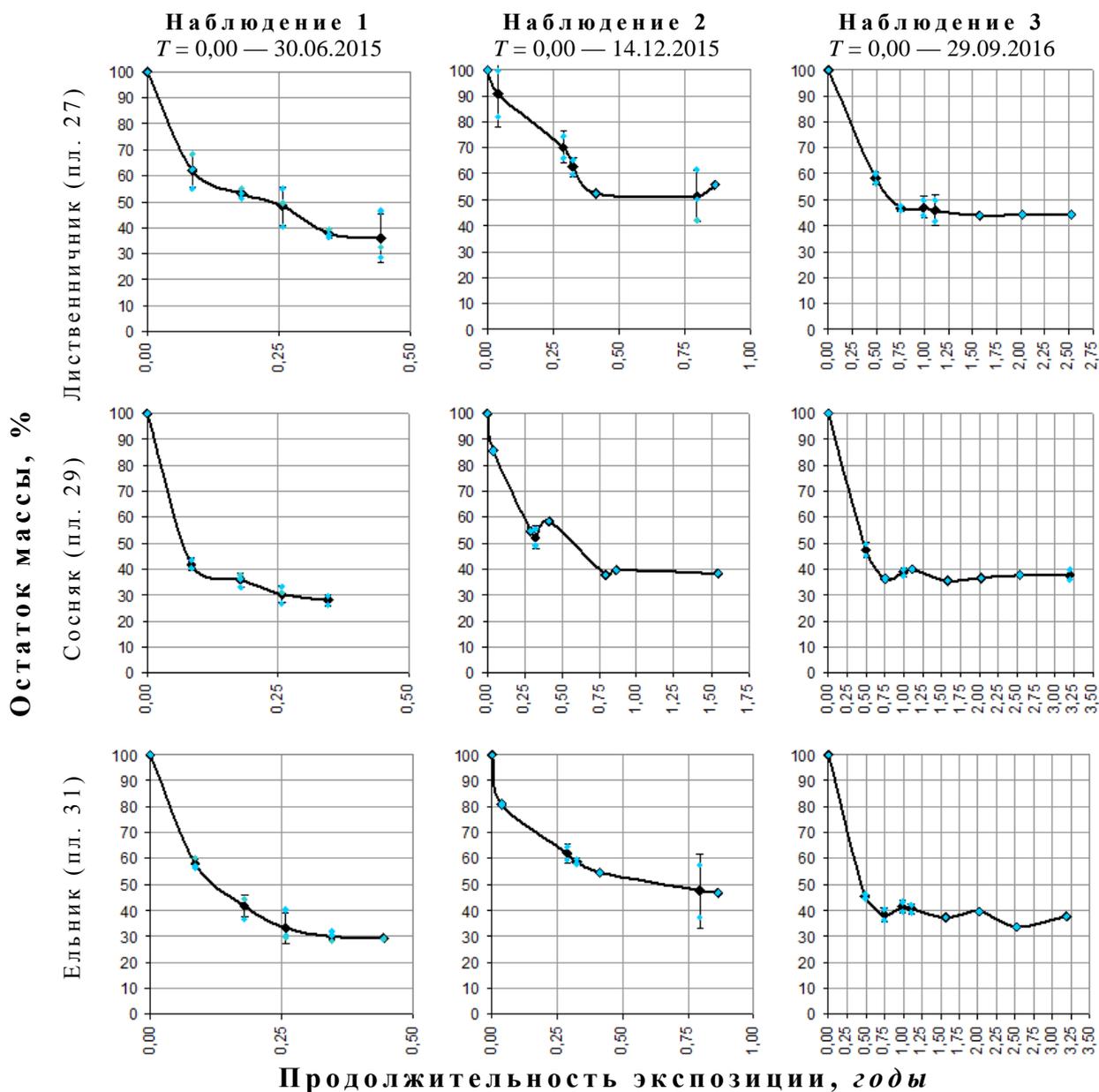


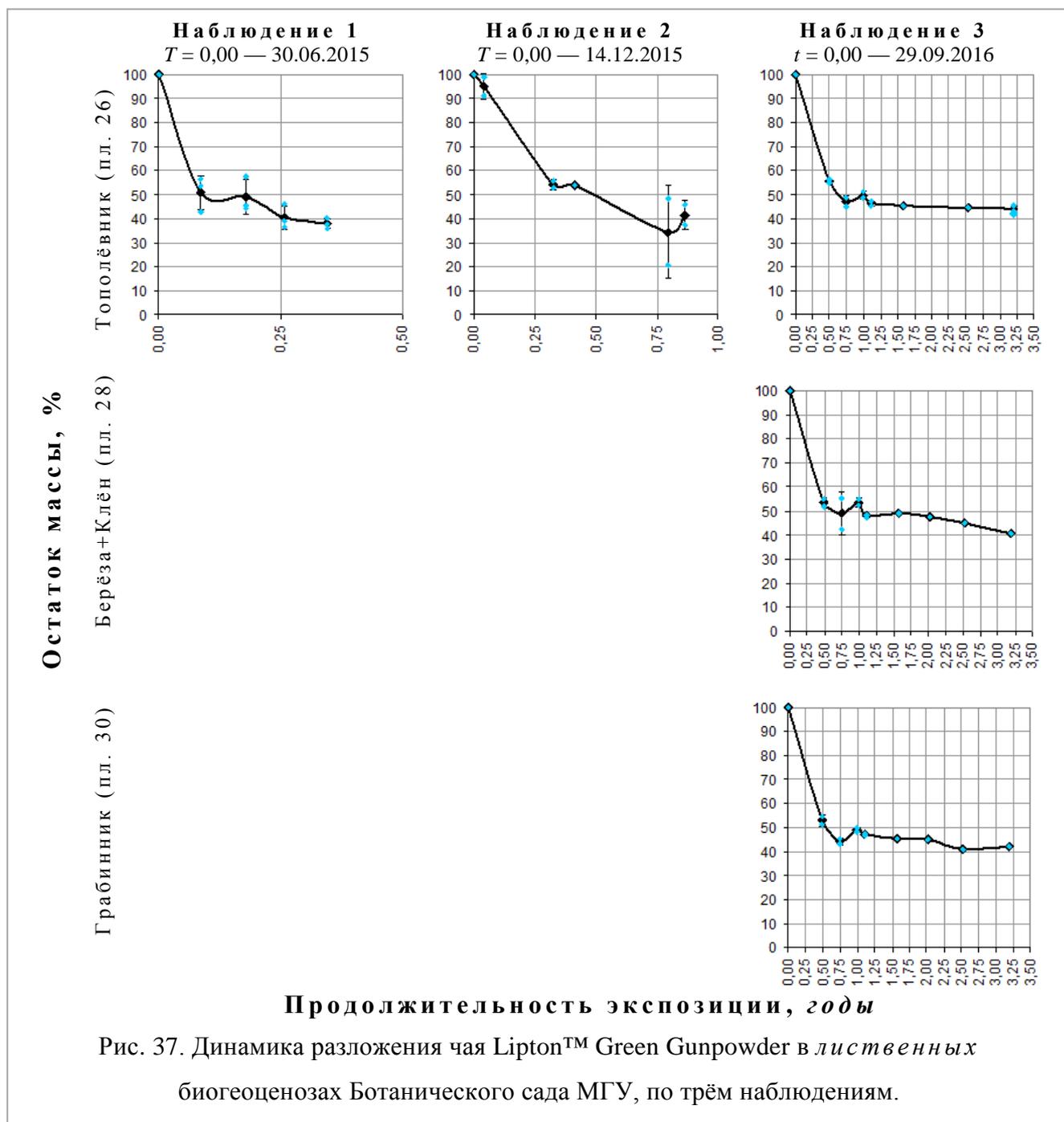
Рис. 36. Динамика разложения чая Lipton™ Green Gunpowder в хвойных биogeоценозах Ботанического сада МГУ, по трём наблюдениям.

Обозначения. Точки, соединённые линией —  $\overline{OM}_T$ ; отдельные точки — значения  $OM_T$  для каждого образца. Погрешность — стандартное отклонение (для случаев, когда  $n_{OM_T} > 1$ ).

— Здесь и на рис. 37.

45 %. Эти значения сохраняются на протяжении двух лет и более, и за этот период изменяются не более чем на 5 % (в единственном случае — на 10 %) причём, не всегда в меньшую сторону.

На примере третьего наблюдения видно, что при надлежащей тщательности проведения технических работ, для чая, по сравнению с другими материалами, характерен ничтожный разброс значений по повторностям — типичные значения стандартного отклонения  $\sigma$  составляют 0,5—2,5 %. Учитывая это обстоятельство, попытки описать разложение чая какой-либо функцией не приводят к повышению качества информации, а наоборот, огрубляют получаемую динамику. Учитывая специфический вид кривых изменения массы чая, для описания динамики



его разложения, по-видимому, важны (1) параметры разложения на ранних этапах, предшествующих стабилизации остатка массы, (2) величина остатка массы, на которой стабилизируются образцы. Последний параметр можно назвать *полнотой разложения*.

Поскольку период быстрого разложения занимает меньше одного года, и его продолжительность сильно зависит от сезонных климатических особенностей, сравнение параметров, характеризующих разложение в этот период, будет объективным только при условии, что даты начала наблюдений во всех сравниваемых случаях одинаковы. Если частота наблюдений составляет 1 год (например, если наблюдение проводится на базе ежегодной экспедиции), рассчитать достоверные значения константы разложения не представляется возможным.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЧАЯ В БИОГЕОЦЕНОЗАХ ЗОНАЛЬНОГО РЯДА

Частота наблюдений на объектах по зональной практике (пл. 1—16) составляет 1 год, поэтому для сравнения данных внутри общей выборки, объединяющей объекты в БС МГУ и объекты по зональной практике, приходится использовать непосредственно остаток массы образцов после одного года ( $\overline{OM}_1$ ) и после двух лет ( $\overline{OM}_2$ ) экспозиции. Последний можно условно принять за минимальный остаток массы ( $OM_{\text{мин}}$ ) на том основании, что в биогеоценозах БС МГУ эти величины довольно близки.

Динамика изменения массы образцов на площадках 1—16 не противоречит динамике их разложения в биогеоценозах БС МГУ: после одного года экспозиции разложение замедляется, и в течение второго года значения  $OM$  изменяются хотя и в сторону уменьшения, но лишь на величину, сопоставимую со стандартным отклонением  $OM_1$  и  $OM_2$  (табл. 36). Так, изменение массы за второй год экспозиции составляет 0,9—7,3 % (в среднем 4,0 %), в то время как  $\sigma_{\overline{OM}_1}$  составляет 1,2—8,2 %, а  $\sigma_{\overline{OM}_2}$  — 0,5—8,5 %. Интересно, что в 8 случаях из 11  $\sigma_{\overline{OM}_2}$  меньше, чем  $\sigma_{\overline{OM}_1}$ , и это не связано с уменьшением общей массы образцов — коэффициент вариации  $V_{\overline{OM}_2}$  в этих случаях также меньше, чем  $V_{\overline{OM}_1}$ . Кратковременное увеличение остатка массы, как в биогеоценозах БС МГУ, для площадок 1—16 не удалось зафиксировать ни в одном случае. Диаграммы изменения массы образцов на площадках 1—16 вынесены в Приложение.

Корреляция параметров разложения чая с запасами подстилок, с климатическими параметрами, а также с параметрами разложения прочих материалов, не выявлена. Динамика разложения чая не характеризуется экстремально высокими или экстремально низкими значениями её показателей по сравнению с другими образцами.

В **Тульской обл. (зона широколиственных лесов)** наиболее полное разложение чая (т. е. до меньших значений  $\overline{OM}_1$  и  $\overline{OM}_2$ ) наблюдается в лесах (пл. 1 и 3) по сравнению с лесополосой (т. 2). Аналогично, и в **Липецкой обл. (зона лесостепей)** в широколиственном лесу (т. 4) и в лесополосе, схожей с лесом (пл. 6) чай разлагается более интенсивно, чем в осиновой лесополосе (пл. 5) и на залежи (пл. 7), в которых большую роль играет травяная растительность. В Хреновском бору в **Воронежской обл. (зона лесостепей)** на пл. 12 (понижение) и на пл. 13 (редколесье) чай разлагается до  $\overline{OM}_2$  32—33 % (примерно так же, как в широколиственных лесах, пл. 1 и 3), а на площадке 14 (смешанный лес на возвышении) зафиксировано наиболее полное разложение чая — до  $\overline{OM}_2 = 20$  % (табл. 36). Довольно полное разложение чая отмечено также на лугу на лугово-чернозёмной почве (пл. 9) и в некосимой степи (пл. 11). В **Волгоградской обл. (зона сухих степей)** разложение чая сравнительно медленное, но не экстремально

медленное, в отличие от разложения древесины и целлюлозы. На участке сухой степи (пл. 16) даже наблюдается более полное разложение чая, чем в лесополосе (пл. 15).

Среди **биогеоценозов Ботанического сада** наиболее полное разложение чая наблюдается в ельнике (пл. 31) и сосняке (пл. 29), наименее полное — в берёзово-кленовой полосе. В целом, в лиственных БГЦ разложение чая менее полное, чем в хвойных. Для ельника и сосняка характерна также наиболее высокая скорость разложения на начальных этапах —  $k = 1,5$ , в то время как в остальных БГЦ  $k$  составляет 1,1—1,3 (табл. 35).

Табл. 36. Параметры разложения чая Lipton™ Green Gunpowder в биогеоценозах БС МГУ и в биогеоценозах зонального ряда.

Обозначения:  $\overline{OM}_1$  и  $\overline{OM}_2$  — остаток массы (%) после одного года и двух лет экспозиции соответственно; «оп. уч.» — опытный участок (в заказнике Каменная степь); «—» — нет данных.)

Географич. положение		№ пло-щадки	Название биогеоценоза и тип почвы (если известен)	$\overline{OM}_1, \%$	$\sigma_{\overline{OM}_1}, \%$	$n$	$\overline{OM}_2, \%$	$\sigma_{\overline{OM}_2}, \%$	$n$
Городские территории — Москва, Ботанический сад	Хвойные	27	Лиственничник	47,0	4,27	3	44,3	—	1
		29	Сосняк	38,7	1,74	2	36,4	—	1
		31	Ельник	41,3	2,43	2	39,5	—	1
	Лиственные	26	Тополёвник	49,6	1,64	2	45,2	—	1
		28	Берёза+Клён	53,6	1,85	2	47,7	—	1
		30	Грабинник	49,2	1,17	2	44,9	—	1
Зона широколиственных лесов — Тульская обл.	1	Широколиственный лес на серой лесной глеевой почве	33,6	3,49	4	32,7	6,28	2	
	2	Лесополоса берёзовая на серой лесной почве	50,3	3,03	4	45,5	0,86	2	
	3	Широколиственный лес на серой лесной почве	35,1	1,28	2	—	—	—	
Зона лесостепей — Липецкая обл.	4	Широколист. лес (усадеб. парк) на чернозёме типичном	43,3	4,32	4	40,2	3,45	2	
	5	Лесополоса осиновая на чернозёме типичном	63,7	6,19	4	58,9	0,45	2	
	6	Лесополоса липово-кленовая на чернозёме типичном	47,3	4,40	4	45,7	1,16	2	
	7	Залежь на чернозёме типичном	49,9	2,50	4	45,2	2,19	2	

Географич. положение		№ площадки	Название биогеоценоза и тип почвы (если известен)	$\overline{OM}_1, \%$	$\sigma_{\overline{OM}_1}, \%$	$n$	$\overline{OM}_2, \%$	$\sigma_{\overline{OM}_2}, \%$	$n$
Южная граница зоны лесостепей — Воронежская обл.	Солонцов. комплекс	8	Осиновый лес на солоди чернозёмной	47,8	1,97	4	40,4	0,45	2
		9	Луг разнотравно-злаковый на лугово-чернозёмной почве	33,0	3,87	4	—	—	—
	Хреновской бор	12	Смешанный лес в понижении на песчаной почве	36,1	8,23	4	33,3	8,46	2
		13	Редколесье на возвышении на песчаной почве	37,6	2,96	4	32,2	0,76	2
		14	Смешанный лес на возвышении на песчаной почве	26,3	2,68	4	20,1	2,85	2
	Каменная степь	10	оп. уч. Лесополоса (широколист. лес) на чернозёме обыкновенном	—	—	—	—	—	—
		11	оп. уч. Некосимая степь на чернозёме обыкновенном	32,8	1,24	4	—	—	—
Зона сухих степей — Волгоградская обл.	15	Лесополоса дубовая на каштановой почве	59,2	3,25	4	54,2	1,56	2	
	16	Степь типчаково-пыльниная на каштановой почве	47,8	6,83	4	—	—	—	

Данные по Ботаническому саду показывают, что в одних и тех же климатических условиях наиболее полное разложение чая наблюдается в хвойных БГЦ. Это, предположительно, соответствует обычному для хвойных лесов преобладанию грибного разложения, обуславливающего более полное разложение устойчивых компонентов, над бактериальным. При схожем флористическом составе и схожих характеристиках подстилок в условиях Хреновского бора замедленное разложение сопряжено с повышенным или пониженным увлажнением. В то же время, в схожих лесах в Тульской области (пл. 1 и 3) эта закономерность не наблюдается. Таким образом, гидротермические факторы, в том диапазоне, в котором они варьируют среди исследованных объектов, не являются ведущими для разложения чая, и его разложение контролируется скорее особенностями местной биоты.

#### 4.5.4. ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ НАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

##### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Напомним, что нативными материалами здесь называются активные фракции подстилок, отобранных непосредственно на опытной площадке — если древесина и целлюлоза на всех площадках одинаковы, то образцы нативных материалов генетически связаны с растительностью исследуемых биогеоценозов. В табл. 37 приведены обобщающие параметры разложения нативных материалов.

Табл. 37 (окончание на след. стр.). Обобщающие параметры разложения нативных материалов, рассчитанные на основании экспоненциальной и линейной аппроксимации.

Обозначения:  $R^2$  — коэффициент детерминации ( $p$  — уровень значимости  $R^2$ );  $T^{1/2}$  — период полуразложения;  $k$  — константа разложения (второй строкой — доверительные границы, см. с. 98);  $CP$  — скорость разложения; жирным шрифтом выделены значимые  $k$  и  $CP$  (см. с. 98);  $n$  — число исследованных образцов (значение  $OM = 100\%$  при  $T = 0$  не учитывается); «оп. уч.» — опытный участок (в заказнике Каменная степь); «—» — нет данных. Нативный материал — активные фракции подстилки, собранной на опытной площадке.

Географич. положение	№ площадки	Название биогеоценоза и тип почвы (если известен)	Экспоненциальная			Линейная			$n$
			$R^2$ ( $p$ )	$T^{1/2}$ , годы	$k$ , год <sup>-1</sup> (дов. гр.)	$R^2$ ( $p$ )	$T^{1/2}$ , годы	$CP \pm \Delta$ , %·год <sup>-1</sup>	
Зона смешанных (широколиственно-еловых) лесов — Московская обл., Чашниково	18	Переувлажнённый смешанный лес на дерновой грунтово-глееватой почве	<b>0,72</b> (0,00)	1,37	<b>0,51</b> 0,23...0,88	<b>0,82</b> (0,00)	1,50	<b>33,4</b> ± 9,4	13
	19	Ельник-кисличник на дерново-подзолистой почве	<b>0,77</b> (0,00)	5,36	<b>0,13</b> 0,08...0,18	<b>0,79</b> (0,00)	4,30	<b>11,6</b> ± 3,8	12
	20	Смешанный лес на болотно-подзолистой почве	<b>0,85</b> (0,00)	1,87	<b>0,37</b> 0,24...0,52	<b>0,86</b> (0,00)	1,80	<b>27,8</b> ± 7,0	12
	21	Лиственный лес на дерново-подзолистой почве	<b>0,48</b> (0,01)	2,93	<b>0,24</b> 0,06...0,45	<b>0,47</b> (0,01)	2,82	<b>17,7</b> ± 11,7	12
	22	Залежь берёзовая на средне-смытой почве	<b>0,89</b> (0,00)	0,65	1,07 —	<b>0,87</b> (0,01)	0,80	<b>62,8</b> ± 34,0	4
	23	Залежь берёзовая на слабосмытой почве	<b>0,66</b> (0,05)	2,01	<b>0,34</b> -0,05...1,02	<b>0,71</b> (0,04)	1,81	<b>27,6</b> ± 24,4	4
Зона широколиств. лесов — Тульская обл.	1	Широколиственный лес на серой лесной глеевой почве	<b>0,93</b> (0,00)	1,40	<b>0,49</b> 0,23...0,86	<b>0,95</b> (0,00)	1,72	<b>29,2</b> ± 9,3	4
	2	Лесополоса берёзовая на серой лесной почве	<b>0,85</b> (0,00)	0,83	<b>0,83</b> 0,18...0,38	<b>0,93</b> (0,00)	1,57	<b>31,9</b> ± 9,9	5
	3	Широколиственный лес на серой лесной почве	0,76 (0,13)	1,28	0,54 —	0,82 (0,09)	1,41	35,4 ± 50,0	2
Зона лесостепей — Липецкая обл.	4	Широколиственный лес на чернозёме типичном	<b>0,88</b> (0,00)	1,71	<b>0,40</b> 0,21...0,65	<b>0,92</b> (0,00)	1,91	<b>26,2</b> ± 7,6	6
	5	Лесополоса осиновая на чернозёме типичном	<b>0,91</b> (0,00)	3,22	<b>0,21</b> 0,13...0,30	<b>0,91</b> (0,00)	3,07	<b>16,3</b> ± 5,1	6
	6	Лесополоса липово-кленовая на чернозёме типичном	—	3,12	<b>0,22</b> 0,17...0,28	—	2,74	<b>18,2</b> ± 1,2	2
	7	Залежь на чернозёме типичном	—	—	—	—	—	—	—

Географич. положение		№ площадки	Название биогеоценоза и тип почвы (если известен)	Экспоненциальная			Линейная			n	
				R <sup>2</sup> (p)	T <sup>1/2</sup> , годы	k, год <sup>-1</sup> (дов. гр.)	R <sup>2</sup> (p)	T <sup>1/2</sup> , годы	CP ± Δ, %·год <sup>-1</sup>		
Южная граница зоны лесостепей — Воронежская обл.	Солонцов. комплекс	8	Осиновый лес на солоди чернозёмной	0,94 (0,00)	2,94	0,24 0,16...0,31	0,93 (0,00)	2,69	18,6 ± 5,2	6	
		9	Луг разнотравно-злаковый на лугово-чернозёмной почве	0,94 (0,00)	1,87	0,37 0,23...0,54	0,93 (0,00)	1,79	28,0 ± 8,7	5	
	Хреновской бор	12	Смешанный лес в понижении на песчаной почве	0,88 (0,01)	1,60	0,43 0,14...0,84	0,93 (0,00)	1,93	26,0 ± 9,6	4	
		13	Редколесье на возвышении на песчаной почве	0,94 (0,00)	2,48	0,28 0,19...0,38	0,98 (0,00)	2,51	19,9 ± 3,1	6	
		14	Смешанный лес на возвышении на песчаной почве	0,98 (0,00)	2,93	0,24 0,18...0,29	0,98 (0,00)	2,76	18,1 ± 3,9	4	
	Каменная степь	10	оп. уч. Лесополоса (широколист. лес) на чернозёме обыкновенном	—	4,33	0,16 —	—	3,38	14,8 —	1	
		11	оп. уч. Некосимая степь на чернозёме обыкновенном	0,97 (0,00)	1,26	0,55 0,29...0,92	0,99 (0,00)	1,48	33,9 ± 6,0	3	
Зона сухих степей — Волгоградск. обл.		15	Лесополоса дубовая на каштановой почве	0,97 (0,00)	2,59	0,27 0,21...0,33	0,96 (0,00)	2,45	20,4 ± 4,3	6	
		16	Степь типчакowo-полынная на каштановой почве	—	0,63	1,10 —	—	0,75	66,7 —	1	
Городские территории — Москва, Ботанический сад		Хвойные	27	Лиственничник	0,64 (0,00)	3,2	0,22 0,17...0,27	0,56 (0,00)	2,7	18,6 ± 3,7	11
			29	Сосняк	0,88 (0,00)	1,7	0,40 0,33...0,49	0,77 (0,00)	1,4	35,6 ± 4,1	12
			31	Ельник	0,50 (0,00)	1,5	0,47 0,28...0,70	0,42 (0,00)	1,7	29,7 ± 7,9	12
		Лиственные	26	Тополёвник	0,66 (0,00)	2,0	0,34 0,27...0,41	0,35 (0,00)	2,2	22,4 ± 4,1	12
			28	Берёза+Клён	0,92 (0,00)	2,6	0,27 0,24...0,31	0,88 (0,00)	2,5	19,7 ± 2,3	12
			30	Грабинник	0,86 (0,00)	1,2	0,60 0,45...0,77	0,71 (0,00)	1,5	33,5 ± 5,7	12

Параметры разложения нативных материалов не коррелируют с параметрами разложения древесины и целлюлозы; корреляция с климатическими параметрами также отсутствует (табл. 38). Однако, наблюдается отрицательная связь с запасами подстилок для лесов относительно дренированных ландшафтов, и, в меньшей степени — для выборки, включающей все площадки, в которую входят также БГЦ с травяными и лиственно-травяными подстилками. Это не даёт основания связать скорость разложения и запасы подстилок неким уравнением, поскольку запасы подстилок определяются не только устойчивостью детрита к разложению, но иллюстрирует, что медленное разложение сопряжено с высокими запасами подстилок.

Отрицательная связь скорости разложения нативных материалов с запасами подстилок прослеживается и при сравнении данных по отдельным площадкам в каждой природной зоне. В Чашниково (зона смешанных лесов) разложение нативного материала (рис. 38) замедленно в ельнике-кисличнике (пл. 19), для которого характерна наиболее мощная, гумифицированная подстилка. В лиственном лесу (пл. 21) нативный материал также разлагается довольно медленно.

Табл. 38. Корреляция констант разложения нативных материалов в лесах относительно дренированных ландшафтов ( $k$ , год<sup>-1</sup>) с климатическими параметрами в зональном ряду.

Параметры	Линейная		Экспоненциальная		Направленность корреляции	n
	R <sup>2</sup>	p(R <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>	p(R <sup>2</sup> )		
Географическая широта, °	<b>0,00</b>	0,95	<b>0,00</b>	0,83	Отрицательная	12
Суммарная солн. радиация, МДж/м <sup>2</sup> ·год	<b>0,03</b>	0,64	<b>0,00</b>	0,87	Отрицательная	10
Радиацион. баланс деят. поверх., МДж/м <sup>2</sup> ·год	<b>0,34</b>	0,08	<b>0,28</b>	0,11	Положительная	10
Температура воздуха среднегодовая, °С	<b>0,00</b>	0,95	<b>0,01</b>	0,74	Положительная	12
Температура поверхн. почвы среднегодовая, °С	<b>0,02</b>	0,66	<b>0,00</b>	0,91	Отрицательная	12
Отн. влажность воздуха среднегодовая, %	<b>0,00</b>	0,85	<b>0,02</b>	0,67	Отрицательная	12
Число дней с отн. влажн. воздуха ≤ 30 %	<b>0,22</b>	0,24	<b>0,17</b>	0,30	Отрицательная	8*
Число дней с отн. влажн. воздуха ≥ 80 %	<b>0,03</b>	0,70	<b>0,02</b>	0,76	Положительная	8*
Годовая сумма осадков, мм	<b>0,02</b>	0,65	<b>0,00</b>	0,89	Положительная	12
Из них жидких осадков, мм	<b>0,01</b>	0,76	<b>0,00</b>	1,00	Положительная	12
Число дней без осадков	<b>0,08</b>	0,36	<b>0,09</b>	0,33	Положительная	12
Запасы подстилок, г/м <sup>2</sup> (табл. 18) **	<b>0,30</b>	0,06	<b>0,38</b>	0,03	Отрицательная	12
Запасы подстилок, г/м <sup>2</sup> (все площадки) **	<b>0,17</b>	0,04	<b>0,21</b>	0,02	Отрицательная	<b>25</b>
Константы разложения древесины (табл. 31)	<b>0,11</b>	0,30	<b>0,12</b>	0,27	Отрицательная	12
Константы разл. древесины (все площадки)	<b>0,05</b>	0,25	<b>0,06</b>	0,21	Отрицательная	<b>27</b>
Константы разложения целлюлозы (табл. 33)	<b>0,12</b>	0,27	<b>0,19</b>	0,16	Отрицательная	<b>12</b>
Константы разл. целлюлозы (все площадки)	<b>0,08</b>	0,18	<b>0,11</b>	0,10	Отрицательная	<b>26</b>

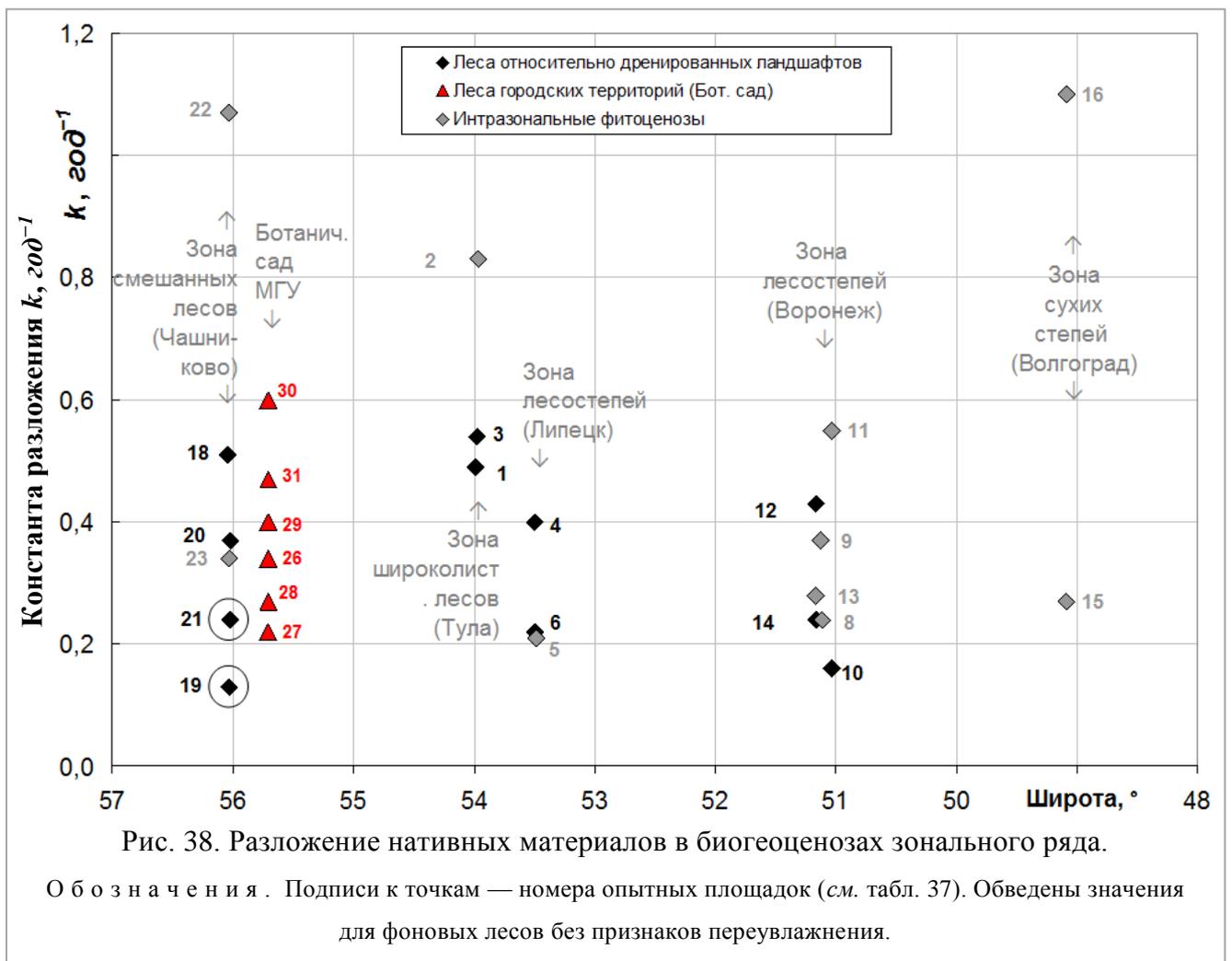
Примечания. Для данных по площадкам 18—21, 1, 3, 4, 6, 12 и 14 — леса относительно дренированных ландшафтов. Интразональные БГЦ, а также урбанизированные БГЦ Ботанического сада, не учитываются. \* Параметры корреляции получены лишь по двум значениям каждого климатического параметра. \*\* Для БС МГУ использованы данные от 2019 года.

но, в отличие от целлюлозы и древесины. В лесах с признаками переувлажнения (пл. 18 и 20), где разложение древесины и целлюлозы замедленно, разложение нативных материалов, напротив, протекает с довольно высокой скоростью. Интересно, что на участках залежи (пл. 22 и 23) скорости разложения нативного материала существенно различаются: разложение на пл. 22 на среднесмытой почве более интенсивное, чем на пл. 23, на слабосмытой почве.

В Тульской обл. (зона широколиственных лесов) разложение нативного материала в лесополосе (пл. 2) ускорено по сравнению с лесами, а в лесах на серой лесной (пл. 3) и серой лесной глеевой (пл. 1) почве различается не столь значительно.

В Липецкой обл. (зона лесостепей) интенсивность разложения нативного материала наибольшая в широколиственном лесу (пл. 4), в то время как в осиновой лесополосе (пл. 5) и в широколиственной лесополосе, сходной с лесом (пл. 6) разложение нативных материалов замедленно вдвое.

В Хреновском бору в Воронежской обл. (зона лесостепей) замедленное разложение наблюдается на пл. 13 (редколесье) и пл. 14 (смешанный лес на возвышении), а на площадке 12 (смешанный лес в понижении) нативный материал разлагается достаточно быстро. Отметим,



что в редколесье наблюдается несколько сниженная скорость биологического круговорота — при очевидно меньшем поступлении опада, чем на пл. 12 и 14, запасы подстилок здесь, наоборот, выше (см. табл. 18). Замедленное разложение нативного материала наблюдается также в осиновом лесу (пл. 8), где довольно велики запасы подстилок. Разложение древесины на этой площадке нельзя охарактеризовать как замедленное, следовательно, формирование сравнительно мощной подстилки и замедленное разложение нативного материала в образцах отчасти обусловлено внутренними факторами, то есть свойствами самого материала.

На участке сухой степи (пл. 16) в **Волгоградской обл.**, где разложение древесины и целлюлозы крайне заторможено, разложение нативного материала протекает весьма интенсивно. Разложение в лесополосе (пл. 15) также не характеризуется необычно высокими или низкими значениями по сравнению с остальными площадками в разных природных зонах.

Биогеоценозы урбанизированных территорий **Ботанического сада** по интенсивности разложения нативных материалов образуют ряд: лиственничник (пл. 27,  $k = 0,22$ ) — берёзово-кленовая полоса (пл. 28,  $k = 0,27$ ) — тополёвник (пл. 26,  $k = 0,34$ ) — сосняк (пл. 29,  $k = 0,40$ ) — ельник (пл. 31,  $k = 0,47$ ) — грабинник (пл. 30,  $k = 0,60$ ). Константа разложения в лиственнични-

ке, где запасы подстилок наибольшие, значительно ниже, чем остальных БГЦ Ботанического сада (разница значима).

Среди БГЦ Чашниково, принятых за фоновые, наибольшим сходством с биогеоценозами БС МГУ обладают ельник (пл. 19) и лиственный лес (пл. 21), не имеющие признаков переувлажнения. Константа разложения в ельнике БС МГУ (пл. 31) существенно выше, чем в фоновом ельнике в Чашниково (пл. 19); в сосняке (пл. 29) разложение тоже значительно ускорено (различия значимы). Лиственничник (пл. 27) по этому параметру находится ближе всего к фоновому ельнику.

В лиственных биогеоценозах БС МГУ константы разложения нативных материалов также выше, чем в фоновом лиственном лесу в Чашниково (пл. 21), не имеющем признаков повышенной влажности; значимая разница наблюдается в грабиннике (пл. 30), где константа разложения нативных материалов самая высокая среди всех БГЦ Ботанического сада.

## **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В серии площадок на залежах в Чашниково (пл. 22 и 23) заложен один и тот же нативный материал, собранный на одной из площадок серии, как и в серии площадок в Хреновском бору (пл. 12—14). На примере этих серий видно, что в условиях повышенного увлажнения разложение нативных материалов не замедляется, как разложение древесины и целлюлозы, а наоборот, ускоряется. То же проявляется на площадках 1 и 3 (Тульская обл.), схожих по всем признакам, кроме увлажнения, диагностируемого в почвенном профиле, а также в лиственных и смешанных лесах в Чашниково (пл. 18—21). Следовательно, небольшое повышение увлажнения, не приводящее к затоплению, не препятствует разложению листового и хвойного материала. Отметим, что речь не идёт о заболоченных участках, на которых переувлажнение достигает уровня, достаточного для консервации органического вещества. В экстремально сухих условиях существенного замедления разложения нативного материала не наблюдается.

Вместе с тем, выявлена взаимосвязь скорости разложения нативных материалов с запасами подстилок, несмотря на то, что в нашем распоряжении имеется относительно немного данных по объектам с мощными подстилками, и диапазон имеющихся величин запасов подстилок не так уж велик. Следует учесть также, что мощность подстилки определяется не только скоростью её разложения, но и скоростью поступления опада. Так, в Хреновском бору (пл. 12—14) наблюдается замедленное разложение на двух площадках из трёх, хотя запасы подстилок близки по величине; среди биогеоценозов БС МГУ наиболее медленное разложение наблюдается в лиственничнике (пл. 27), где подстилки наиболее мощные. Среди биогеоценозов Чашниково наиболее медленное разложение нативного материала отмечено в ельнике-кисличнике (пл. 19), где запасы подстилок одни из наиболее высоких (разница значима по сравнению со смешанными лесами, пл. 18 и 20).

Обращает на себя внимание, что разложение нативных материалов в ельнике и сосняке **Ботанического сада МГУ** ускорено по сравнению с фоновым ельником в Чашниково. Таким образом, данные о разложении, полученные экспериментально, в целом соответствуют результатам расчёта подстилично-опадных коэффициентов (табл. 27, 28), и приводят к одному и тому же выводу: разложение местного детрита в подстилках этих БГЦ Ботанического сада ускорено по сравнению с фоновыми БГЦ.

Следует лишний раз отметить, что предназначение стандартизированных образцов нативного материала состоит в том, чтобы отражать процессы разложения в том виде, в котором они протекают в естественных условиях, в результате действия всей совокупности факторов разложения, как внутренних, так и внешних. С этой точки зрения особенно важно, что разложение нативных материалов в биогеоценозах БС МГУ протекает интенсивнее, чем в фоновых БГЦ Чашниково, в то время как разложение стандартизированной древесины и стандартной целлюлозы в биогеоценозах БС МГУ, напротив, замедленно. Это свидетельствует о явном отличии биогеоценозов БС МГУ от фоновых, которое приводит к разнонаправленным откликам скорости разложения разных материалов.

В методическом отношении крайне важно, что параметры разложения *стандартных* древесины, целлюлозы и чая не коррелируют с параметрами разложения *нативных* материалов. Это иллюстрирует то положение, что отличие физических свойств, таких как внутренняя структура и размерность частиц материала, а также различия в химическом составе, обуславливают существенные различия во влиянии внешних факторов на разложение материалов, и, как следствие, существенные различия в скорости разложения. Одни и те же особенности условий среды приводят к непропорциональному, а иногда и противоположному отклику скорости их разложения. Следовательно, для исследования разложения местного детрита применим только местный детрит, при максимально возможном сохранении его структуры и свойств. Стандартные материалы, по крайней мере, в том техническом исполнении образцов, в котором они использованы в настоящей работе, не могут служить примером для исследования разложения местного детрита, хотя с их помощью можно получить ценные данные, если ведущие факторы их разложения известны.

В литературе есть данные, которые свидетельствуют, что разложение нативного материала может контролироваться климатическими параметрами. Так, В. Berg et al. (1993) приводят пример: потеря массы образцов хвои за один год коррелирует с актуальной эвапотранспирацией ( $R^2 = 0,489$ ). Однако, данные Б. Берга и коллег получены по образцам стандартизированной сосновой хвои в сосновых лесах, поэтому факторы происхождения и состава материала исключаются, а факторы, связанные с флористическим составом ФЦ, имеют подчинённое значение.

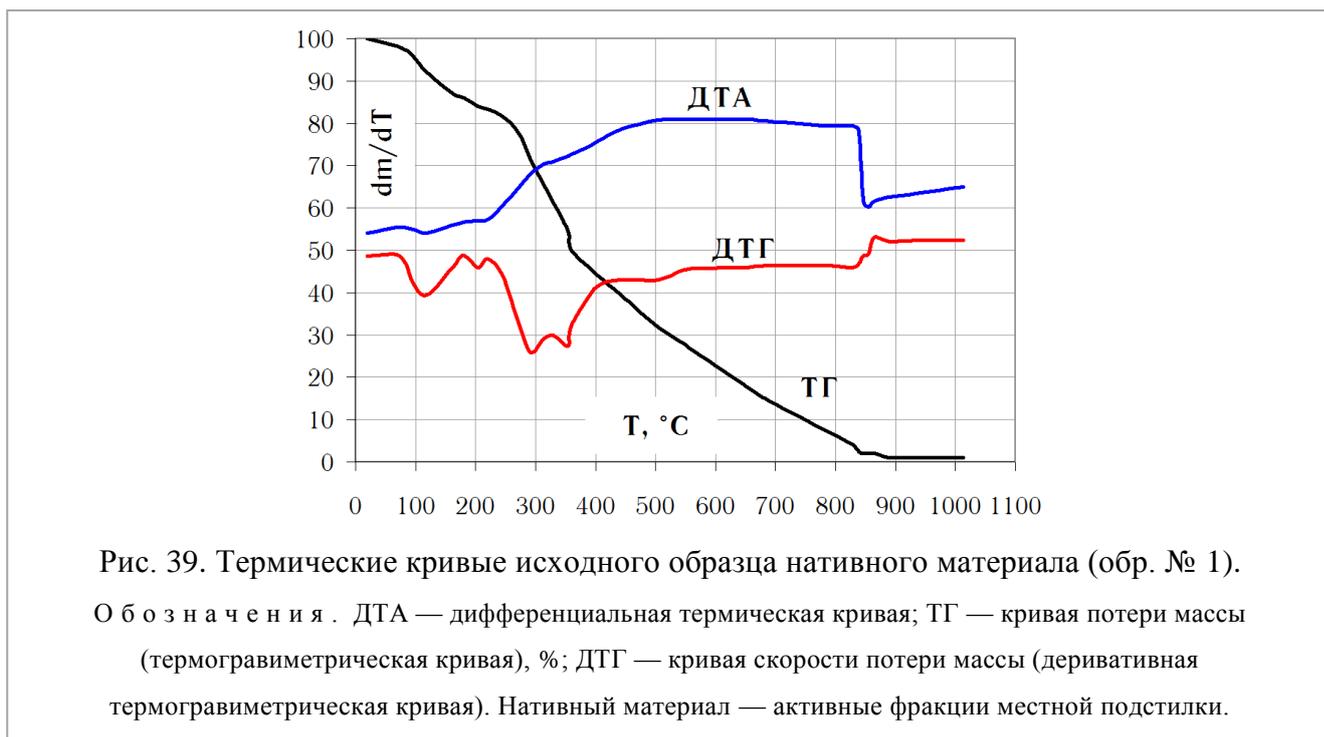
## ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕТРИТА РАЗНОЙ СТЕПЕНИ РАЗЛОЖЕННОСТИ

В рамках представляемого исследования данный метод был опробован на примере образцов нативного материала опытной площадки 30 (грабинник БС МГУ), которые разлагались в подстилке в течение различных периодов времени, начиная от образца, принятого за исходный (№ 1), и заканчивая образцом, который разлагался в течение двух лет (№ 11). Нативный материал, используемый в наблюдениях за процессом разложения, представляет собой активные фракции подстилки, отобранной непосредственно на опытной площадке, в данном случае — преимущественно листья и семена граба, отобранные в августе 2016 г.; большая часть материала — продукт предшествующего листопада (октябрь—ноябрь 2015 г.).

Выбор именно этой серии образцов нативного материала для термического анализа обусловлен равномерной динамикой потери массы с умеренно высоким варьированием, значительной полнотой разложения к моменту проведения анализа (до  $OM \approx 35\%$ ), а также относительной генетической и структурной однородностью исходного материала. Предполагается, что при анализе образцов детрита неоднородность материала даёт больший вклад в варьирование данных, чем сам метод термического анализа. С. Я. Трофимов с соавт. (1999)

### Результаты исследования

Для каждого образца были получены: кривая потери массы (ТГ), дифференциальная термическая кривая (ДТА), и деривативная термогравиметрическая кривая (ДТГ), приводимые в зависимости от температуры нагрева ( $T$ ). На рис. 39 представлены термические кривые, полученные для исходного образца нативного материала (№ 1). Термограммы прочих образцов, отобранных после разных сроков экспозиции в подстилке, выглядят схожим образом, но имеют характер-



ные особенности. На рис. 40 представлены деривативные термогравиметрические кривые, позволяющие наиболее детально оценить особенности динамики термического разложения материала. Количественная оценка результатов термического анализа выполняется на основании величин потери массы в интервалах температур (табл. 39).

Имеются явные различия в форме кривых, полученных для образцов разной продолжительности экспозиции. Кривые ДТГ для образцов большей продолжительности экспозиции характеризуются существенно меньшей разницей между минимальными и максимальными значениями, и заметно более сглажены в диапазоне температур 0—400°.

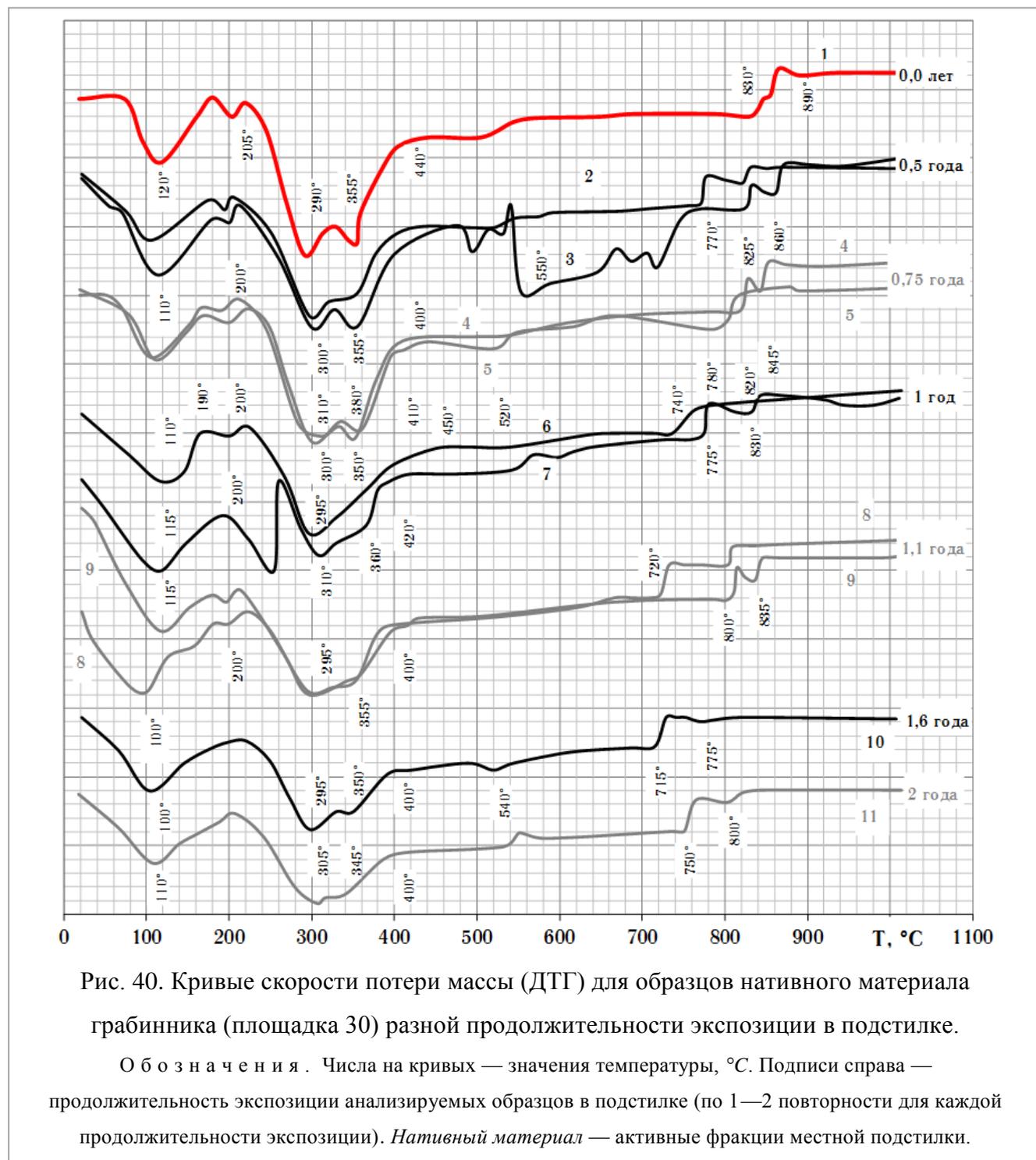


Рис. 40. Кривые скорости потери массы (ДТГ) для образцов нативного материала грабинника (площадка 30) разной продолжительности экспозиции в подстилке.

Обозначения. Числа на кривых — значения температуры, °С. Подписи справа — продолжительность экспозиции анализируемых образцов в подстилке (по 1—2 повторности для каждой продолжительности экспозиции). *Нативный материал* — активные фракции местной подстилки.

На всех кривых ДТГ имеется пик на значениях температуры 100—120°, которому соответствует отчётливый перегиб на кривой ТГ, а также пик или перегиб на кривой ДТА, обозначающий эндотермический эффект, и связанный с потерей гигроскопической влаги. Общая потеря массы в диапазоне 0—200° составляет 11—15,6 % (табл. 39), и включает также потерю части летучих соединений. К последним также относится следующий небольшой пик на кривой ДТГ при температуре ~200°, который отчётливо выражен у исходного образца, и всё менее заметен у образцов большей продолжительности экспозиции.

Следующий перегиб на кривой ДТА, обозначающий снижение экзотермического эффекта, наблюдается на температурах 290—360°. На кривых ДТГ в этом диапазоне выделяются, как правило, два пика с интервалом в 50—60°, которые отчётливо разделяются в исходном образце, но в образцах после года экспозиции и более практически сливаются, и имеют существенно меньшую высоту. Потеря массы в этом диапазоне (200—350°) составляет 19,1—30,5 %, а именно, 26,7—30,5 % у образцов, которые разлагались менее года, и 19,1—22,4 % — у тех, что экспонировались в подстилке более года. Потеря массы в этом диапазоне вызвана деструкцией

Табл. 39. Потеря массы образцов нативного материала в процессе термического разложения, по интервалам температур.

О б о з н а ч е н и я . ПМ макс. — максимальная потеря массы, % от исходной навески; Период эксп. — продолжительность экспозиции анализируемого образца в подстилке, годы; ОМ разл. — остаток массы образца после разложения в подстилке.

№ обр.	ПМ макс., %	Потеря массы в интервалах температур, % (в скобках — температура вершины эффекта по кривой ДТГ)						Период эксп., годы	ОМ разл., %
		0—200°	200—350°	350—400°	400—500°	500—750°	750—1000°		
1	98,98	15,1 (120°)	28,4 (205°) (290°)	11,6 (355°)	12,2 (~440°)	22,4	9,2 (830°) (890°)	0,00	100,0
2	95,75	11,0 (110°)	30,5 (200°) (300°)	10,5 (355°)	13,8 (~400°)	25,0	4,5 (770°) (825°)	0,49	81,8
3	99,56	14,3 (115°)	30,3 (200°) (300°)	9,2 (355°)	12,5 (~400°)	24,0 (550°)	9,2 (825°) (860°)		76,8
4	99,56	12,7 (110°)	27,3 (190°) (310°)	11,8 (350°)	12,9 (~410°)	26,4	8,4 (820°) (845°)	0,75	74,8
5	96,89	13,6 (110°)	26,7 (200°) (300°)	11,8 (381°)	12,9 (~410°)	25,6 (520°)	6,7 (780°)		72,3
6	82,22	15,6 (115°)	22,9 (200°) (295°)	7,8	11,6 (~450°)	22,4 (740°)	2,0	0,99	51,6
7	89,56	13,6 (115°)	25,6 (310°)	8,7 (360°)	12,2 (~400°)	24,7	4,9 (775°) (830°)		65,4
8	70,67	12,0 (100°)	20,0 (200°) (295°)	7,1 (355°)	10,7 (~400°)	20,0 (720°)	0,7 (800°)	1,11	34,1
9	87,78	13,1 (115°)	22,4 (195°) (295°)	10,7 (350°)	11,3 (~400°)	22,2	7,1 (800°) (835°)		45,5
10	77,11	12,7 (100°)	21,1 (295°)	7,8 (350°)	11,1 (~400°)	20,0 (715°)	4,0 (775°)	1,57	33,0
11	72,22	12,0 (110°)	19,1 (305°)	7,8 (345°)	10,7 (~400°)	20,4	2,2 (750°) (800°)	2,02	35,0

наименее устойчивых соединений, главным образом — целлюлоз. Кроме того, предполагается, что в этом диапазоне происходит разложение оксалата кальция, которая сопровождается эндотермическим эффектом при температуре 200—250°.

В диапазоне 350—400° термические эффекты и потеря массы могут быть связаны с деструкцией наиболее устойчивых целлюлоз, а также продуктов разложения лигнина. Характерно, что в этом диапазоне не столь велико различие потери массы у образцов разной степени разложенности.

По мере дальнейшего повышения температуры наблюдается экзотермический эффект, и скорость изменения массы в этом диапазоне довольно равномерна. Считается (Chen, Chang, 1985), что экзотермический эффект в диапазоне от 400—500° до 750—900° обусловлен разрывом связей в боковых цепях структуры лигнина. Потеря массы в этом диапазоне составляет 12,2—13,8 % у образцов, экспонированных менее года, и 10,7—12,2 % — у образцов, разлагавшихся год и более.

По достижении температуры ~ 520° кривые ДТА и ДТГ выполаживаются и идут относительно равномерно; максимум экзотермического эффекта по кривой ДТА наблюдается при значениях температуры между 500 и 600°. Этот эффект завершается при температурах 720—840° резким спадом выделения энергии, который, в целом, наступает тем раньше, чем продолжительнее был период экспозиции анализируемого образца.

### ***Интерпретация результатов термического анализа***

Считается, что термическое разложение лигнина происходит в основном в температурном интервале 400—600°, а разложение целлюлоз — при более низких температурах, например, разложение гемицеллюлоз, относительно устойчивых, обуславливает термический эффект при 290° (Anghem-Bettinazzi et al., 1988). Те же авторы отмечают, что характер термограмм не слишком чувствителен к водорастворимым и спирторастворимым соединениям. При температурах более 600° происходит диссоциация карбонатов, как изначально присутствовавших в образце, так и образовавшихся в ходе разложения оксалата кальция и других соединений, обуславливающая соответствующий термический эффект (Орлов, 1974).

В условиях вакуума термическое разложение целлюлозы происходит при температурах 200—400°, причём на диапазон 200—250° приходится в основном деполимеризация, а собственно пиролиз — при температуре ~350° (Hirata et al, 1991).

Таким образом, по потере массы в диапазонах 200—350 и 350—400° можно оценить содержание целлюлоз, а в диапазонах 400—500 и 500—750° основная потеря массы приходится на лигнин. Следует иметь ввиду, что часть потери массы, условно относимой на счёт целлюлозы, может в действительности приходиться на другие компоненты, разлагающиеся при тех же температурах, что и наиболее устойчивые из целлюлоз, например, оксалаты кальция. Так, на

полученных кривых ДТГ имеется пик при температуре ~300—310°, за которым, с интервалом в ~60°, следует ещё один пик, который в образцах с большей продолжительностью экспозиции выделяется всё менее отчётливо.

В табл. 40 представлены величины содержания компонентов в образцах различной степени и продолжительности разложения. Если считать, что потеря массы в диапазоне 200—400° соответствует целлюлозе, а в диапазоне 400—750° — лигнину, можно вычислить, что содержание целлюлозы в исходном образце (№ 1) составляет 40 %, затем закономерно снижается по мере разложения. Содержание лигнина в обр. 2—5 возрастает за счёт относительного накопления вследствие расхода других компонентов, затем также постепенно снижается, однако, его общие потери, как и следовало ожидать, меньше по сравнению с целлюлозой — если содержание целлюлозы в образце после двух лет экспозиции (№ 11) снижается почти на треть по сравнению с исходным образцом (№ 1), то содержание лигнина — лишь на одну десятую от его начального содержания (табл. 40). Содержание воды и летучих компонентов снижается лишь на пятую часть, в основном — за счёт летучих компонентов, о чём свидетельствуют формы кривых ДТГ: небольшой пик, заметный на значениях температуры ~200° сглаживается у образцов большей продолжительности экспозиции. Кроме того, обращает на себя внимание существенное увеличение доли несгораемого остатка в образцах высокой степени разложения.

На рис. 41 представлена динамика изменения массы образцов в процессе разложения в подстилке (остаток массы  $OM_T$  каждого образца в процентах от его начальной массы) и динамика изменения массы отдельных компонентов (остаток массы компонента в образце в процентах от общей начальной массы образца).

Табл. 40. Содержание компонентов (%) в образцах нативного материала, отобранных после разной продолжительности экспозиции в подстилке, оценённое по потере массы в интервалах температур в процессе термического разложения.

№ образца	Продолжительность экспозиции в подстилке, годы	ОМ после разложения в подстилке, %	Вода и летучие соединения (до 200°), %	Целлюлозы (200—400°), %	Лигнин (400—750°), %	Прочее (750—1000°), %	Несгораемый остаток, %
1	0,00	100,0	15,1	40,0	34,7	9,2	1,0
2, 3	0,49	81,8	12,6	40,3	37,6	6,9	2,3
4, 5	0,75	74,8	13,1	38,8	38,9	7,6	1,8
6, 7	0,99	51,6	14,6	32,4	35,4	3,4	14,1
8, 9	1,11	34,1	12,6	30,1	32,1	3,9	20,8
10	1,57	33,0	12,7	28,9	31,1	4,0	22,9
11	2,02	35,0	12,0	26,9	31,1	2,2	27,8

Здесь отчётливо видно, что кривая общего остатка массы и кривая остатка массы сгорающих компонентов существенно расходятся по мере увеличения продолжительности экспозиции материала в подстилке. Эту разницу составляет несгораемый остаток, который, как следует из графика, практически отсутствует в исходных образцах, но появляется в образцах после длительной экспозиции в подстилке. Этот несгораемый остаток есть ни что иное, как минеральные примеси, поступающие из верхних горизонтов почвы и загрязняющие образец. В ходе обработки образцов, отобранных после длительной экспозиции, в них действительно отмечалось наличие минерального материала в виде налёта на поверхности частиц детрита и иногда — в виде небольших почвенных агрегатов.

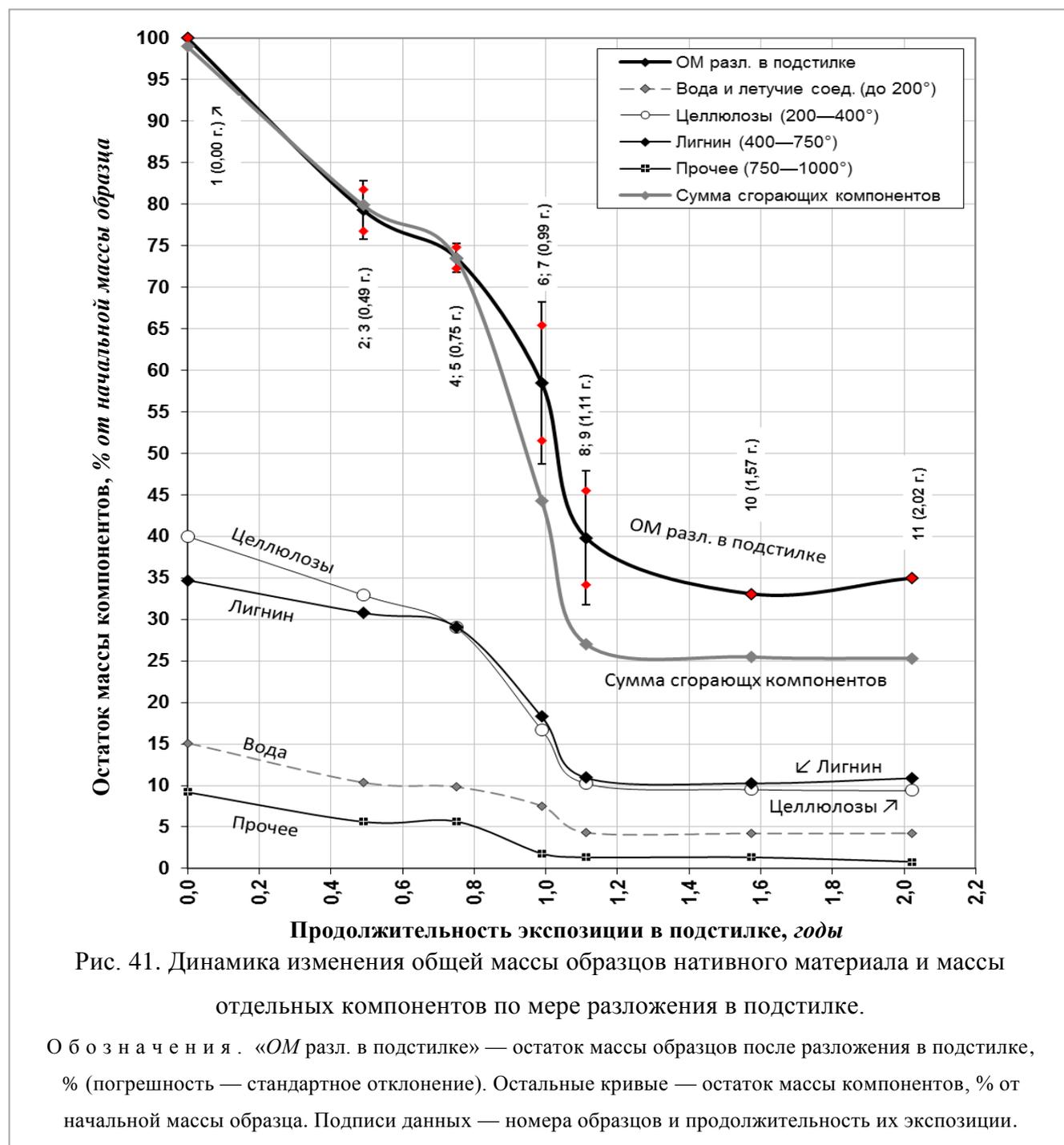


Рис. 41. Динамика изменения общей массы образцов нативного материала и массы отдельных компонентов по мере разложения в подстилке.

Обозначения. «ОМ разл. в подстилке» — остаток массы образцов после разложения в подстилке, % (погрешность — стандартное отклонение). Остальные кривые — остаток массы компонентов, % от начальной массы образца. Подписи данных — номера образцов и продолжительность их экспозиции.

Поскольку для материала каждой имеющейся продолжительности экспозиции термический анализ был выполнен не более чем в двух повторностях, каждая из которых представляла собой отдельный стандартизированный образец, статистические параметры, используемые для оценки воспроизводимости, не могут быть рассчитаны. Однако С. Я. Трофимов с соавт. (1999) отмечают, что результаты термического анализа еловой хвои в трёх повторностях характеризуются очень высокой воспроизводимостью — коэффициенты вариации по каждому диапазону температур не превышают 8,7 %.

### ***Заключение***

Термический анализ позволяет получить достаточно подробную характеристику изменения содержания компонентов в ходе разложения растительного материала. Анализ позволяет получить представление не только о содержании лигнина и целлюлозы, которые составляют бóльшую часть массы образцов растительного детрита и используются в качестве маркеров в исследовании разложения, но также и о содержании воды и негоряемого минерального остатка. Важно отметить, что для получения всех указанных сведений достаточно одной небольшой навески, в то время как выполнение всех соответствующих анализов по отдельности может оказаться неоправданно трудоёмким процессом, а для образцов высокой степени разложенности, утративших бóльшую часть массы — и вовсе невозможным.

При интерпретации результатов анализа следует иметь в виду, что отнесение потери массы в тех или иных интервалах на счёт разложения лигнина, целлюлозы, или других компонентов носит условный характер, однако, учитывая сложный состав растительного материала и химическое многообразие веществ, объединяемых под общими названиями типа «лигнин» и «целлюлозы», получение данных об общем содержании относительно устойчивых и относительно неустойчивых компонентов представляется весьма информативным результатом анализа в контексте изучения процессов разложения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании последовательного изучения взаимосвязанных процессов поступления опада, его разложения, и формирования подстилок удалось не только сделать выводы об особенностях функционирования исследуемых БГЦ, но и опробовать новые вариации соответствующих методов и подходов, а также сформулировать некоторые теоретические положения.

Так, в развитие теории **детритогенеза** по М. А. Глазовской, предложено расширенное и уточнённое определение этого основополагающего понятия (см. с. 16). Подчеркнём, что данное определение сложилось в ходе комплексных исследований на различных объектах, включая зональные и интразональные сообщества, а также уникальные биогеоценозы лизиметров и Ботанического сада МГУ.

В процессе наблюдений за поступлением **растительного опада** были опробованы и оценены различные варианты методов его отбора, и эти данные, несомненно, будут использованы автором и коллегами, а возможно — и другими исследователями, при планировании новых наблюдений. Были оценены различия в эффективности отбора отдельных фракций опада разными опадоуловителями; кроме того, было показано, что есть принципиальная разница между *поступлением* опада и его *накоплением* на поверхности почвы после перераспределения ветром. Значения этих величин следует получать разными способами и интерпретировать в соответствии с целями задачами того или иного наблюдения.

Кроме того, впервые получены подробные многолетние данные по поступлению опада и его отдельных компонентов (фракций) для модельных экосистем Ботанического сада МГУ и лизиметров почвенного стационара, которые также могут быть использованы в целях интерпретации данных других исследований на этих объектах. В настоящее время режимные наблюдения за растительным опадом продолжаются.

Получены результаты, характеризующие перенос опада, являющийся специфической особенностью модельных фитоценозов небольшой протяжённости. Оказалось, что перенос опада имеет значительные масштабы в БГЦ малой протяжённости, и в некоторых случаях он может быть количественно оценён с достаточно высокой точностью. Эти результаты особенно интересны с учётом данных о содержании углерода и азота в компонентах опада — показано, что хвойный и лиственный опад существенно различается по величине отношения C/N, но в результате межбиогеоценозного переноса эти различия сглаживаются в *общем* опаде, поступаю-

шем в каждом фитоценозе. Полученные данные о влиянии переноса опада на скорость разложения местного детрита пока недостаточны, чтобы точно оценить меру этого влияния на процессы разложения в зависимости от количественных характеристик переноса и от состава опада, но эта задача может послужить основой для дальнейших исследований.

Было уделено внимание изучению **строения и запасов подстилок** — важнейшего компонента наземных биогеоценозов. Были представлены результаты, характеризующие особенности распределения фракций и компонентов по профилю подстилки, но в то же время было показано, что подразделение подстилки на подгоризонты порой носит условный характер, поскольку в одном и том же подгоризонте или слое могут содержаться растительные остатки разной степени разложенности, а также органоминеральные и минеральные фракции, и эти компоненты по своим параметрам нередко соответствуют вышележащим или, наоборот, нижележащим подгоризонтам подстилки или горизонтам почвы. Это говорит о необходимости дальнейшего развития и формализации диагностических процедур, с целью обеспечить возможность более объективного и воспроизводимого классифицирования подстилок, поскольку их классификационная принадлежность уже сама по себе несёт ценную информацию об основных особенностях детритогенеза в исследуемом биогеоценозе.

Экспериментальные **исследования процессов разложения** позволили оценить особенности разложения материалов в зависимости от особенностей среды, и на основании этих данных выявить особенности процессов и факторов разложения в БГЦ урбанизированных территорий Ботанического сада МГУ. Подчеркнём, что по каждой группе объектов, включая те, что исследовались в ходе полевых выездов, получены данные за несколько лет, позволяющие охарактеризовать разложение материалов в динамике.

В работе развиваются теоретические и методологические положения о факторах разложения, об их связи с особенностями разлагаемых материалов, и предлагаются некоторые дополнения к соответствующей терминологии. Так, в работе используется понятие об *отклике* процессов разложения на те или иные параметры среды. Так, отклик скорости разложения материала означает, что при отклонении какого-то фактора среды от значений, принятых за типичные или за оптимальные, интенсивность разложения этого материала уменьшается, или, наоборот, увеличивается. Например, было показано, что разложение древесины замедленно в локациях с увлажнением, пониженным по сравнению с тем, что наблюдается в зональных лесах. Вероятно, проведение исследований на большем числе площадок, ещё более различных по гидротермическим и другим параметрам, позволило бы установить оптимальные сочетания условий для разложения каждого материала, а также выявить и количественно оценить зависимость скорости разложения некоторых материалов от наиболее важных факторов их разложения.

Кроме того, в работе развивается представление о внутренних и внешних факторах разложения. Показано, что разные материалы дают разный отклик на одни и те же отклонения параметров среды — *внешние факторы* разложения, и этот отклик может быть не только не пропорциональным, но и не однонаправленным. Так, интенсивность разложения стандартной древесины даёт явный отклик на изменение гидротермических параметров, но не демонстрирует связи с флористическим составом древостоев, в то время как разложение стандартного чая, по всей видимости, слабо реагирует на изменение температуры и влажности, но реагирует на факторы, связанные с растительностью. Таким образом, мера влияния внешних факторов на скорость разложения материалов определяется *внутренними факторами* разложения, связанными с их химическим составом и физическими свойствами.

В работе предлагается название «стандартизированные образцы» для образцов различных материалов, используемых для исследования разложения. Разлагаемые материалы в составе этих образцов предлагается подразделить на стандартные и нативные, в зависимости от наличия ли отсутствия генетической связи или сходства с растительностью исследуемых БГЦ. По результатам исследования разложения материалов оказалось, что применяемые стандартные материалы не отражают реальных процессов разложения местного детрита. Тем не менее, если удастся выяснить, какими факторами контролируется разложение того или иного материала, можно на основании данных его разложении оценить значения самих этих факторов на объекте, для которого они не известны. Так, удалось показать, что разложение древесины коррелирует с климатическими параметрами в зональном ряду, а также непосредственно с географической широтой, и городские территории Ботанического сада по скорости разложения древесины соответствуют, таким образом, местности, расположенной в 153—315 км к югу. Не исключено, что по накоплению достаточного объёма данных для разных материалов в широком диапазоне условий можно будет получить возможность достаточно точно оценивать значения некоторых факторов среды в исследуемых биогеоценозах *посредством* наблюдений за разложением соответствующих материалов.

Интересно, что по сравнению с фоновыми сообществами, разложение нативных материалов в Ботаническом саду не замедленно, как можно было бы ожидать, а, напротив, ускорено. Таким образом показано, что влияние антропогенной нагрузки не обязательно приводит к замедлению разложения местного детрита, как считалось ранее.

Динамика **химического преобразования** нативного материала (активных фракций подстилки), а именно, характер изменения содержания лигнина и целлюлозы, была наглядно проиллюстрирована на основе данных, полученных методом термического анализа (дериватографии), которые позволили подтвердить классически сложившиеся представления о порядке рас-

хода различных компонентов в процессе разложения, согласно которым лигнин остаётся наиболее устойчивым компонентом на всех этапах разложения.

Таким образом, представленное заключение основывается на сочетании методологических поисков и теоретических построений, а также на данных многолетних исследований, проведённых в широком диапазоне условий.

## ВЫВОДЫ

1. Сезонная цикличность поступления опада наиболее выражена в лиственных древостоях и более сглажена в хвойных. В качестве показателя сезонной контрастности поступления опада предлагается использовать отношение поступления опада за листопадный период к годовой сумме опада. По общим величинам поступления опада и его фракций исследуемые городские фитоценозы близки к естественным, описанным в литературе, за исключением ельника БС МГУ, где поступление опада существенно выше. Для фитоценозов лизиметров характерна относительно высокая доля активных фракций в опаде.

2. Вынос опада из фитоценозов Ботанического сада МГУ на смежные территории или в соседние фитоценозы оценивается в 13—65 % от общего поступления, в зависимости от его компонентного состава и направления переноса, а доля перенесённого опада от общего в некоторых ФЦ достигает 27 %. Перенос опада приводит к сближению отношения C/N в общем опаде, поступающем в хвойных и лиственных ФЦ. Поступление в хвойные экосистемы легкоминерализуемого листового опада, характеризующегося более высоким содержанием азота, является одним из факторов наблюдаемого увеличения скорости разложения детрита.

3. В **лиственных** БГЦ Ботанического сада МГУ преобладают деструктивные подстилки, в смешанных и лиственных БГЦ лизиметров встречаются также ферментативные; круговорот органического вещества варьирует от интенсивного (*ПОК* 0,77—1,44) до заторможенного (*ПОК* 1,98), и в этом отношении данные БГЦ близки к естественным, описанным в литературе. Подстилки **хвойных** БГЦ варьируют от деструктивных до гумифицированных; круговорот также варьирует от интенсивного до заторможенного: *ПОК* составляет 3,5—4,6 в лиственничнике, 1,6—2,4 в сосняке, 0,9—2,7 в ельнике. Таким образом, в ельнике и сосняке скорость круговорота существенно выше по сравнению с естественными БГЦ, где *ПОК* может составлять 8—16.

4. Установлено, что разложение стандартизированной **древесины** и **целлюлозы** в зональном аспекте контролируется преимущественно гидротермическими факторами. В БГЦ БС МГУ разложение этих материалов замедленно по сравнению с фоновыми, и протекает с интенсивностью, характерной для лесов лесостепной зоны. Разложение **нативных материалов** в БГЦ БС МГУ в целом ускорено по сравнению с фоновыми, более всего — в ельнике и грабиннике.

5. Влияние косвенной антропогенной нагрузки (на примере БГЦ лизиметров и Ботанического сада МГУ) приводит к значительному ускорению разложения подстилок в хвойных БГЦ, и, в меньшей степени — также и в лиственных БГЦ, что отчасти объясняется взаимодействием хвойного и листового опада, активно переносимого между БГЦ, отчасти — отличием гидро-термических факторов. Несмотря на крайне интенсивный вынос опада из фитоценозов, его фактическое поступление на поверхность почвы схоже с таковым в естественных сообществах, или даже превышает его.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абросимова Г. В.* Формирование микроэлементного состава и свойств почв в условиях города под модельными фитоценозами (на примере лизиметров почвенного стационара МГУ). Дисс. к. б. н. — М.: МГУ. — 2016.
2. *Анохина Н.А., Завгородняя Ю.А., Богатырев Л.Г. и др.* Динамика содержания ароматических кислот в биогеоценозах стационарных почвенных лизиметров // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2018. — № 4. — С. 3—10.
3. *Антонова И. И., Жилин Н. И., Земсков Ф. И. и др.* Биогеохимические процессы в условиях стационарных почвенных лизиметров // Материалы международной научной конференции XX Докучаевские молодёжные чтения «Почва и устойчивое развитие государства». — СПб: СПбГУ. — 2017. — С. 284—285.
4. *Аристовская Т. В.* Микробиология процессов почвообразования. — Л.: Наука. — 1980.
5. *Бабенко А. С.* Особенности жизненного цикла стафилинид — обитателей лесной подстилки на юге Западной Сибири. // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. Матер. Всесоюз. совещ. — М.: Наука. — 1984. — С. 13—14.
6. *Баженов В. И.* Материалы для швейных изделий: Учебник для сред. спец. учеб. заведений. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Легкая и пищевая пром-сть. — 1982. — 312 с., ил.
7. *Базилевич Н. И.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных экосистемах / *Н. И. Базилевич, А. А. Титлянова.* — Новосибирск: СО РАН. — 2008. — 66 с.
8. *Базилевич Н. И., Родин Л. Е.* Типы биологического круговорота зольных элементов и азота в основных природных зонах северного полушария. // Генезис, классификация и картография почв СССР, Докл. к VIII Междунар. конгр. почвоведов. — М. — 1964.
9. *Базилевич Н. И., Титлянова А. А., Смирнов В. В. и др.* Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. — М.: «Мысль». — 1978. — 183 с. — Стр. 75—79.
10. *Башкин В. Н., Касимов Н. С.* Биогеохимия. — Научный мир Москва, 2004. — 648 с.
11. *Бедемар, Варгас де.* Изслѣдованія запаса и прироста лѣсонасажденій С. Петербургской губерніи ... съ 1843 по 1848 годъ. — СПб.: Императорское Вольн. экон. общ. — 1850.

12. Биологический энциклопедический словарь / глав. ред. М. С. Гиляров. — М.: Советская энциклопедия. — 1986.
13. Бирюков М. В., Рыжова И. М., Гунина А. А. и др. Оценка уровня стабилизации органического вещества в условиях почвенных лизиметров. // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. — 2014. — Т. 17, № 2. — С. 9—15.
14. Богатырев Л. Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. — М.: Наука. — 1990. — № 3. — С. 118—127.
15. Богатырев Л. Г. О роли гетерогенности подстилок в функционировании лесных биогеоценозов. // Общие проблемы биогеоценологии. — М.: АН СССР. — 1986. — С. 227—229.
16. Богатырев Л. Г. Образование подстилок — один из важнейших процессов в лесных экосистемах // Почвоведение. — 1997. — №4. — С. 501—512
17. Богатырев Л. Г. Основные концепции, законы и принципы современного почвоведения. — М.: Макс Пресс. — 2015. — 195 с.
18. Богатырев Л. Г. Перенос растительного опада в тундровых биогеоценозах. Вестник МГУ, сер. VI, биология, почвоведение. — 1975. — № 2. — С. 91—94.
19. Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И., Земсков Ф. И. и др. О динамике растительного опада и составе лизиметрических вод в условиях стационарных почвенных лизиметров // Естественные и технические науки. — 2015. — № 11. — С. 148—151.
20. Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И., Земсков Ф. И. и др. Типология лесных подстилок некоторых типов насаждений ботанического сада МГУ имени М. В. Ломоносова (ленинские горы). // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2019. — № 2. — С. 3—19.
21. Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И., Земсков Ф. И. Опыт исследования процессов детритогенеза в условиях различных экосистем. // Естественные и технические науки. — 2018. — № 12. — С. 64—66.
22. Богатырев Л. Г., Владыченский А. С., Чернов Н. М. и др. По природным зонам СССР (методическое руководство по учебной зональной практике по почвоведению). / Ред. Розанов Б. Г. — М.: Изд-во Моск. ун-та. — 1983. — 185 с.
23. Богатырев Л. Г., Воронина М. М., Широкова А. Г. О некоторых аспектах изучения лесных подстилок // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием по лесному почвоведению «Экологические функции лесных почв в естественных и нарушенных ландшафтах» (памяти проф. В.В. Никонова). — Ч. 2. — Апатиты, 2011. — С. 77—81.

24. *Богатырев Л. Г., Демаков Ю. П., Исаев А. В. и др.* Структурно-функциональная организация подстилок в борах Марийского Заволжья // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2019. — № 1. — С. 3—9.
25. *Богатырев Л. Г., Жилин Н. И., Самсонова В. П. и др.* Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмосковья // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2018. — № 2. — С. 85—96.
26. *Богатырев Л. Г., Земсков Ф. И.* Methods of studying of detritogenesis processes in model phytocenoses // Ecological Studies, Hazards, Solutions. — 2018. — Vol. 25. — P. 80.
27. *Богатырев Л. Г., Земсков Ф. И., Вартанов А. Н. и др.* Детритогенез — классификация и методические подходы к изучению // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). Доклады Всероссийской научной конференции, Москва, 18-20 октября 2016 г / Под ред. Н. Е. Кошелева, П. П. Кречетов. — Т. 32. — Москва. — 2016. — С. 122—124.
28. *Богатырев Л. Г., Земсков Ф. И., Жилин Н. И., Бенедиктова А. И.* Лесные подстилки — достижения и проблемы. // Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции. — М.: ЦЭПЛ РАН. — 2018. — С. 179—181.
29. *Богатырев Л. Г., Малинина М. С., Самсонова В. П., и др.* Особенности морфогенеза детритопрофилей малоизученных экосистем Приохотья. // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та. — 2014. — № 1. — с. 3—8.
30. *Богатырев Л. Г., Погожева Е. А., Бенедиктова А. И. и др.* О современном функционировании стационарных почвенных лизиметров в условиях крупного мегаполиса Москва. // Материалы II Международной научной конференции Современные исследования в естественных науках. — Владивосток, 2015. — С. 59—63.
31. *Богатырев Л. Г., Телеснина В. М.* Словарь терминов и показателей, используемых при изучении биологического круговорота. / Под ред. А. С. Владыченского. — М.: МАКС Пресс. — 2010.
32. *Богатырев Л. Г., Флесс А. Д.* О строении и классификации подстилок в лесных БГЦ Северной Тайги // Роль подстилки в лесных БГЦ. Тезисы всесоюзного совещания по подстилкам. — М.: Наука — 1983. — С. 22.
33. *Богатырев Л. Г., Фомина Т. В.* Диагностика нижних горизонтов лесных подстилок // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 1990. — № 1. — С. 54—56.
34. *Богатырев Л. Г., Цветнова О. Б., Цветнов Е. В., Щеглов А. И.* Характеристика детритопрофилей в некоторых типах экосистем Южного Сахалина. // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. М.: Изд-во Моск. ун-та. — 2016. — № 1. — с. 10—17.
35. *Богатырев Л. Г., Щенина Т. Г., Дуженко В. С.* Формальные критерии для классификации лесных подстилок. // Почвоведение. — 1993. — №2. — С. 57—69.

36. Большая советская энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия. — 1969—1978. — Хреновской бор.
37. Буйволова А. Ю. Трансформация естественных лесных экосистем города Москвы на примере природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино». Дисс. к. б. н. — М.: МГУ. — 2016.
38. Бяллович Ю. П. Системы биогеоценозов // Проблемы биогеоценологии. — М.: Наука. — 1973. — С. 37—46.
39. Ванин А.И. Редкие травянистые и кустарниковые растения — памятники природы в Хреновском бору / Памятники природы Воронежск. обл. — Воронеж. — 1970. — С. 120—124.
40. Верховец И. А. Почвообразование на покровном суглинке под различными ценозами (лесными, луговыми и сельскохозяйственными). Дисс. к. с.-х. н. — М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. — 2005.
41. Вильямс В.Р. Избранные сочинения. М.: Моск. рабочий, 1950. — 459 с.
42. Винник М. А., Большев Н. Н. Первые итоги наблюдений в открытом лизиметре // Почвоведение. — 1972. — №4. — С. 114—121.
43. Воробейчик Е. Л. Количественные показатели пространственной структуры для биогеоценологических исследований наземных экосистем. // Экология. — 1986. — № 2. — с. 94.
44. Гаель А.Г., Сафарова С.А, Маланьин А.Н. К палеогеографии Хреновского бора / Биологические науки. — № 12. — 1974. — С. 118—124
45. Герасимов И. П. Генетические, географические и исторические проблемы современного почвоведения. — М.: «Наука». — 1976.
46. Герасимова М. И. Строганова М. Н. Можарова Н. В. Прокофьева Т. В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. — Смоленск: Ойкумена. — 2003. — 268 с.
47. Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов (учебное пособие). — М.: изд. Моск. унив. — 1964. — 223 с., илл.
48. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР: Учеб. пособие для студ. геогр. спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1988. — 328 с.: ил.
49. Глазовская М. А., Добровольская Н. Г. Геохимические функции микроорганизмов. — М.: Изд. Моск. унив. — 1984. — 153 с., илл.
50. Глинка К.Д., Сибирцев Н.М. Хреновская казенная дача с соседней степью. Орогидрография, геология, почвы, грунтовые воды // Тр. экспедиции, снаряженной лесн. департ., под рук. проф. Докучаева. — Т. 1. — Вып. 2. — 1894.
51. Горная энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия. / Под редакцией Е. А. Козловского. — 1984—1991.

52. *Горчаковский А. Л., Андряшкина К. Н.* Изучение первичной продуктивности сообществ лесотундры на стационаре Харп. // *Ресурсы биосферы.* — 1975. — вып. 1. — С. 25—33.
53. *Горячкина И.С., Рахлеева А.А., Строганова М.Н., Раппопорт А.В.* Мезофауна почв ботанических садов (на примере Москвы и Санкт-Петербурга) // *Вестник МГУ. Сер. 17, почвоведение.* — 2003. — № 4. — С. 33—40.
54. *Гришина Л. А.* Защитная роль подстилки при атмосферном загрязнении лесных почв. — В кн.: *Роль подстилки в биогеоценозах.* — М.: Наука. — 1983.
55. *Гришина Л.А.* Гумусообразование и гумусное состояние почв. — М.: Изд-во Московского университета. — 1986 — 242 с.
56. *Губанов И.А., Киселёва К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н.* Определитель сосудистых растений центра европейской России. — 2-е изд., дополн. и перераб. — М.: Аргус. — 1995. — 560 с. — ISBN 5-85549-061-0.
57. *Гуман В.В.* Влияние рельефа и почвенно-грунтовых условий на рост леса в пределах Хреновской дачи Воронежской губернии. // *Лесной журнал* — 1913. — Вып. 5. — С. 810—843.
58. Двадцать пять лет научно-педагогической и общественной деятельности Б. А. Келлера (1902—1927). Юбилейный сборник / Под ред. *А. Я. Гордягина.* — Воронеж. — 1931, с. 23—28.
59. *Дмитриев Е. А.* Почва и почвоподобные тела. // *Почвоведение.* — 1996. — №3. — С. 310—319.
60. *Добровольский Г. В., Никитин Е. Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах. — М.: Наука. — 1990. — 261 с.
61. *Добровольский Г. В., Никитин Е. Д.* Экология почв. Учение об экологических функциях почв. — М.: МГУ. — 2012. — 413 с.
62. *Добровольский Г.В.* Почвы речных пойм центра Русской Равнины. — М.: Изд-во МГУ. — 1968. — 295 с.
63. *Долобовская А. С.* Характер биогенной аккумуляции микроэлементов в лесных подстилках. // *Почвоведение.* — 1975. — № 3. — С. 63—72.
64. *Дымов А. А.* Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор). // *Почвоведение.* — 2017 — № 7. — С. 787—798.
65. *Дынин Б.* Эксперимент. // *Философская энциклопедия. (В 5 т.) / Под редакцией Ф. В. Константинова.* — М.: Советская энциклопедия. — 1970. — Т. 5. — С. 546.
66. *Дюшофур Ф.* Основы почвоведения. Эволюция почв (опыт изучения динамики почвообразования). / Под ред. акад. И. П. Герасимова. — М.: «Прогресс». — 1970. — 591 с.

67. Земсков Ф. И. Динамика растительного опада в условиях стационарных почвенных лизиметров // Материалы международной научной конференции «XVII Докучаевские молодежные чтения». — СПб.: СПбГУ. — 2014.

68. Земсков Ф. И. Почвенные лизиметры: взаимодействие фитоценозов и перенос веществ. // Тезисы докладов XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», секция «Почвоведение». — М.: МАКС Пресс. — 2015. — С. 63—64.

69. Земсков Ф. И., Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И. и др. О современных особенностях функционирования стационарных почвенных лизиметров. // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. — М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева. — 2017. — С. 87—88.

70. Земсков Ф. И., Богатырев Л. Г., Вартанов А. Н. Проблемы исследования структурно-функциональной организации лесных подстилок различных природных зон. // Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции. — М.: ЦЭПЛ РАН. — 2018 (а). — С. 49—51.

71. Земсков Ф. И., Жилин Н. И. Детритогенез в современных условиях почвенных лизиметров МГУ. // Первая открытая конференция молодых учёных почвоведение: горизонты будущего. 16-17 февраля 2017 г. Материалы докладов. — М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева. — 2017. — С. 136—140.

72. Земсков Ф. И., Жилин Н. И., Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И. Стационарные почвенные лизиметры как объект геоэкологических исследований. // Труды V Международной научно-практической конференции Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование. — М.: Буки-Веди, 2017. — С. 143—149.

73. Земсков Ф. И., Ильичёв И. А., Воропанов М. Г. Использование стандартных образцов различных материалов для изучения процессов разложения в различных фитоценозах. // Материалы международной научной конференции XXII Докучаевские молодёжные чтения «Почва как система функциональных связей в природе». — СПбГУ. — 2019. — С. 218—220.

74. Земсков Ф. И., Лукин М. В. Методические особенности исследования процессов разложения в лесных подстилках на основе использования стандартизированных образцов. // Материалы международной научной конференции «XXIII Докучаевские молодежные чтения». — СПб.: СПбГУ. — 2020.

75. Земсков Ф. И., Маслов М. Н., Богатырев Л. Г. Использование понятия *детритопрофиль* при морфологическом исследовании подстилок в условиях наземных экосистем различной степени заболоченности. // Материалы всероссийской с международным участием десятой школы молодых учёных «Болота и биосфера», 17—21 сентября 2018 г. — Тверь: Центр инже-

нерной печати, Тверской Государственный Технический Университет. — 2018 (6). — С. 163—166.

76. *Земсков Ф. И., Рыжиков И. С.* Сравнение различных модификаций опадоуловителей и особенности интерпретации данных. // ЛОМОНОСОВ-2019: XXVI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция Почвоведение: 8—12 апреля 2019 г.: Тезисы докладов. — М. — 2019. — С. 69—70.

77. *Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А., и др.* Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров. // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2017. — № 1. — С. 9—15.

78. *Злотин Р. И., Ходашова К. С.* Роль животных в биологическом круговороте лесостепных экосистем. — М.: Наука. — 1974. — 220 с.

79. *Золотарев Г. В.* Некоторые параметры биологического круговорота в модельных экспериментах почвенных лизиметров (дисс. на соискание уч. ст. канд. биол. н.). — М.: МГУ. — 2006.

80. *Зонн С. В.* Влияние леса на почвы — М.: Изд-во А.Н. СССР. — 1954. — 160 с.

81. *Зонн С. В.* Почва как компонент лесного биогеоценоза. // Основы лесной биогеоценологии (отв. ред. В. Н. Сукачев, Н.В. Дылис). — М.: Наука. — 1964. — С. 372—457.

82. *Зонн С. В., Урушадзе Т. Ф.* Научные основы и методические указания к биогеоценологическому изучению почв горных лесов. — Тбилиси: «Мецниереба». — 1974. — 115 с.

83. *Иванова Е. А., Лукина Н. В., Данилова М. А. и др.* Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения. // Лесоведение. — 2019 — № 6. — С. 533—546.

84. *Игнатенко К. В., Пугачев А. А.* Биологический круговорот в биогеоценозах Охотоморской горной провинции. // Почвоведение. — № 8. — 1980. — С. 43—53.

85. История Сада 1950—2016 (основная территория на Воробьёвых горах) (Интернет-ресурс). — <http://botsad.msu.ru/doc/index.php?ID=96> (28.07.2019, 16:36).

86. *Казимирова Н. И., Морозова Р. М.* Биологический круговорот в ельниках Карелии. — Л.: Наука. — 1973. — 173 с.

87. *Карпачевский Л. О., Воронин А. Д., Дмитриев Е. А. и др.* Почвенно-биогеоценологические исследования в лесных биогеоценозах. — М.: Изд-во Моск. ун-та. — 1980. — 160 с., с ил.

88. *Карпачевский Л. О., Киселева Н. К.* О методике учёта опада и подстилки в смешанных лесах. // Лесоведение, 1968, № 3. — С.73—79.

89. *Карпачевский Л. О., Морозов А. И.* Вертикальное строение биогеоценозов. // Почвоведение. — 1994. — №2. — С. 119—124.

90. *Карпачевский Л. О.* Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность / Л.О. Карпачевский. — 1981. — С. 76—199.
91. *Карпачевский Л.О.* Динамика свойств почвы. — М.: ГЕОС. — 1997. — 169 с.
92. *Карпачевский Л.О.* Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. — М.: Изд-во Моск. ун-та. — 1977. — 312 с.
93. *Карпачевский Л.О.* Экологическое почвоведение. — М.: ГЕОС. — 2005. — 336 с. — ISBN 5-89118-388-9.
94. *Кауричев И. С., Александрова Л. Н., Панов Н. П. и др.* Почвоведение. / Под ред. И. С. Кауричева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Колос. — 1982. — 496 с., ил.
95. *Кин Н. О. Зайцев М. Л.* Природное разнообразие и вопросы динамики флоры Хреновского бора. // Степи Северной Евразии. Материалы VI междунар. симп. и VIII междунар. шк.-семинара «Геологические проблемы степных регионов» / Под ред. чл.-корр. РАН А. А. Чибилёва. — Оренбург: «Газпромпечатъ». — 2012. — 940 с. — С. 855.
96. *Кириллова Н. П., Силёва Т. М., Ульянова Т. Ю. и др.* Цифровая почвенная карта УОПЭЦ «Чашниково» МГУ им. М. В. Ломоносова. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. — 2015. — № 2. — С. 22—29.
97. Классификация и диагностика почв СССР. — М.: «Колос». — 1977. — 221 с.
98. *Ковда В. А.* Почвы Прикаспийской низменности. — М.—Л.: Изд-во АН СССР. — 1950. — 254 с.
99. *Ковда В. А., Розанов Б. Г. (ред.)* Почвоведение. Учеб. для ун-тов. В 2 ч. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г. Д. Белицина, В. Д. Васильевская, Л. А. Гришина и др. — М.: Высш. шк., 1988. — 400 с., ил.
100. Конвективная буря в Москве: детали, причины, статистика. // GISMETEO.RU (Интернет-ресурс). — 30.05.2017. <https://www.gismeteo.ru/news/klimat/23835-konvektivnaya-burya-v-moskve-detali-prichiny-statistika/> (24.01.2019).
101. *Костенкова А. Ф.* Роль подстилки в биогеохимическом круговороте веществ в хвойно-широколиственных лесах. // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. Тез. докл. Всесоюз. совещ. — М.: Наука. — 1983. — 99 с.
102. *Кошельков С. П.* О формировании и подразделении подстилок в хвойных южнотаежных лесах. // Почвоведение. — 1961. — №10. — С. 19—29.
103. Краткий словарь основных лесоводственно-экономических терминов. — Уссурийск: ПГСХА. — 2005.
104. *Кречетов П.П., Черницова О.В.* Температурный режим почв как фактор биогеохимической миграции элементов. // Геохимия биосферы. — Москва—Смоленск. — 2006. — С. 170—171.

105. *Крупеников И.А.* О законах почвоведения. // Бонитировка, генезис и химия почв Молдавии. — Кишинев: «Штиница». — 1979. — С. 3—9.
106. *Леонтьева Ю. Д., Крылова Н. А., Большакова В. В. и др.* Особенности организации лесных подстилок в условиях Ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова. // Материалы международной научной конференции XXI Докучаевские молодёжные чтения «Почвоведение - мост между науками». — СПб: СПбГУ. — 2018. — С. 61—63.
107. Лесная энциклопедия: В 2 т. / *Гл. ред. Г. И. Воробьев.* — М.: Сов. энцикл., 1985—1986. — Т. 2: Лимонник — Ящерицы. — 1986. — 631 с.
108. *Лукина Н. В., Горбачева Т. Т., Никонов В. В., Лукина М. А.* Пространственная изменчивость кислотности А1-Fe-гумусовых подзолов. // Почвоведение. — 2002. — № 2. — с. 163—176.
109. *Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А.* Питательный режим почв северотаёжных лесов / Отв. ред. Л.О. Карпачевский. — М.: Наука. — 2008. — 342 с. — ISBN 978-5-02-035585-9 (в пер.).
110. *Макаренко А. К., Рыжиков И. С., Земсков Ф. И.* Перераспределение и межбиогеоценозный перенос растительного опада в модельных лесных экосистемах ботанического сада МГУ. // Материалы международной научной конференции «XXIII Докучаевские молодежные чтения». — СПб.: Издательский дом СПбГУ. — 2020.
111. *Макаров О.А., Макаров А.А.* Подходы к оценке риска химического загрязнения городских почв. // Почвоведение. — 2016. — № 9. — С. 1147—1156.
112. *Морозов Г. Ф.* Учение о лесе. — М. — 1926.
113. Научно-прикладной справочник по климату СССР. / Ред. *З. Н. Пильникова.* — Л.: Гидрометеоиздат. — 1990. — Серия 3. — Чч. 1—6. — Вып. 8: Москва и Моск. обл.
114. Научно-прикладной справочник по климату СССР. / Ред. *З. Н. Пильникова.* — Л.: Гидрометеоиздат. — 1990. — Серия 3. — Чч. 1—6. — Вып. 13: Волгоградская обл., Ростовская обл. и др.
115. Научно-прикладной справочник по климату СССР. / Ред. *О. О. Штанникова.* — Л.: Гидрометеоиздат. — 1990. — Серия 3. — Чч. 1—6. — Вып. 28: Калужская обл., Тульская обл. и др.
116. *Никитин В. М., Оболенская А. В., Щеголев В. П.* Химия древесины и целлюлозы. — М.: «Лесная промышленность». — 1978. — 368 с.
117. *Никонов В. В.* Запасы и состав подстилок вторичных сосняков на северном пределе произрастания. // Почвоведение. — № 6. — 1986. — С. 79—88.
118. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения от 13 декабря 2016 года. — 2016. — № 552. — 153 с.

119. О состоянии окружающей природной среды г. Москвы в 1992 г.: Государственный доклад. — М. — 1993. — 166 с.
120. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв. — М.: МГУ — 1974. — 333 с.
121. Орлова М. А., Лукина Н. В., Смирнов В. Э. и др. Плодородие почв еловых лесов Хибинских гор. // Почвоведение. — 2012. — № 6. — с. 682—694.
122. Осипов А. Ф., Тужилкина В. В., Дымов А. А., Бобкова К. С. Запасы фитомассы и органического углерода среднетаежных ельников при восстановлении после сплошнолесосечной рубки. // Известия РАН. Серия Биологическая. — 2019. — № 2. — С. 215—224.
123. Остроумов С. А., Демина Л. Л. Роль биогенного детрита водных систем в аккумуляции металлов и металлоидов на примере восьми тяжёлых металлов и мышьяка. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2010. — № 1. — С. 60—69.
124. Паулик Ф., Паулик И., Эрдей Л. Дериватограф системы Ф. Паулик, И. Паулик, Л. Эрдей. — Будапешт: Венгерский Оптический завод. — 1980.
125. Первова Н. Е. Изучение процессов почвообразования в длительном эксперименте на лизиметрах. // Агрохимический вестник. — 2014. — № 5. — С. 25—28.
126. Переверзев В. Н. Интенсивность разложения растительных остатков и гумусообразование в почвах Хибинских гор. // Почвоведение. — 1988. — № 2. — С. 68—77.
127. Попова Н. В. Методы использования данных по скорости освобождения химических элементов из подстилки для диагностики устойчивости экосистем. // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2007 (а). — № 1. — С. 19—26.
128. Попова Н. В. Оценка интенсивности процессов трансформации органического вещества подстилки для диагностики устойчивости экосистем. // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2007 (б). — № 1. — С. 27—31.
129. Попова Н. В. Пространственная дифференциация экосистем по диагностическим параметрам напочвенных органогенных горизонтов ландшафтной сферы. — Автореф. дисс. д. геогр. н. — Воронеж: Воронежский гос. ун-тет. — 2012.
130. Попова Н. В. Типизация напочвенных органогенных горизонтов в основных почвенно-фитоценологических экосистемах и индикация их состояния по параметрам деструктивной ветви малого биологического круговорота. — Автореф. дисс. д. б. н. — Владимир: Владимирский гос. ун-тет. — 2018.
131. Попова Н. В., Михно В. Б. Анализ методик диагностики устойчивости экосистем в целях прогноза развития ландшафтов территории России. // Вестник ВГУ, серия: география, геоэкология. — 2012. — № 1. — С. 29—34.
132. Почва., город, экология. / Добровольский Г. В. (ред.). — М.: Фонд За экономическую грамотность. — 1997. — 320 с.

133. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С. и др. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России. // Почвоведение. — 2014. — № 10. — С. 1155—1164. DOI: 10.7868/S0032180X14100104
134. Прокушкин С. Г., Гирс Г. И., Полякова Г. Г. Аккумуляция лесной подстилкой промышленных токсикантов. — В кн.: Роль подстилки в биогеоценозах. — М.: Наука. — 1983.
135. Простая линейная регрессия в EXCEL. // Excel2.ru (интернет-ресурс). <https://excel2.ru/articles/prostaya-lineynaya-regressiya-v-ms-excel#standart-error-slope>.
136. Пугачев А.А. Изменение химического состава опада в ландшафтах кедрового стланика. // Роль подстилок в лесных БГЦ. — М.: — Наука. — 1983. — С. 164—165.
137. Работнов Т. А. Фитоценология: Уч. пос. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 1992. — 352 с.: ил. — ISBN-5—211—02401— X.
138. Раменский Л.Г. О геоботаническом исследовании лугов, болот и водоемов Воронежской губернии 1911—1914 гг. // Материалы по опытному делу Воронежской губернии: Тр. Губернской комиссии по опытному делу. — Воронеж. — 1915. — С. 48—72.
139. Раппопорт А.В. Антропогенные почвы городских ботанических садов (на примере Москвы и Санкт-Петербурга). — Дисс. канд. биол. н. — М. — 2004. — 152 с.
140. Растительность европейской части СССР. — Л.: Наука. — 1980. — 429 с. — Табл. 1—3; рис. 2 и 4.
141. Ремезов Н. П. Итоги изучения взаимодействия дубового леса с почвой. // Труды Воронежского гос. заповедника. — 1961. — Вып. XIII. — С. 9—53.
142. Ремезов Н. П., Быкова Л. Н., Смирнова К. М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах Европейской части СССР. — М.: Изд-во Моск. Ун-та. — 1959.
143. Ремезов Н. П., Погребняк П. С. Лесное почвоведение. — М.: «Лесная промышленность». — 1965. — 324 с.
144. Решетникова Т. В. Формирование органического вещества почвы в культурах основных лесобразующих пород Сибири. дисс. ... к. б. н. — Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. — 2015 .
145. Роде А. А. Почвоведение. / Ред. И. В. Тюрин. — М.: Гослесбумиздат. — 1955. — 524 с.
146. Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности Земного шара. — М.; Л. — 1965.
147. Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. — Л.: «Наука». — 1968.

148. Розанова М. С., Прокофьева Т. В., Лысак Л. В., Рахлеева А. А. Органическое вещество почв Ботанического сада МГУ им. М. В. Ломоносова на Ленинских горах. // Почвоведение. — 2016. — № 9. — с. 1079—1092.
149. Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах. — Минтранс РФ. — 2003 г. — <http://docs.cntd.ru/document/1200032169>.
150. Руководство по комплексному мониторингу. Перевод с английского. — М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». — 2013. — Стр. 128—129 (пункты 7.22.2.1.a и 7.22.2.1.б). [http://downloads.igce.ru/publications/ICP\\_IM\\_Manuals/Manual\\_rus\\_04122013.pdf](http://downloads.igce.ru/publications/ICP_IM_Manuals/Manual_rus_04122013.pdf).
151. Рыжиков И. С., Земсков Ф. И. Динамика поступления растительного опада в фитоценозах ботанического сада. // XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2018. Секция Почвоведение. — М.: Макс Пресс. — 2018. — С. 100—102.
152. Садчиков А. П., Остроумов С. А. Экологическое и трофическое значение детрита в водоёмах. // Рыбное хозяйство. — 2017. — №2. — С. 65—69.
153. Сапожников А. П. К методике определения восстановительной способности подстилок по Лоссену. // Проблемы лесного почвоведения. — М.: Наука. — 1973. — С. 72—82.
154. Сапожников А. П. Лесная подстилка — номенклатура, классификация и индексация. // Почвоведение, 1984, №5.
155. Сапожников А. П. Об использовании признаков лесной подстилки в оценке гумусного состояния почв. // Почвоведение. — 1987. — №9. — С. 26—31.
156. Сахаров М. И. Органический отпад в лесных фитоценозах. // Почвоведение. — 1939. — № 10.
157. Селиванова Г. А. Биогеоэкологическая характеристика лесных подстилок южного Сихотэ-Алиня. // Почвоведение. — 1983. — № 8. — С. 100—110.
158. Селиванова Г. А. Особенности формирования лесных подстилок в горнолесных биогеоценозах. // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. Тез. докл. Всесоюз. совещ. — Красноярск. — 1982. — С. 41—42.
159. Семенюк О. В., Телеснина В. М., Богатырев Л. Г. и др. Оценка внутрибиогеоэкологической изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях. // Почвоведение. — 2020. — № 1. — С. 1—14.
160. Сидоренко И. Эколого-ландшафтные тропы государственного природного заказника федерального значения «Каменная степь» (Интернет-ресурс). — 2017. <https://eco.rosuchebnik.ru/history/ekologo-landshaftnye-tropy-gosudarstvennogo-prirodnogo-zakaznika-federalnogo-znacheniya-kamennaya-st-377333/>

161. Сизов А. П. Медведева О. Е. Клюев Н. Н. и др. О новом подходе к исчислению размера ущерба, вызываемого захламливанием, загрязнением и нарушением городских земель. // Почвоведение. — 2001. — № 6. — С. 732—740.
162. Сеницын Е.М. Естественное возобновление сосняков Усманского и Хреновского боров. — Воронеж: ВГПУ. — 2008. — 308 с.
163. Смагин А. В. Азовцева Н. А. Смагина М. В. и др. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий. // Почвоведение. — 2006. — № 5. — С. 603—615.
164. Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. — М.: «Наука». — 1971.
165. Снакин В. В., Мельченко В. Е., Бутовский Р. О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. — М.: ВНИИприрода. — 1992.
166. Справочник эколого-климатических характеристик Москвы. Т. 2. / Исаева А. А., Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В. и др. — Т. 1; Т. 2. — М.: МГУ. — 2005.
167. Степанов А. Л. Манучарова Н. А. Смагин А. В. и др. Характеристика биологической активности микробного комплекса городских почв. // Почвоведение. — 2005. — № 8. — С. 978—983.
168. Степанов Н. Н. Значение минерализации опадающей листвы и хвои в поднятии производительности почвы. // Журн. «На лесокультурном фронте». — 1932. — № 5—6.
169. Степанов Н. Н. Химические свойства лесной подстилки //Тр. Центр, лесн. опыт, станции. — М.: Сельхозгиз. — 1929. — Вып. 2. — 92 с.
170. Строганова М. Н. Агаркова М. Г. Городские почвы: опыт изучения и систематики (на примере почв юго-западной части г. Москвы) // Почвоведение. — 1992. — № 7. — С. 16—24.
171. Строганова М. Н. Мяжкова А. Д. Прокофьева Т. В. Роль почв в городских экосистемах. // Почвоведение. — 1997. — № 1. — С. 96—101
172. Строганова М. Н. Прокофьева Т. В. Прохоров А. Н. и др. Экологическое состояние городских почв и стоимостная оценка земель. // Почвоведение. — 2003. — № 7. — С. 867—875.
173. Строганова М.Н., Мартыненко И.А., Прокофьева Т.В., Рахлеева А.А. Физико-химические и физико-механические свойства урбанизированных лесных почв // Лесные экосистемы и урбанизация. — М. — 2008. — С. 90—124.
174. Сукачев В.Н., Дылис Н.В. и др. Основные понятия лесной биогеоценологии. // Основы лесной биогеоценологии. — М.: Наука. — 1964. — 574 с.

175. Трофимов С. Я., Толпеица И. И., Соколова Т. А. Опыт изучения растительного материала и органогенных почвенных горизонтов методами термического анализа. // Вестник Моск. Ун-та, серия 17 «Почвоведение». — 1999. — №2.
176. Флора СССР: в 30 т. / гл. ред. В. Л. Комаров. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. — Т. 5 / ред. тома В. Л. Комаров. — С. 258—261.
177. Фокин А. Д., Черникова И. Л., Ибрагимов К. Ш., Сюняев Х. Х. Роль растительных остатков в обеспечении растений зольными элементами на подзолистых почвах // Почвоведение. — 1979. — № 6. — С. 53—61.
178. Функция ЛГРФПРИБЛ // support.microsoft.com (интернет-ресурс).  
<https://support.microsoft.com/ru-ru/office/функция-лгрфприбл-f27462d8-3657-4030-866b-a272c1d18b4b>.
179. Функция ЛИНЕЙН // support.microsoft.com (интернет-ресурс).  
<https://support.microsoft.com/ru-ru/office/функция-линейн-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d>.
180. Хреновской бор // ООПТ России (Интернет-ресурс). —  
<http://oopt.aari.ru/oopt/Хреновской-бор>
181. Частухин В. Я., Николаевская М. А. Биологический распад и ресинтез органического вещества в природе. — Л.: «Наука», Ленингр. отд. — 1969. — 326 с.
182. Частухин В. Я., Николаевская М. А. Биология почв. Исследования по распаду растительных остатков в хвойных лесах. — М.: Гл. упр. по заповедникам Сов. мин. СССР. — 1948. — 220 с.
183. Чернобай Ю. Н. Функциональная характеристика разложения лесных подстилок. // Разложение растительных остатков в почве. М.: Наука. — 1985. — С. 49—67.
184. Чертов О. Г. Имитационная модель минерализации и гумификации лесного опада и подстилки. // Журнал общей биологии. — 1985. — Т. 46. — № 6. — С. 794—804.
185. Чертов О. Г. Экология лесных земель. Л.: Наука. — 1981. — 190 с.
186. Чертов О. Г., Комаров А. С., Надпорожская М. А. и др. (авт.-сост.) Динамическое моделирование процессов трансформации органического вещества почв. Имитационная модель ROMUL: Учебно-метод. пособие. / Науч. ред. Апарин Б. Ф. — СПб.: Изд-во СПбГУ. — 2007. — 96 с.
187. Чертов О. Г., Лянгузова И. В., Кордюкова Е. В. Подвижность тяжелых металлов в загрязненных гумусово-иллювиальных подзолистых почвах. // Почвоведение. — 1985. — №5. — С. 50—56.
188. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. — М.: Недра. — 1978.

189. *Шварцев С. Л.* Общая гидрогеология: Учебн. для вузов — М.: Недра. — 1996. — 423 с., ил.
190. Экологический словарь. — Алма-Ата: «Наука». — ред. Б.А. Быков. — 1983.
191. *Яковлев А.С., Молчанов Э.Н., Макаров О.А. и др.* Научно-правовые аспекты экологической оценки и контроля деградации почв и земель России на основе характеристики их экологических функций. // Почвоведение. — 2015. — № 9. — С. 1124—1130.
192. *Ярошенко П. Д.* Основы учения о растительном покрове. — Гос. изд-во геогр. Литры, — 1953. — С. 259.
193. *Aber J. D., Melillo J. M., McClaugherty C. A.* Predicting longterm patterns of mass-loss, nitrogen dynamics, and soil organic-matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. // Canadian Journal of Botany (Revue Canadienne De Botanique). — 1990. — No. 68. — Pp. 2201—2208.
194. *Adair E. C, Parton W. J., del Grosso S. J. et al.* Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. // Glob. Change Biol. — 2008. — Vol. 14. — Pp. 2636—2660.
195. *Angehm-Bettinazzi C., Lushcer P., Hertz J.* Thermogravimetry as a method for distinguishing various degrees of mineralization in macromorphologically defined humus horizons // Zeit. Pflanzenemahr. Bodenkunde. — 1988. — Vol. 151. — No. 3.
196. *Berg B., Berg M. P., Box E. et al.* Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: Some relationships with climate and litter quality. // Biogeochemistry. — 2013. — Vol. 20(3)/ — Pp. 127—159.
197. *Berg B., Kärenlampi L., Veum A. K.* Comparisons of Decomposition Rates Measured by Means of Cellulose. // Fennoscandian Tundra Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis). / Ed. by Wielgolaski F. E. — 1975. — vol. 16. — Berlin, Heidelberg: Springer.
198. *Berg, B., Erhagen, B., Johansson, M.-B. et al.* Manganese dynamics in decomposing needle and leaf litter — A synthesis. // Canadian Journal of Forest Research. — December 2013. — 43(12): pp. 1127—1136.
199. *Berg, B., Laskowski, R.* Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover. // Advances in Ecological Research. — 2005. — V. 38. — Pp. 292—301.
200. *Berg, B., Rosswall, T.* Microbiology and decomposition studies. Cellulose decomposition. Progress Report 1971. // Swedish IBP Tundra Biome Project Tech. Rep. — 1972. — V. 9. — Pp. 27—31.
201. *Berg, B., Wesson, B. and Ekbohm, G.* Nitrogen level and decomposition in Scots pine needle litter. // Oikos. — 1982. — 38. — Pp. 291—296.

202. *Berg, B., Ågren, G. I.* Decomposition of needle litter and its organic chemical components: theory and field experiments. Long-term decomposition in a Scots pine forest. // III. *Can. J. Bot.* — 1984. — 62. — Pp. 2880—2888.
203. *Beroigui M., Naylo A., Walczak M. et al.* Physicochemical and microbial properties of urban park soils of the cities of Marrakech, Morocco and Toruń, Poland: Human health risk assessment of fecal coliforms and trace elements. // *CATENA.* — 2020. — Vol. 194. — 104673. — ISSN 0341-8162. — DOI: 10.1016/j.catena.2020.104673
204. *Bocock, K.L., Gilbert, O.J.W.,* (1957) The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. // *Plant and Soil.* — vol. 9. — No. 2. — Pp. 179—185. DOI: 10.1007/BF01398924, 1957.
205. *Boddy, L., Owens, E. M., Chapela, I. H.* Small-scale variation in decay-rate within logs one year after felling — effect of fungal community structure and moisture-content. // *FEMSMicrobiol. Ecol.* -- 1989. — 62. — Pp. 173—184.
206. *Bogatyrev L., Berg B., Staaf H.* Leaching of plant nutrients and total phenolic substances from some foliage litters — a laboratory study. // *Swedish Coniferous Forest Project Barrskogslandskapets Ekologi. Technical Report 33.* — Department of Ecology and Environmental Research, Swedish University of Agricultural Sciences, Upsala. — Vol. 33. — 1983. — Pp. 1—57.
207. *Bradford, M. A., Warren, R. J., Baldrian, P. et al.* Climate fails to predict wood decomposition at regional scales. // *Nature Climate Change.* — 2014. — 4. — Pp. 625—630.
208. *Bray J. R., Gorham E.* Litter production in forests of the world. // *Advances in ecological research, 1964.* — Volume 2. — Pp. 101—157.
209. *Burke I. C, Kaye J. P., Bird S. P.* Evaluating and testing models of terrestrial biogeochemistry: the role of temperature in controlling decomposition. // *Models in Ecosystem Science* (eds.: Canham C. D., Lauenroth W. K.). — Princeton, NJ: Princeton University Press. — 2003. — Pp. 225—253.
210. *Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Núñez, S.* (1999) Sonoran Desert productivity and the effect of trap size on litterfall estimates in dryland vegetation. // *Journal of Arid Environments.* — 1999. — 43. — Pp. 459—465
211. *Campanha, M.M., Santos, R.H.S., de Freitas G.B., Prieto Martinez, H.E.* et al. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. // *Agroforestry Systems.* — 2004. — v.63. — No. 1. — Pp. 75—82.
212. *Chen C. L., Chang H. M.* Chemistry of lignin biodegradation. // *Biosynthesis and biodegradation.* — Academic Press. — 1985.
213. *Chen, J. M., Black, T. A.* Defining leaf area index for non-flat leaves. // *Plant Cell Environ.* 15. — 1992. — Pp. 421—429.

214. *Chertov O. G., Komarov A. S.* SOMM: A model of soil organic matter dynamics. // *Ecological Modelling*. — 1997. — No. 94. — Pp. 177—189.
215. *Clarholm, M., Lid-torsvik, V., Baker, J. H.* Bacterial populations of some Fennoscandian tundra soils. // *Fennoscandian tundra ecosystems, Part 1: Plants and microorganisms.* / Ed. by Wielgolaski, F. E. — Berlin-Heidelberg-New York: Springer. — 1975. — Pp. 251—260.
216. *Cornelissen, J. H. C.* An experimental comparison of leaf decomposition rates in a wide range of temperate plant species and types. // *J. Ecol.* — 1996. — No. 84. — Pp. 573—582. doi:10.2307/2261479.
217. *Cornwell W. K., Cornelissen J. H. C., Amatangelo K. et al.* Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. // *Ecology Letters*. — 2008. — No. 11. — Pp. 1065—1071.
218. *Corrigan C., Oelbermann M.* Mass and nutrient loss of leaf litter collecting in littertraps: an in situ and ex situ study. // *Forest Science*. — 2013. — No. 59(4). — Pp. 484—493.
219. *Currie, W. S.; Harmon, M. E.; Burke, I. C.; et al.* Cross-biome transplants of plant litter show decomposition models extend to a broader climatic range but lose predictability at the decadal time scale. // *Global Change Biol.* — 2010. — 16. — Pp. 1744—1761.
220. *Das, P. K.* Decomposition of litter and their effect on physicochemical and microbial properties of soil / P. K. Das, S. Nath, N. Mykhopadhyay, S. K. Banerjee // *Proc. Indian. Nat. Sci. Acad. B.* — 1993. — V.59. — № 5. — P.517—524.
221. *De Silva S., Ball A. S., Indrapala D. V., Reichman S. M.* Review of the interactions between vehicular emitted potentially toxic elements, roadside soils, and associated biota. // *Chemosphere*. — 2021. — Vol. 263. — Art. 128135. — ISSN 0045-6535. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128135
222. *Egli, M., Sartori, G., Mirabella, A. et al.* Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. // *Geoderma*. — 2009. — No. 149. — Pp. 124—136.
223. *Ericsson, H., Eklundh, L., Hall, K., Lindroth, A.* Estimating LAI in deciduous forest stands. // *Agricultural and Forest Meteorology*. — 2005. — 129. — Pp. 27—37.
224. *Foti L., Dubs F., Gignoux J. et al.* Trace element concentrations along a gradient of urban pressure in forest and lawn soils of the Paris region (France). // *Science of The Total Environment*. — 2017. — Vol. 598. — Pp. 938—948. — ISSN 0048-9697. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.111
225. *Freschet, G. T., Aerts, R., Cornelissen, J. H. C.* A plant economics spectrum of litter decomposability. // *Funct. Ecol.* — 2012. — No. 26. — Pp. 56—65.
226. *Fukasawa Y., Osono T., Takeda H.* Small-scale variation in chemical property within logs of Japanese beech in relation to spatial distribution and decay ability of fungi. // *Mycoscience*. — 2005. — No. 46. — Pp. 209—214.

227. *Fuzhong Wu, Wanqin Yang, Jian Zhang, Renju Deng.* Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze–thaw season. // *Acta Oecologica.* — V. 36. — Issue 1. — 2010. — Pp. 135—140.
228. *Gallardo, A., Merino, J.* Leaf decomposition in two Mediterranean ecosystems of Southwest Spain — influence of substrate quality. // *Ecology.* — 1993. — No. 74. — Pp. 152—161. doi:10.2307/1939510.
229. *Garkoti S.C.* (2014) Litter Production and Nutrient Return in Three Different Aged Regenerating White Oak (*Quercus leucotrichophora* A. CAMUS) Forests in the Central Himalaya. // *International Journal of Ecology and Environmental Sciences.* — 2014. — 40 (2—3). — Pp. 139—148.
230. *Gautam, T.P. and Mandal, T.N.* Effect of disturbance on litter dynamics in moist tropical forest of eastern Nepal. // *Our Nature.* — 2016. — 14(1). — Pp. 1991—2951.
231. *Giraldo, J., Jaramillo, R.* Ciclo hidrológico y transporte de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo. // *Cenicafé.* — 2004. — V. 55. — No. 1. — Pp. 52—68.
232. *Gustafson F. G.* Decomposition of the leaves of some forest trees under field conditions. // *Plant Physiology.* — 1943/ — 18(4). — Pp. 704.
233. *Hairiah K., Sulistyani H., Suprayogo D., et al.* Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. // *Forest Ecology and Management.* — 2006. — V. 224. — No. 1. — Pp. 45—57.
234. *Harmon, M. E., Franklin, J. F., Swanson, F. J., Sollins, Ph. et al.* Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. // *Adv. Ecol. Res.* — 1986. — 15. — Pp. 133—302.
235. *Heal, O. W., French, D. D.* Decomposition of organic matter on tundra. // *Soil Organisms and Decomposition in Tundra.* / Ed. by *Holding, A. J., Heal, O.W., Mclean, S.F., Flanagan, P. W.* — Stockholm: IBP Tundra Biome Steering Committee. — 1974. — pp. 279—310.
236. *Hirata T., Nishimoto T.* DSC, DTA and TG of cellulose untreated and treated with flame-retardants. // *Thermochimica Acta.* — 1991. — Vol. 193.
237. *Hobbie S. E.* Contrasting effects of substrate and fertilizer nitrogen on the early stages of litter decomposition. — *Ecosystems.* — No. 8. — Pp. 644—656.
238. *Hopkins D. W.* Carbon Mineralization. // *Soil Sampling and Methods of Analysis, 2<sup>nd</sup> ed.* / Edited by *Carter M. R. Gregorich E. G.* — Taylor & Francis Group. — 2008. — Pp. 589—598.
239. *Jabiol, B., Zanella, A., Ponge, J.-F. et al.* A proposal for including humus forms in the World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO). // *Geoderma.* — 2013. — No. 192. — Pp. 286—294. 10.1016/j.geoderma.2012.08.002.
240. *Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al.* EUROCORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // *Reg. Environ. Change.* — 2014. — No. 14. — Pp. 563—578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2.

241. *Jaramillo-Botero, C., Silva Santos, R.H., Pereira Fardim, M. et al.* Produção de seraphilheira y aporte de nutrientes de espécies arbóreas nativas em um sistema agroflorestal na Zona da Mata de Minas Gerais (Litter production and potential nutrient input of native tree species in an agroforestry system at Zona da Mata, Minas Gerais, Brazil). // *Revista Árvore*, Viçosa-MG. — 2008. — V. 32. — N. 5. — Pp. 869—877.
242. *Jenny, H., S.P. Gessel and F.T. Bingham.* Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical region. // *Soil Sci.* — 1949. — No. 68. — Pp. 419—432.
243. *Jijeesh, C.M., Seethalakshmi, K.K.* Litter deposition, decomposition and nutrient release dynamics of six-year-old. *Ochlandra travancorica* gamble: An endemic reed bamboo of western Ghats. // *Plant Archives.* — 2016. — Vol. 16. — No. 1. — pp. 31—36
244. *Kaushal S. S., Wood K. L., Galella J. G., et al.* Making ‘chemical cocktails’ – Evolution of urban geochemical processes across the periodic table of elements. // *Applied Geochemistry.* — 2020. — Vol. 119. — Art. 104632. — ISSN 0883-2927. — DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104632
245. *Keuskamp J. A., Dingemans B. J. J., Lehtinen T. et al.* Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. // *Methods in Ecology and Evolution.* — 2013. — 4. — Pp. 1070—1075.
246. *Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S. et al.* Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: A case study of Tyumen, Russia. // *Journal of Environmental Management.* — 2019. — Vol. 239. — Pp. 366—375. — ISSN 0301-4797. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.095
247. *Meentemeyer V.* Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. // *Ecology.* — 1978. — No. 59. — Pp. 465—472.
248. *Mendonça, E. S., Stott, D. E.* Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. // *Agroforestry Systems.* — 2003. — V. 57. — No. 2. — Pp. 117—125.
249. *Moore, T.R., Trofymow, J.A., Taylor, B. et al.* Litter decomposition rates in Canadian forests. // *Glob. Chang. Biol.* — 1999. — 5. — Pp. 75—82.
250. *Müller P. E.* Studien über die natürlichen Humusformen und deren Einwirkung auf Vegetation und Boden. — Berlin. — 1887.
251. *Newbould, P.J.* Methods for estimating the primary production of forests. // *IBP Handbook No. 2.* — Oxford: Blackwell Scientific Publications. — 1967. — 62 pp.
252. *Olson, J. S.* Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. // *Ecology.* — 1963. — 44. — 322—331.
253. *Osipova N.A., Zhorniyak L.V., Yazikov E.G., Syskina A.A.* *Ecological Dangers of Chemical Contamination of Urban Areas Soils: Casestudy of Tomsk.* // *Procedia Chemistry.* — 2014. — Vol. 10. — Pp. 508—512. — ISSN 1876-6196. — DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.086

254. *Paré, D., Boutin, R., Larocque, G. R., Raulier, F.* Effect of temperature on soil organic matter decomposition in three forest biomes of eastern Canada. // *Canadian Journal of Soil Science*. — 2006. — No. 86. — Pp. 247—256.
255. *Parinkina, O. M.* Determination of bacterial growth rates in tundra soils. // *Modern methods in the study of microbial ecology*. Bull. Ecol. Res. Comm. / Ed. *Rosswall, T.* — Stockholm. — 1973. — 17. — Pp. 303—309.
256. *Parton W. J., Schimel D. S., Ojima D. S., Cole C. V.* A general model for soil organic matter dynamics. — Sensitivity to Litter Chemistry, Texture and Management, *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*. / Eds. *Bryant R. B., Arnold R. W.* — Madison, WI: Soil Science Society of America Special Publication. — 1994. — Pp. 137—167.
257. *Pedersen, L.B., Bille-Hansen, J.* A comparison of litterfall and element fluxes in even aged Norway spruce, sitka spruce and beech stands in Denmark. // *For. Ecol. Manage.* — 1999. — No. 114. — Pp. 55—70.
258. *Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A., Soto-Pinto, L.* Biodiversity, yield, and shade coffee certification. // *Ecological Economics*. — 2005. — No. 54. — Pp. 435—446. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.10.009.
259. *Pinos, J., Studholme, A., Carabajo, A., Gracia, C.* Leaf Litterfall and Decomposition of *Polylepis reticulata* in the Treeline of the Ecuadorian Andes. // *Mountain Research and Development*. — 2017. — No. 37. — Pp. 87—96. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00004.1.
260. *Ponge, J. F., Jabiol, B., Gégout, J. C.* Geology and climate conditions affect more humus forms than forest canopies at large scale in temperate forests. // *Geoderma*. — 2011. — No. 162. — Pp. 187—195.
261. *Portillo-Estrada, M., Pihlatie, M., Korhonen, J. F. J. et al.* Climatic controls on leaf litter decomposition across European forests and grasslands revealed by reciprocal litter transplantation experiments. // *Biogeosciences*. — 2016. — 13(5). — Pp. 1621—1633.
262. *Prentice I. C., Farquhar G. D, Fasham M. J. R. et al.* The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. // *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. / Eeds.: *Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J. et al.* — Cambridge, UK: Cambridge University Press. — 2001. — Pp. 183—237.
263. *Prescott C. E.* Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? // *Biogeochemistry*. — 2010. — No. 101. — Pp. 133—149. doi:10.1007/s10533-010-9439-0
264. *Reh U, Kraepelin G., Lamprecht I.* Differential scanning calorimetry as a complementary tool in wood degradation studies. // *Termochimica Acta*. — 1987. — Vol. 119. — No. 1.

265. Rosswall T., Veum A.K., Kärenlampi L. Plant Litter Decomposition at Fennoscandian Tundra Sites. // Fennoscandian Tundra Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis). / Ed. by Wielgolaski F. E. — 1975. — vol. 16.
266. Rosswall, T. Cellulose decomposition on the tundra. // Soil Organisms and Decomposition in Tundra. / Ed. by Holding, A. J., Heal, O.W., Mac-Lan, S.F., Flanagan, P.W. — Stockholm: IBP Tundra Biome Steering Committee. — 1974. — pp. 325—340.
267. Schlesinger W. H. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. — New York: Academic Press. — 1997.
268. Shreve, F. Vegetation of the Sonoran Desert. // Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington Publication. — 1951. — No. 591. — 192 pp.
269. Staaf H., Berg B. Accumulation and release of plant nutrients in decomposing Scots pine needle litter. Long-term decomposition in a Scots pine forest II. // Can. J. Bot. — 1982. — 60. — Pp. 1561—1568.
270. Stepwise Protocol. // Teatime 4 Science (Интернет-ресурс). <http://www.teatime4science.org/method/stepwise-protocol/> (14.04.2017).
271. Tang J., Wang W., Feng J. et al. Urban green infrastructure features influence the type and chemical composition of soil dissolved organic matter. // Science of The Total Environment. — 2021. — Vol. 764. — Art. 144240. — ISSN 0048-9697. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144240
272. Taylor B. R., Parkinso D. Does repeated wetting and drying accelerate decay of leaf litter? // Soil Biology and Biochemistry. — 1988. — Vol. 20. — Issue 5. — Pp. 647—656.
273. Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. // For. Ecol. Manage. — 2002. — 169. — 137—143.
274. Warren, R. J., Bradford, M. A. Ant colonization and coarse woody debris decomposition in temperate forests. // Insectes Sociaux. — 2012. — 59. — Pp. 215—221.
275. Weltzin J. F., Loik M. E., Schwinning S. et al. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. // Bioscience. — 2003. — No. 53. — Pp. 941—952.
276. Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J.F., et al. European Humus Forms Reference Base. — 2011.
277. Zhang Y., Qiao L., Chen C. et al. Effects of organic ground covers on soil moisture content of urban green spaces in semi-humid areas of China. // Alexandria Engineering Journal. — 2021. — Vol. 60. — Issue 1. — Pp. 251—259. — ISSN 1110-0168. — DOI: 10.1016/j.aej.2020.08.001
278. Zhang, D. Q., Hui, D. F., Luo, Y. Q., Zhou, G. Y. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors, // J. Plant Ecol. — 2008. — No. 1. — Pp. 85—93, Doi: 10.1093/jpe/rtn002.

# ПРИЛОЖЕНИЕ. ДИАГРАММЫ РАЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Обозначения. В уравнениях аппроксимации:  $x$  — время ( $T$ , годы);  $y$  — остаток массы после  $T$  лет экспозиции ( $OM_T$ , %).

$n$  — число исследованных образцов (значение  $T = 0$ ;  $OM = 100$  % не учитывается). Цена деления по оси абсцисс — 0,25 года.

Для диаграмм разложения чая: точки, соединённые линией — средние значения остатка массы ( $\overline{OM_T}$ ), отдельные точки — значения  $OM_T$  для каждого образца, погрешность — стандартное отклонение (указывается для случаев, когда  $n_{OM_T} \geq 2$ ).

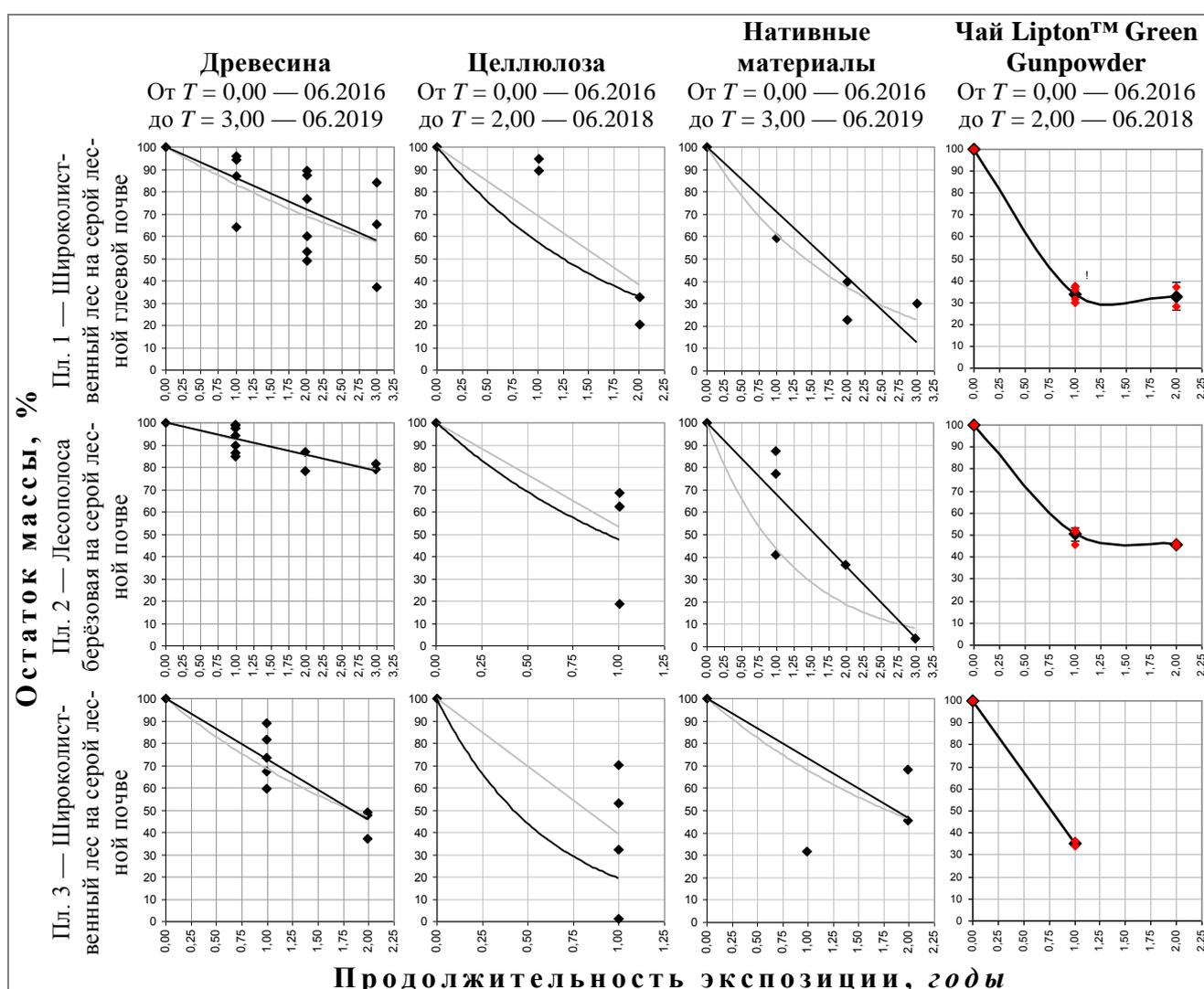


Рис. 42. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов на объектах в Тульской области (зона широколиственных лесов).

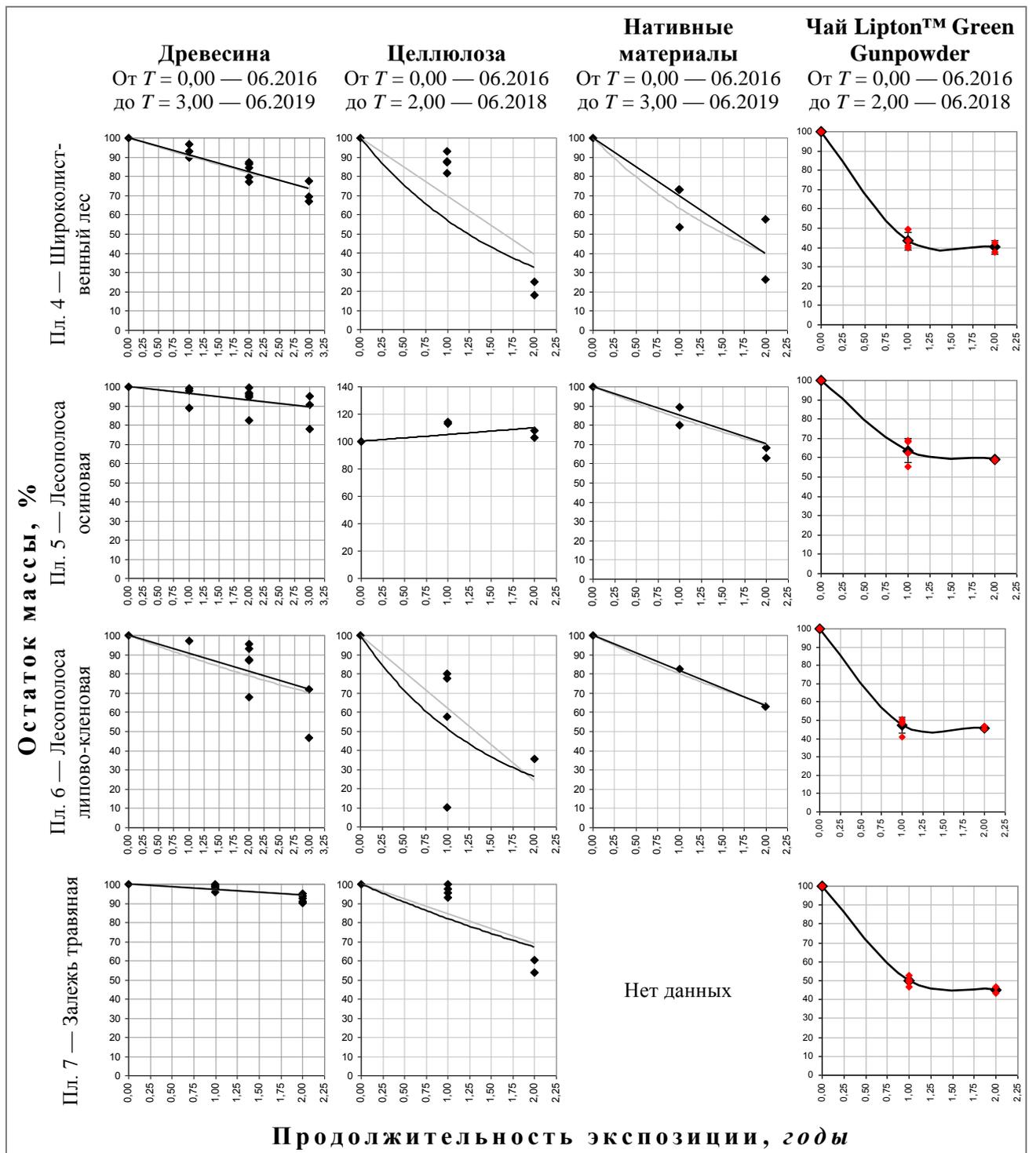


Рис. 43. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов на объектах в Липецкой области (зона лесостепей; чернозёмы типичные).

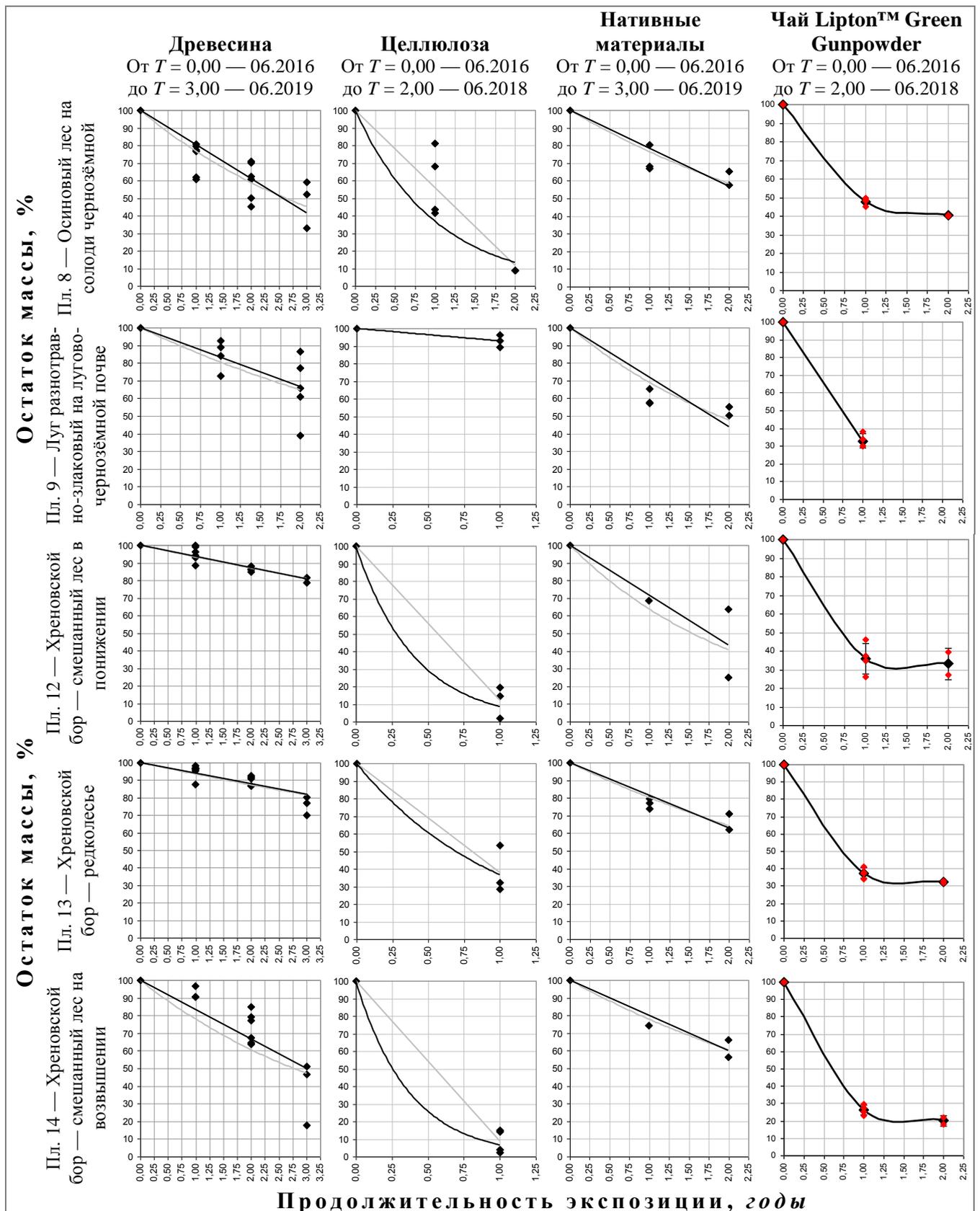


Рис. 44. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов на объектах лугово-солонцового комплекса и Хреновского бора (песчаные почвы) Воронежской области (южная граница зоны лесостепей).

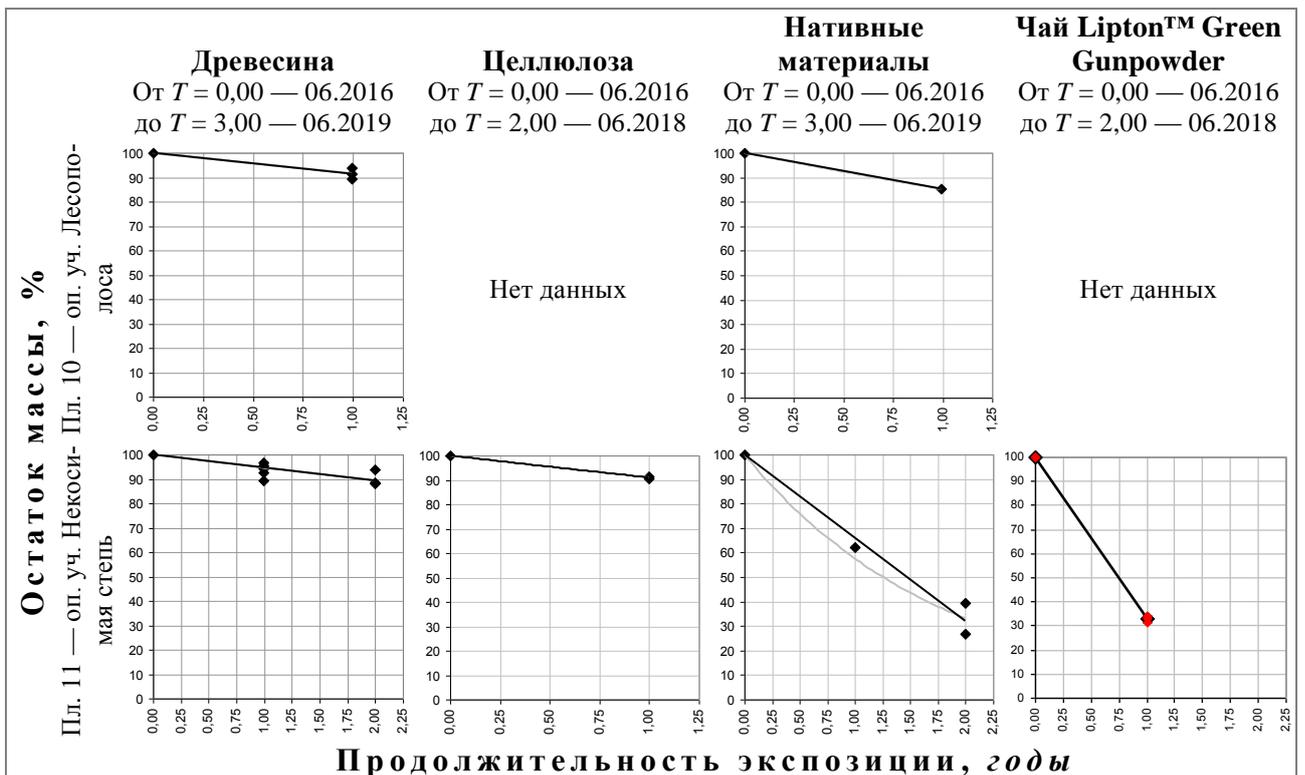


Рис. 45. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов на объектах в заказнике Каменная степь (зона лесостепей, чернозёмы обыкновенные).

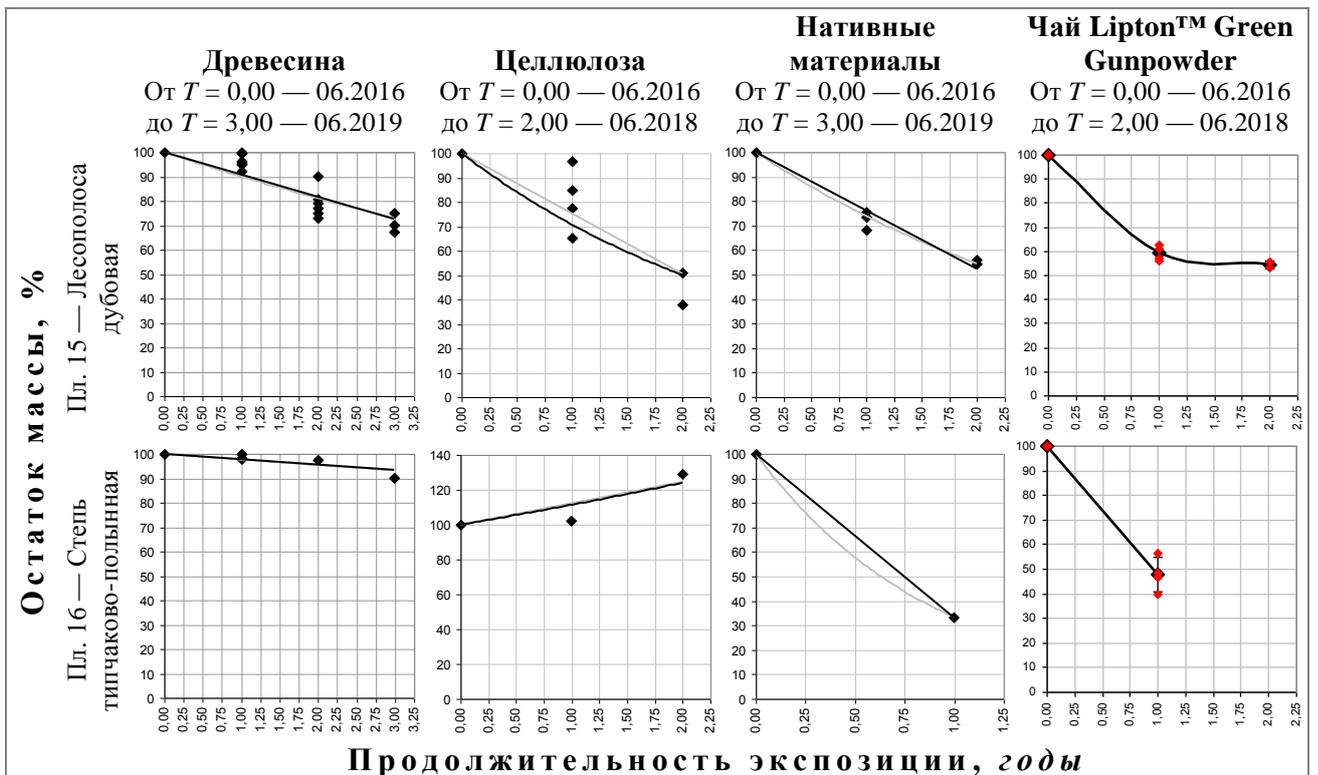


Рис. 46. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов на объектах в Волгоградской области (зона сухих степей, каштановые почвы).

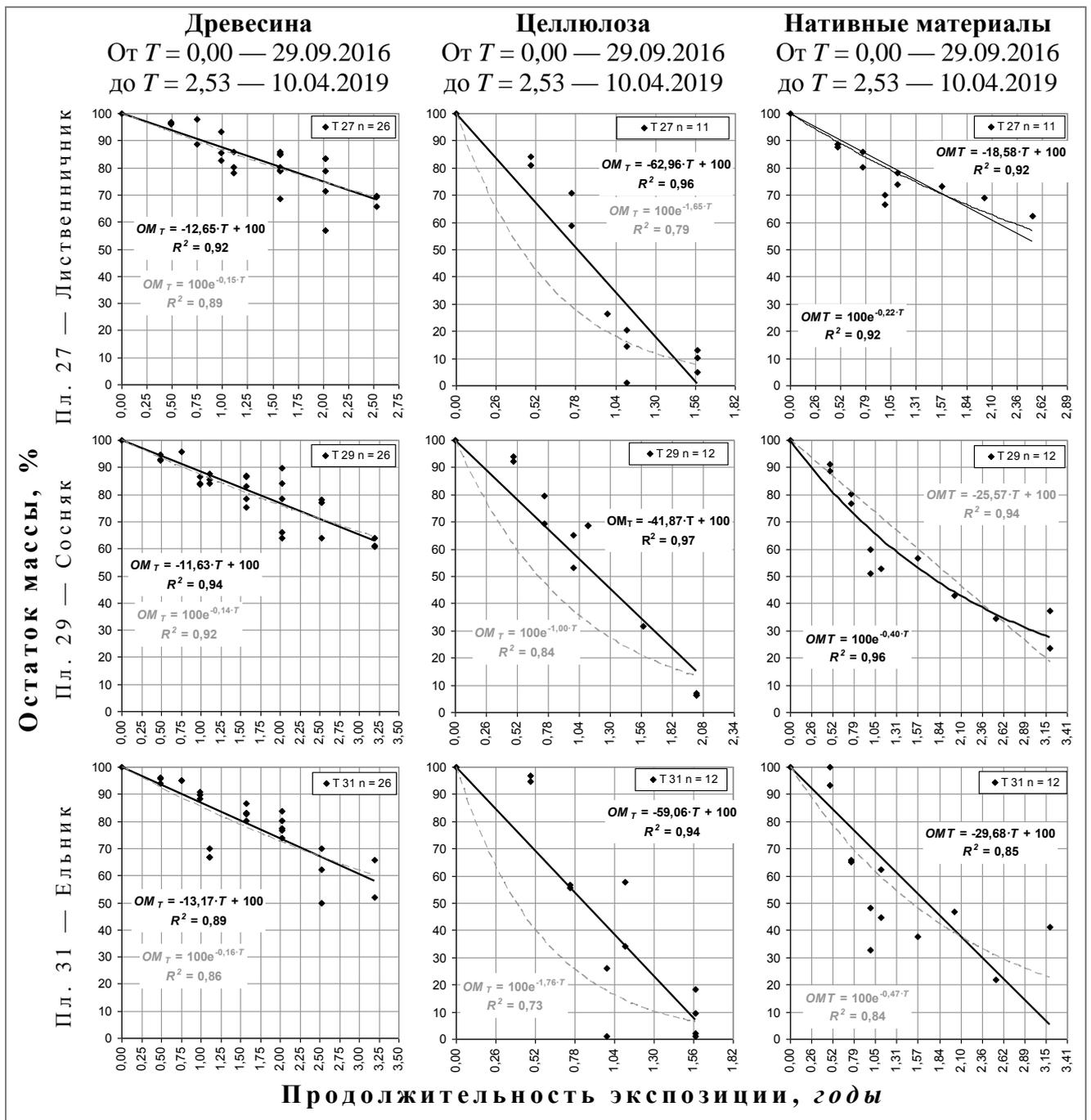


Рис. 47. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов в хвойных биогеоценозах дендрария Ботанического сада МГУ.

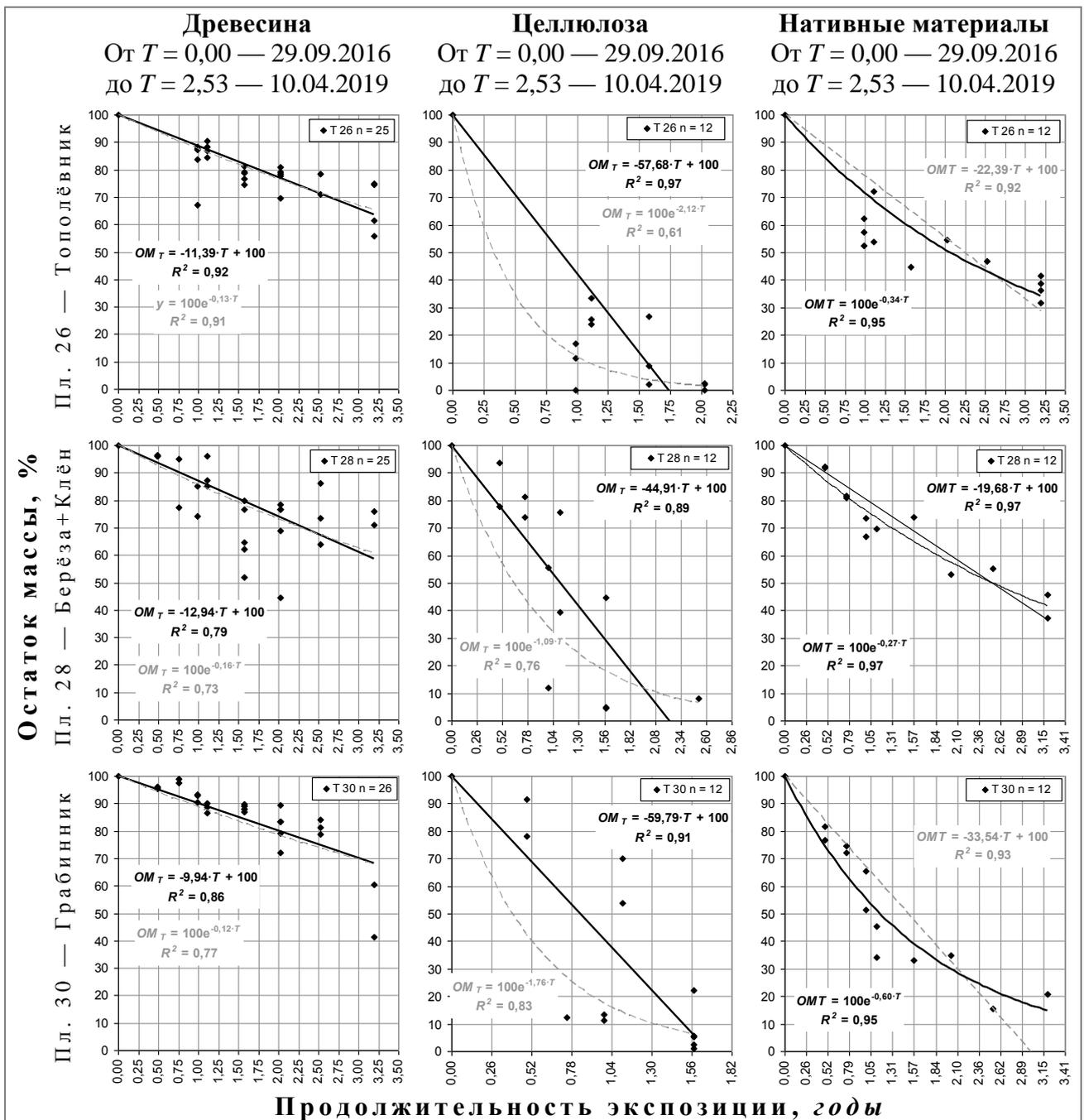


Рис. 48. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов в лиственных биогеоценозах дендрария Ботанического сада МГУ.

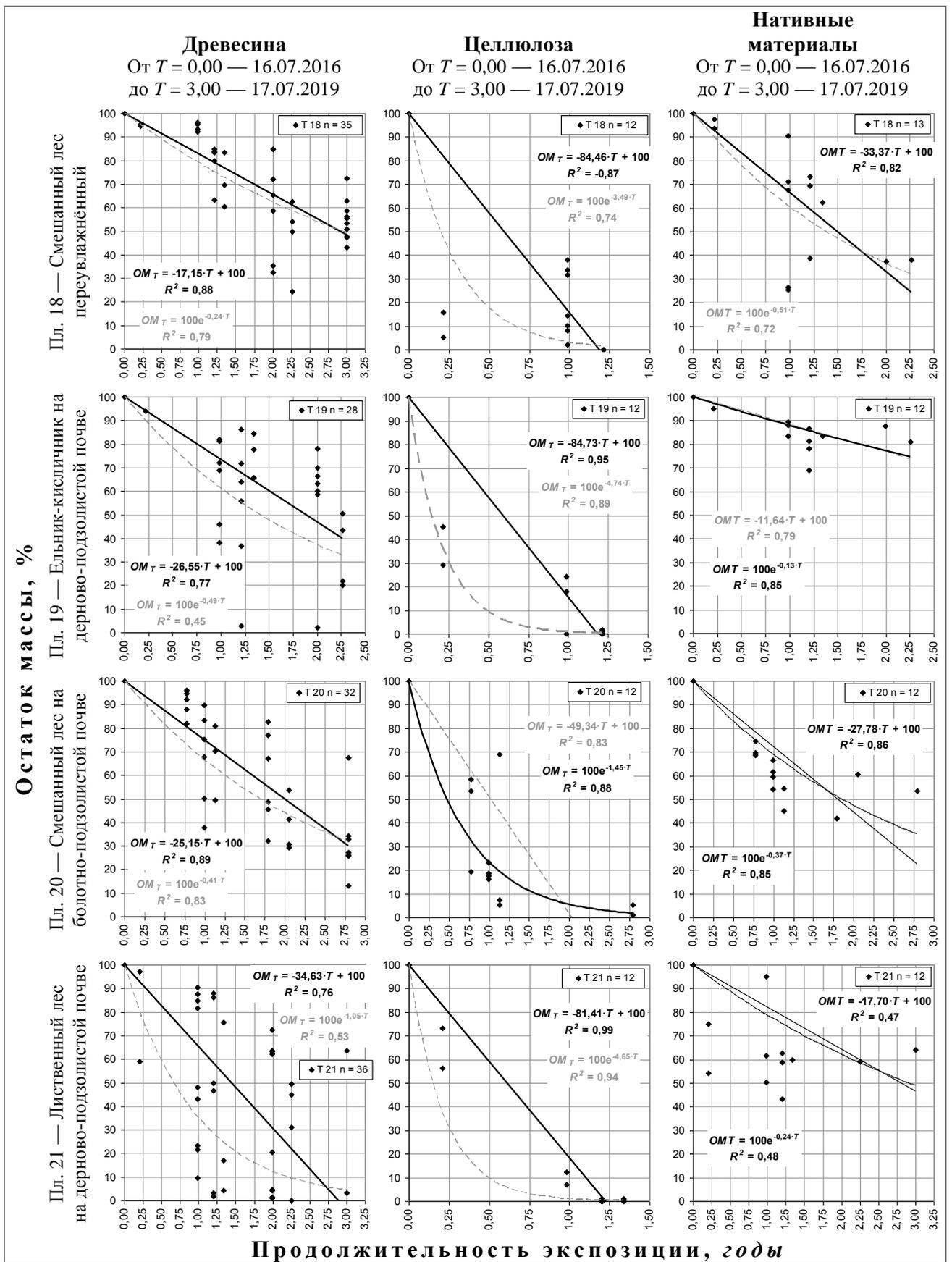


Рис. 49. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов в лесных биogeocoenoses вблизи УОПЭЦ МГУ «Чашниково» (зона смешанных лесов).

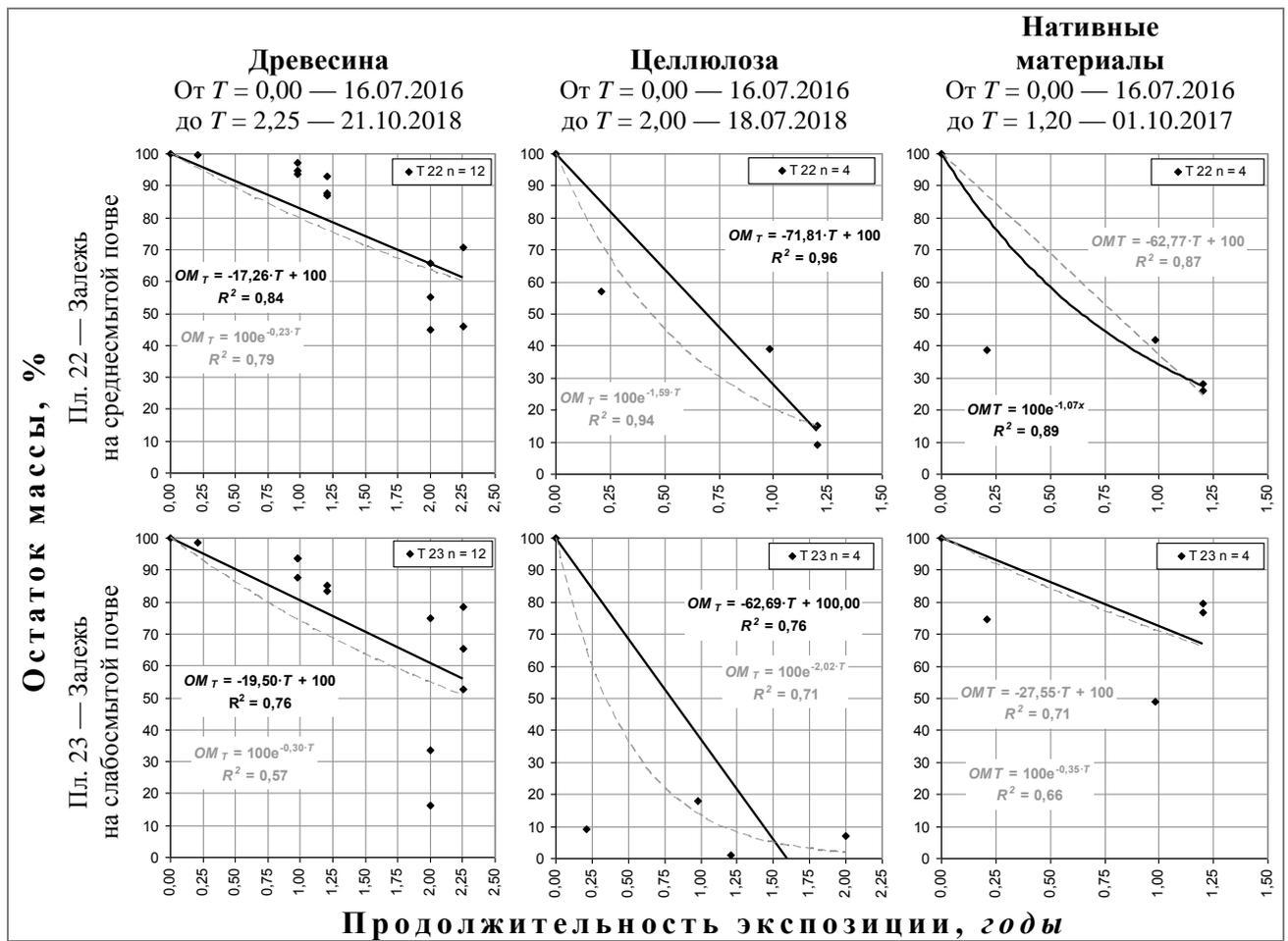


Рис. 50. Динамика разложения материалов стандартизированных образцов на залежах вблизи УОПЭЦ МГУ «Чашниково» (зона смешанных лесов).