

ISSN 0024-1148

Номер 1

Январь - Февраль 2023



ЛЕСОВЕДЕНИЕ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2023

Оригинальные статьи

- Связь радиального прироста деревьев хвойных пород и нормализованного разностного вегетационного индекса
В. Г. Суховольский, А. В. Ковалев, В. И. Воронин, В. А. Осколков, Ю. Д. Иванова 3
- Воздействие температуры и осадков на радиальный прирост тополя берлинского и липы мелколистной в Санкт-Петербурге
Д. А. Зайцев, Буй Динь Дык, А. В. Селиховкин 13
- Влияние фитоценологических и биотопических условий на состояние культур ели европейской в фазе приживания на юге-востоке Ленинградской области
Е. М. Копцева, Ю. В. Кузьмина, И. А. Сорокина, А. А. Бушковский 22
- Взаимосвязи фенольных соединений, танинов, лигнина, азота и углерода в растениях ельников кустарничково-зеленомошных на Кольском полуострове
Н. А. Артемкина 35
- Динамика развития побегов ивы трехтычинковой при разном атмосферном увлажнении
А. А. Афонин 44
- Распределение диоксида углерода и метана в торфяной залежи олиготрофного лесного болота и их эмиссия в Западной Сибири
Л. И. Инишева, М. А. Сергеева, А. В. Головченко, Б. В. Бабилов 52
- Особенности подстилок в пойменных лесах заповедника “Большая Кокшага”
А. В. Исаев, Ю. П. Демаков 66
- Влияние искусственных древесно-кустарниковых насаждений на биологическую активность почв в степях Хакасии
О. А. Сорокина 77

Краткие сообщения

- Влияние тополевой моли-пестрянки на радиальный прирост кормового растения в г. Ижевске
И. В. Ермолаев, Н. Г. Зыкина 85
- Алфавитный указатель за 2022 год 91
-
-

CONTENTS

No. 1, 2023

Original Articles

The Correlation between the Radial Growth of Coniferous Trees and the Normalised Difference Vegetation Index

*V. G. Soukhovolsky, A. V. Kovalev, V. I. Voronin,
V. A. Oskolkov, and Yu. D. Ivanova*

3

Temperature and Precipitation Affect the Radial Growth of Berlin Poplar and Small-leaved Linden Trees in Saint Petersburg

D. A. Zaytsev, Buy Dinh Dyk, and A. V. Selikhovkin

13

Phytocenotic and Biotopic Parameters Affect the Condition of European Spruce Cultures during the Establishment Stage in the South-East of the Leningrad Region

Ye. M. Koptseva, Yu. V. Kuzmina, I. A. Sorokina, and A. A. Bushkovskiy

22

Relations of Phenolic Compounds, Tannins, Lignin, Nitrogen and Carbon in Plants of the Empetro-Piceetum Forests of the Kola Peninsula

N. A. Artemkina

35

Development Dynamics of the Almond Willow's Shoots on Different Levels Atmospheric Moisture

A. A. Afonin

44

Carbon Dioxide and Methane Distribution in Peat Deposits of an Oligotrophic Forest Swamp in Western Siberia and Their Emission

L. I. Inisheva, M. A. Sergeeva, A. V. Golovchenko, and B. V. Babikov

52

Forest Litter Features in Floodplain Forest of the "Bolshaya Kokshaga" Reserve

A. V. Isaev and Yu. P. Demakov

66

Artificial Forest Stands' Impact on Soils' Biological Activity in Khakassian Steppes

O. A. Sorokina

77

Short Communications

The Influence of a Poplar Leaf Miner on the Radial Growth of the Fodder Plant in Izhevsk City

I. V. Ermolaev and N. G. Zykina

85

Alphabetical Index 2022

91

УДК 630*41:630*443:630*57

СВЯЗЬ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ ХВОЙНЫХ ПОРОД И НОРМАЛИЗОВАННОГО РАЗНОСТНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА¹

© 2023 г. В. Г. Суховольский^{a, b, *}, А. В. Ковалев^b, В. И. Воронин^c,
В. А. Осколков^c, Ю. Д. Иванова^d

^aИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

^bФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50, Красноярск, 660036 Россия

^cСибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, ул. Лермонтова, 132, Иркутск, 664033 Россия

^dИнститут биофизики СО РАН, Академгородок, 50, Красноярск 660036 Россия

*E-mail: soukhovolsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.09.2020 г.

После доработки 16.11.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Настоящая работа посвящена анализу характера связей между радиальным приростом деревьев и спутниковыми данными. Проведенные расчеты показали, что связи между данными спутникового зондирования и величинами первых разностей ширин годичных колец существуют, однако степень выраженности этих связей зависит от однородности процессов радиального роста деревьев в насаждении. Чем менее синхронны во времени ряды первых разностей ширин годичных колец (ПР ШГК) деревьев, тем слабее оказываются связи дистанционных данных и радиального прироста. Еще одним фактором, влияющим на характер связей данных спутникового зондирования и радиального прироста, являются повреждения деревьев. Таким образом, слабость или отсутствие связей между спутниковыми и наземными данными может наблюдаться и причина этого — неоднородность во времени процессов роста у различных деревьев в насаждении.

Ключевые слова: лесные насаждения, годичные кольца, ширина, рост, синхронность, спутниковые данные, корреляции.

DOI: 10.31857/S0024114823010102, **EDN:** NKBNUX

Известно, что рост деревьев является результатом сложных физиологических процессов в органах деревьев, а доступность для роста дерева ресурсов во многом определяется климатом (Sass-Klaassen et al., 2016). Связать процессы роста дерева и погодные явления возможно с помощью методов дендрохронологии, которые достаточно давно выявили связь между ширинами годичных колец (ШГК) деревьев, погодой (Fritts, 1976; Ваганов, 1996; Zuidema, Frank, 2015; Калинина и др., 2019). Несмотря на то, что годичные кольца обеспечивают точную и ретроспективную оценку роста дерева, необходимы интенсивные полевые работы по сбору образцов древесины, а затем скрупулёзная лабораторная работа по измерению собранного материала. Эти недостатки ограничивают возможность использования данного подхода для мониторинга роста леса в реальном време-

ни в больших пространственных масштабах (Samarero et al., 2015). И многочисленные попытки связать информацию о состоянии лесных насаждений, полученную в ходе дистанционного зондирования, с показателями радиального прироста деревьев предпринимаются, чтобы использовать высокотехнологические и достаточно простые данные спутниковых наблюдений для замещения трудоемких измерений кернов древесины.

За последние тридцать лет многочисленные исследования были посвящены определению биофизических переменных леса на основе спутниковых измерений (Vicente-Serrano et al., 2007; Büntgen et al., 2010; Медведева и др., 2010; Миклашевич, Барталев, 2016). Наиболее популярным спутниковым растительным индексом является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), который измеряет фракционное поглощенное фотосинтетически активное излучение (Myneni et al., 1995). Различные вегетатив-

¹ Работа поддержана РФФИ (гранты №№ 17-29-05074 и 18-04-00119).

ные индексы, рассчитанные по спутниковым данным, — эффективный индикатор фотосинтетической активности и продуктивности деревьев, и некоторые исследователи пытались напрямую связать данные по ШГК деревьев со спутниковыми данными (Bunn et al., 2013; Babst et al., 2018). В целом в этих исследованиях обнаружена положительная корреляция умеренной силы между межгодовой изменчивостью NDVI и ежегодным ростом дерева. В то же время имеются работы, где значимой положительной корреляции не обнаружено (Bernier et al., 2013; Beck et al., 2013; Pasho, Alla, 2015). Таким образом, связь между спутниковыми вегетационными индексами и ШГК неоднозначна и зависит от видового состава леса, ландшафта, от выбора подходящих исходных спутниковых и метеорологических данных (Kaufmann et al., 2008).

В результате возникает вопрос: при каких условиях наблюдается корреляция данных дистанционного зондирования с данными по ШГК? Следует отметить, что для оценки связей между радиальным приростом и данными дистанционного зондирования необходимо решить проблемы пространственно-временного согласия этих показателей. Пространственное несоответствие масштабов обусловлено тем, что спутниковые данные для индекса NDVI представляют собой пиксел наземной поверхности площадью 6250 м², а данные по ширине колец берутся у отдельного дерева с площадью проекции кроны не более 60–80 м². В связи с этим сопоставить данные дистанционного зондирования и радиального прироста отдельного дерева некорректно — необходимо сравнивать дистанционные показатели с данными прироста ансамбля деревьев, занимающих суммарную площадь, сопоставимую с размерами пиксела. При этом следует полагать, что изучаемый ансамбль деревьев однороден по своим показателям и реакциям на внешние воздействия, так что его можно рассматривать как точечный однородный объект.

Следующая проблема появляется из-за временных несоответствий процессов фотосинтеза, наблюдаемых по спутниковым данным, и процессов формирования древесины, интегрированных в ШГК. По этим причинам нельзя ожидать прямого соответствия между данными о ШГК и спутниковыми вегетационными индексами. Динамика этих процессов будет отличаться между экосистемами, видами деревьев и климатическими областями (Lloyd et al., 2002; Hirota et al., 2011). Для сопоставления данных о ШГК и данных дистанционного зондирования необходимо, чтобы характерные времена этих показателей совпадали, т.е. для ШГК с характерным временем один

год следует сопоставлять дистанционные данные с тем же характерным временем.

Настоящая работа посвящена анализу характера связей между радиальным приростом деревьев и спутниковыми данными. Для анализа использовались данные по радиальному приросту древостоев сосны (*Pinus sylvestris* L.) и кедра (*Pinus sibirica* Du Tur) в разных районах Восточной Сибири и данные NDVI и температуры подстилающей поверхности LST для выбранных пробных площадей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Сопряженные исследования динамики радиального прироста и спутниковых данных проводились на пробных площадях в сосновых лесах пригородов Красноярска и в кедровых лесах Прибайкалья. Для анализа радиального прироста на всех пробных площадях были выбраны деревья с диаметром на высоте груди от 12 до 32 см. При этом анализировались ряды радиального прироста деревьев в период с 2003 по 2017 гг. Выбор этого временного интервала был связан с тем, что данные дистанционного зондирования доступны с 2003 г. Характеристики насаждений и координаты пробных площадей приведены в табл. 1.

С помощью приростного бурава были взяты керны у всех деревьев на изученных пробных площадях. Ширина годичного кольца $d(i)$ в год i измерялась на шлифованной поверхности кернов в поле зрения микроскопа на установке “Lintab 5 Tree-RingStation” (RINNTECH®) с точностью 0.1 мм. Датировка годичных колец выполнялась визуально по графикам в программе TSAP-Win™ (RINNTECH®), а контроль датировки производился с помощью программы COFECHA (version 6.0P) из библиотеки дендрохронологических программ DPL (<http://web.utk.edu/~grissino/software.htm>).

Существует временной тренд ширин годичных колец, и для его снятия и выявления связей между текущим ростом годичных колец деревьев и дистанционными данными желательно исключить из анализа временной тренд ШГК. Для снятия возрастного тренда для каждого дерева на каждой пробной площади вычислялись ряды первых разностей ширин годичных колец (ПР ШГК) между годами i и $(i - 1)$, тогда $w(i) = d(i) - d(i - 1)$, и вместо ряда ширин годичных колец переходили к анализу рядов ПР ШГК, имеющих порядок интегрированности, равный нулю, то есть стационарных временных рядов. Фактически ряд ПР ШГК представлял собой скорость изменения величины ШГК.

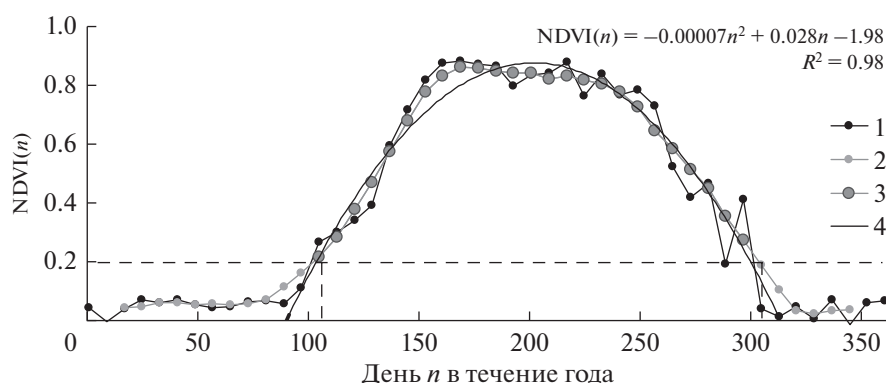


Рис. 1. Типичный временной ряд NDVI для восьмидневных временных композитов для пробной площади K2 за 2005 год и процедура его обработки. 1 — данные NDVI, 2 — фильтрованный ряд данных NDVI, 3 — ряд 2, обрезанный по критическому значению $NDVI_{крит} = 0.2(NDVI_{max} - NDVI_{min})$, 4 — параболическая аппроксимация ряда NDVI.

Показатель NDVI при анализе данных дистанционного зондирования вычисляется по стандартной формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

где *NIR* и *Red* — нормализованные значения интенсивности отражения в ближнем инфракрасном и красном диапазонах спектра для данной точки земной поверхности.

Показатели NDVI были рассчитаны с помощью продукта MYD09Q1 измерительного комплекса MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на международном научно-исследовательском спутнике AQUA (EOS PM-1). Продукт MYD09Q1 включает в себя

значения красной и ближней инфракрасной (band 1 и band 2) компоненты отраженного излучения для пиксела размером 250×250 м. Для каждого пиксела использовалось композитное значение за 8-дневный период по критерию максимального качества с учетом атмосферных условий. С информационного ресурса The Earth Observing System Data and Information System EOSDIS (earthdata.nasa.gov) были получены сезонные данные за 2003–2017 гг. о NDVI и температуре подстилающей поверхности LST (Продукт MYD11A2). Типичный сезонный временной ряд NDVI приведен на рис. 1.

Ранее нами было продемонстрировано, что для лесных насаждений Сибири фенологические

Таблица 1. Координаты пробных площадей и характеристики насаждений

Название пробной площади	Координаты	Число деревьев	Средний годичный прирост (2002-2017 гг.), мм	П
K1	56.043725° 93.161901	30	0.95	и
K2	56.222678° 92.990675°	29	1.92	
K3	55.994809° 92.735070°	32	1.31	
K4	55.963131° 92.854473°	29	0.98	
B1	N 51°28'16.1", E 104°51'21.6"	22	1.60	
B2	N 51°46'06.6" E 103°37'16.6")	17	1.35	
B3	N 51°29'53.1", E 105°59'09.5")	20	0.55	

Таблица 2. Параметры модели (1) для пробной площади К1

Переменная	Значение коэффициентов a_j	Ст. ошибка коэффициента a_j	t -критерий для коэффициента a_j	p -уровень
a_0	-1205.82	285.2	-4.23	0.008
$\ln x_1$	1.78	3.43	0.52	0.625
$\ln x_2$	-174.99	48.35	-3.62	0.015
$\ln x_3$	46.22	8.08	5.72	0.002
$\ln x_4$	-33.57	10.02	-3.35	0.020
$\ln x_5$	188.21	51.53	3.65	0.015
R^2		0.91		
ККФ ($k=0$)		0.96		

показатели связаны со значением максимума NDVI и датой достижения этого максимума, а также с погодными характеристиками летнего сезона и зимы (средней температурой воздуха в декабре и январе перед началом вегетационного сезона (Суховольский и др., 2017)). В связи с этим рассматривалась связь между средними значениями ПР ШГК для ансамбля деревьев на пробной площади и значениями переменных: x_1 — максимальное сезонное значение NDVI, x_2 — разность $\Delta n = n_2 - n_1$, где n_1 и n_2 — дни с начала года, когда кривая NDVI пересекается с прямой 3, x_3 и x_4 — суммы температур по Кельвину, вычисленные по данным LST рядов соответственно для января текущего года и декабря прошедшего года; x_5 — сумма температур с момента времени n_1 до момента времени n_2 , также вычисленная по данным рядов LST.

Для оценки связей между дистанционными показателями и средними величинами $w(i, m)$ для деревьев на пробной площади m в год i рассматривалась мультипликативная модель $\exp(w(i, m)) = \exp(a_0(m)) \prod_{j=0}^l x^{a(j, m)}$, в которой показатели степеней a_j сомножителей характеризуют чувствительность зависимой переменной к изменению независимой переменной.

В мультипликативной модели малые значения хотя бы одной независимой переменной будут давать малое значение зависимой переменной при любых значениях других переменных, и влияние каждой переменной не будет компенсировано.

Для упрощения расчетов мультипликативную модель можно прологарифмировать и вместо мультипликативной функции получить логарифмически линейную регрессионную модель:

$$\hat{w}(i, m) = a_0(m) + \sum_j^z a(j, m) \ln x(i, j, m), \quad (1)$$

где i — номер года от 2003 до 2015 гг., m — номер пробной площади, $a_0 - a(z)$ — коэффициенты, j — номер независимой переменной, z — число независимых переменных. Коэффициент $a(j, m) = \frac{\partial w(i, m)}{\partial (\ln x(i, m))}$ в (1) характеризует восприимчивость величины первой разности ШГК к изменению переменной состояния $\ln x(j, m)$.

Для оценки точности модели (1) использовались два показателя: коэффициент детерминации R^2 и кросс-корреляционная функция ККФ между временным рядом натурных данных ПР ШГК и модельным рядом. Чем ближе значения коэффициента детерминации к 1, тем больше доля дисперсии зависимой переменной w объясняется моделью. Если значения ККФ максимальны при сдвиге $k = 0$, то в этом случае ряд ПР ШГК и модельный ряд синхронны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным ПР ШГК и данным дистанционного зондирования для 2003–2015 гг. были рассчитаны коэффициенты регрессионной модели (1). В табл. 2 приведены результаты расчетов ПР ШГК по модели (1), а на рис. 2 — временные ряды $w(i)$ и по модели для пробной площади К1.

Данные натурных измерений и модельные расчеты для этой пробной площади достаточно хорошо согласуются как по амплитуде (коэффициент детерминации для уравнения (1) $R^2 = 0.91$), так и по фазе — значение кросс-корреляционной функции при $k = 0$ ККФ ($k = 0$) равно 0.96.

Аналогичные расчеты были выполнены для всех других пробных площадей. В табл. 3 приведены значения коэффициентов моделей типа (1) для этих пробных площадей.

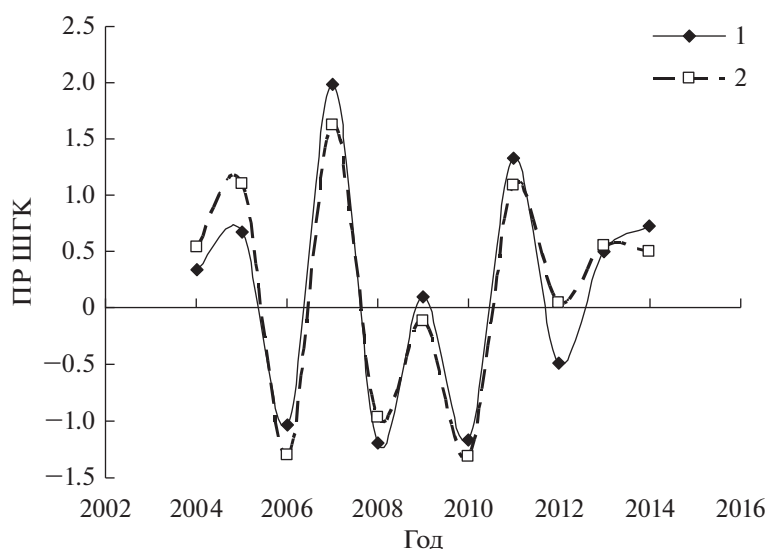


Рис. 2. Временной ряд ПР ШГК (1) и расчетный ряд ПР ШГК (2) по модели (1) для пробной площади К1.

Как следует из табл. 3, характер связей между ПР ШГК и данными дистанционного зондирования неодинаковый для разных пробных площадей. Если для пробных площадей К1, К2 и В1 коэффициенты детерминации R^2 для моделей типа (1) достаточно высоки (соответственно 0.91, 0.86 и 0.76) и значимы ($p \leq 0.05$), то для пробных площадей К3 и К4 коэффициенты детерминации для уравнений типа (1) существенно меньше ($R^2 = 0.64$ и $p \leq 0.20$), а для насаждений В2 и В3 коэффициенты детерминации и коэффициенты переменных уравнения (1) незначимы даже на уровне $p = 0.20$. Таким образом, далеко не всегда по данным дистанционного зондирования можно оценить изменение радиального прироста деревьев. И вряд ли отсутствие значимых связей объясняется не-

правильным выбором дистанционных переменных (для пробных площадей К1, К2 и В1 выбранные дистанционные показатели обеспечивают значения коэффициентов детерминации R^2 , превосходящих 0.75).

В качестве гипотезы рассмотрим возможность влияния на характер связей между ПР ШГК и дистанционными данными уровнем синхронности процессов радиального прироста различных деревьев на пробной площади. Если временные ряды ПР ШГК деревьев несинхронны во времени, то между двумя индивидуальными временными рядами ПР ШГК существует фазовый сдвиг, реакции деревьев в насаждении на изменения внешних факторов в один момент времени могут

Таблица 3. Коэффициенты моделей типа (1) для изученных пробных площадей

Переменная	Пробная площадь						
	ВВ3	В2	В1	К4	К3	К2	К1
a_0	82.65	41.72	-306.4**	4118.35	698.55*	2824.97	-1205.8**
$\ln x_1$	1.428	-1.49	-4.90**	0.79	7.86	243.83**	1.78
$\ln x_2$	14.07	-1.28	-62.44**	934.35	156.56*	490.92	-174.99**
$\ln x_3$	0.017	-5.99	-14.06**	453.61*	29.30*	459.41*	46.22**
$\ln x_4$	0.93	-2.14	-6.49	-87.10	1.32*	-755.51**	-33.57**
$\ln x_5$	-14.77	0.88	68.36**	-1014.8*	-154.29	-332.30	188.21**
R^2	0.19	0.31	0.75**	0.64	0.64	0.86**	0.91**
ККФ ($k=0$)	0.43	0.51	0.80	0.80	0.80	0.80	0.96

* — Коэффициент уравнения (1) значим на уровне $p \leq 0.1$; ** — коэффициент уравнения (1) значим на уровне $p \leq 0.05$.

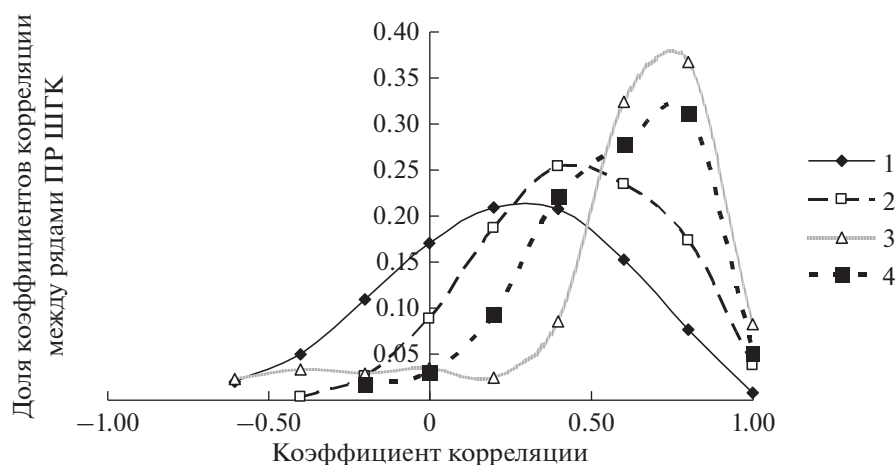


Рис. 3. Функции плотности распределения коэффициентов корреляции временных рядов ПР ШГК на пробных площадях вблизи Красноярска. 1 – площадь К4, 2 – площадь К3, 3 – площадь К2, 4 – площадь К1.

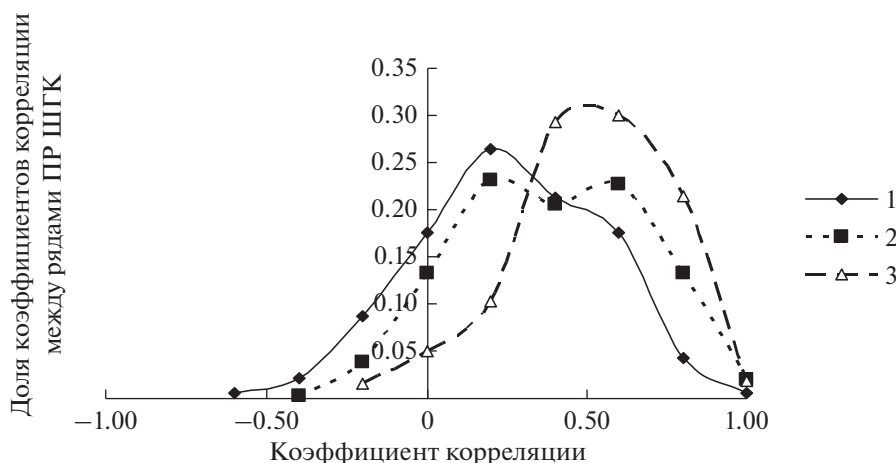


Рис. 4. Функции плотности распределения коэффициентов корреляции временных рядов ПР ШГК на пробных площадях вблизи оз. Байкал. 1 – площадь В3, 2 – площадь В2, 3 – площадь В1.

быть различны, и это может приводить к тому, что средние значения прироста оказываются не связанными с дистанционными данными для всего пиксела.

Синхронность изменений величин ПР ШГК отдельных деревьев в насаждении можно оценивать по матрице $|CCF(i, j)|$ кросс-корреляционных функций (ККФ) рядов первых разностей радиального прироста между деревьями i и j на пробной площади. О синхронности радиального прироста можно говорить, если максимальные значения всех ККФ в этой матрице будут близки к 1 и наблюдаться при сдвиге $k = 0$. Так как для выборки даже в 25–30 деревьях расчеты примерно 400 парных ККФ достаточно трудоемки, вместо матрицы ККФ можно рассматривать такой легко вычисляемый с использованием статисти-

ческих пакетов показатель, как корреляционная матрица рядов первых разностей радиального прироста. Значение коэффициента корреляции $r(i, j)$ рядов ПР ШГК для деревьев i и j соответствует значению $ККФ(i, j)$ при $k = 0$. Если $r(i, j)$ близко к 1, можно говорить о синхронности этих временных рядов. В качестве показателей синхронности радиального роста ансамбля деревьев на пробной площади можно использовать среднее значение коэффициентов корреляции $r(i, j)$ или характеристики функции плотности распределения $f(r)$ значений коэффициентов корреляции для ансамбля деревьев (моду, медиану и т.п.). Для ансамбля деревьев с высоким уровнем синхронности функция плотности распределения коэффициентов корреляции будет иметь пик вблизи значения $r = 1$.

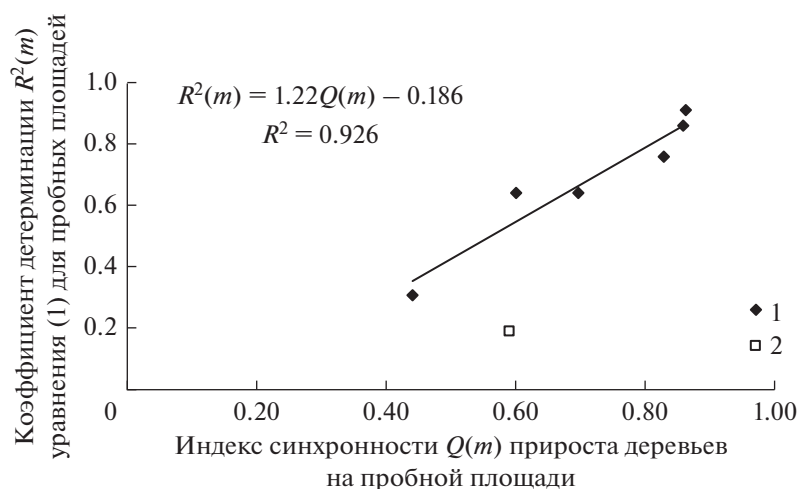


Рис. 5. Связь между индексом синхронности $Q(m)$ коэффициентов корреляции рядов ПР ШГК деревьев для m -ой пробной площади и коэффициентом детерминации $R^2(m)$ модели (1) для разных пробных площадей: 1 — пробные площади К1–К4, В1, В3; 2 — насаждение В2, поврежденное бактериальной водянкой.

На рис. 3 и 4 приведены функции плотности распределения значений коэффициентов корреляции между рядами ПР ШГК для разных пробных площадей вблизи Красноярска и для Прибайкалья.

Как видно, достаточно синхронны временные ряды ПР ШГК на пробных площадях К2 и К1. Временные ряды ПР ШГК на пробных площадях К3 и К4 значительно менее синхронны, и часть временных рядов ПР ШГК на этих пробных площадях изменяется в противофазе, вследствие чего эти коэффициенты корреляции отрицательны.

На пробных площадях в зоне Байкала синхронность изменений временных рядов ПР ШГК несколько меньше синхронности временных рядов ПР ШГК на территории вблизи Красноярска, функции плотности распределения значений коэффициентов корреляции сдвинуты влево, и доля временных рядов с коэффициентами, близкими к 1, мала.

В качестве интегрального показателя синхронности ростовых процессов у деревьев на пробной площади введем величину индекса синхронности Q коэффициентов корреляции радиальных приростов деревьев для m -ой пробной площади:

$Q(m) = \int_{0.6}^1 f(r(ijm))dr$, т.е. долю площади под функцией плотности распределения $f(r)$ коэффициентов корреляций со значениями $r(ij) \geq 0.6$ между рядами ПР ШГК. Сопоставим значения $Q(m)$ с индексом синхронности для m -ой пробной площади значения коэффициента детерминации $R^2(m)$ модели (1) для данной пробной площади. Показано, что между этими величинами существует достаточно явно выраженная связь (табл. 4 и рис. 5).

Можно заключить, что чем больше индекс синхронности временных рядов ПР ШГК деревьев на пробной площади, чем больше для этой пробной площади коэффициент детерминации уравнения связи между данными дистанционного зондирования и ПР ШГК, тем сильнее связь между этими переменными. Исключением являются данные для пробной площади В2, деревья на которой были поражены бактериальной водянкой.

Проведенные расчеты показали, что связи между данными дистанционного зондирования и величинами первых разностей ширин годичных колец существуют, однако степень выраженности этих связей зависит от однородности процессов радиального роста деревьев в насаждении. Чем менее синхронны во времени ряды ПР ШГК, тем слабее оказываются связи дистанционных данных и радиального прироста. Еще одним фактором, влияющим на характер связей данных дистанционного зондирования и радиального прироста, являются повреждения деревьев. Таким образом, слабость или отсутствие связей между дистанционными и наземными данными может наблюдаться и причина этого заключена в неод-

Таблица 4. Связи между индексом синхронности Q радиального прироста деревьев на пробной площади и коэффициентом детерминации R^2 уравнения (1) связи дистанционных данных и данных ПР ШГК

Переменные	Пробная площадь						
	В2	В3	К4	К3	В1	К2	К1
Q	0.59	0.44	0.60	0.70	0.83	0.86	0.86
R^2	0.19	0.31	0.64	0.64	0.76	0.86	0.91

нородности во времени процессов роста у различных деревьев в насаждении. Представляется, что при прочих равных условиях при уменьшении размеров пиксела при дистанционном зондировании высокий уровень корреляции между дистанционными и наземными данными будут регистрироваться чаще.

ВЫВОДЫ

1. Используя данные по ширинам годовых колец ансамбля деревьев на пробной площади и данных NDVI и LST спутникового мониторинга, можно выявить связи между этими показателями.

2. Синхронность изменений значений первых разностей ширин годовых колец определяет уровень связей между радиальным приростом и спутниковыми данными.

3. Чем меньше уровень синхронности величин первых разностей радиального прироста деревьев в насаждении, тем слабее корреляция между приростом и спутниковыми данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ваганов Е.А. Регистрация потепления в текущем столетии клетками годовых колец деревьев // Доклады Академии наук. 1996. Т. 351. № 2. С. 281–283.
- Калинина Е.В., Кнорре А.А., Фонти М.В., Ваганов Е.А. Сезонное формирование годовых колец лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в зоне южной тайги Средней Сибири // Экология. 2019. № 3. С. 182–188.
- Медведева М.А., Елсаков В.В., Савин И.Ю., Барталев С.А. О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 319–329.
- Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
- Суховольский В.Г., Иванова Ю.Д., Овчинникова Т.М., Ботвич И.Ю. Моделирование фенодинамики листопадных древесных пород // Лесоведение. 2017. № 4. С. 293–302.
- Babst F., Bodesheim P., Charney N., Friend A.D., Girardin M.P., Klesse S., Moore D.J.P., Seftigen K., Dietze M.C., Eckes A.H., Enquist B., Frank D.C., Mahecha M.D., Poulter B., Record S., Trouet V., Turton R.H., Zhang Z., Evans M.E.K. When tree rings go global: challenges and opportunities for retro- and prospective insight // Quaternary Science Reviews. 2018. V. 197. P. 1–20.
- Beck P.S.A., Andreu-Hayles L., D'Arrigo R.D., Anchukaitis K.J., Tucker C.J., Pinzón J.E., Goetz S.J. A large-scale coherent signal of canopy status in maximum latewood density of tree rings at arctic treeline in North America // Global and Planetary Change. 2013. V. 100. P. 109–118.
- Berner L.T., Beck P.S.A., Bunn A.G., Goetz S.J. Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia // Global Change Biology. 2013. V. 19. P. 3449–3462.
- Bunn A.G., Hughes M., Kirilyanov A.V., Losleben M., Shishov V.V., Berner L.T., Oltchev A., Vaganov E.A. Comparing forest measurements from tree rings and a space-based index of vegetation activity in Siberia // Environmental Research Letters. 2013. V. 8(035034).
- Büntgen U., Trouet V., Frank D., Leuschner H.H., Friedrichs D., Luterbacher J., Esper J. Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium // Quaternary Science Reviews. 2010. V. 29. P. 1005–1016.
- Camarero J.J., Franquesa M., Sangüesa-Barreda G. Timing of drought triggers distinct growth responses in holm oak: implications to predict warming-induced forest defoliation and growth decline // Forests. 2015. V. 6. P. 1576–1597.
- Cuny H.E., Rathgeber C.B.K., Frank D., Fonti P., Makinen H., Prislan P., Rossi S., Martinez Del Castillo E., Campelo F., Vavřík H., Camarero J.J., Bryukhanova M.V., Jyske T., Gričar J., Gryc V., De Luis M., Vieira J., Kirilyanov A.V., Oberhuber W., Treml V., Huang J.G., Li X., Swidrak I., Deslauriers A., Liang E., Nöjd P., Gruber A., Nabais C., Morin H., Krause C., King G., Fournier M. Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests // Nature Plants. 2015. V. 1. P. 6.
- Fritts H.C. Tree Rings and Climate. Academic Press, 1976. 567 p.
- Hirota M., Holmgren M., Van Nes E.H., Scheffer M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions // Science. 2011. V. 334. P. 232–235.
- <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm>
- Kaufmann R.K., D'Arrigo R.D., Paletta L.F., Tian H.Q., Jolly W.M., Myneni R.B. Identifying climatic controls on ring width: the timing of correlations between tree rings and NDVI // Earth Interactions. 2008. V. 12. P. 1–14.
- Lloyd A.H., Fastie C.L. Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska // Climate Change. 2002. V. 52. P. 481–509.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. V. 33. P. 481–486.
- Pasho E., Alla A.Q. Climate impacts on radial growth and vegetation activity of two co-existing Mediterranean pine species // Canadian J. Forest Research. 2015. V. 45. P. 1748–1756.
- Sass-Klaassen U., Fonti P., Cherubini P., Gričar J., Robert E.M.R., Steppe K., Bräuning A. A tree-centered approach to assess impacts of extreme climatic events on forests // Frontiers in Plant Science. 2016. V. 7. P. 1069.
- Vicente-Serrano S.M. Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region // Natural Hazards. 2007. V. 40. P. 173–208.
- Zuidema P.A., Frank D. Forests: Tree rings track climate trade-offs // Nature. 2015. V. 523. P. 531.

The Correlation between the Radial Growth of Coniferous Trees and the Normalised Difference Vegetation Index

V. G. Soukhovolsky^{1, 2, *}, A. V. Kovalev², V. I. Voronin³, V. A. Oskolkov³, and Yu. D. Ivanova⁴

¹Forest Institute, Siberian Branch of the RAS, Akademgorodok, 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

²Federal Research Centre Krasnoyarsk Science Centre, Siberian branch of the RAS, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036 Russia

³Siberian institute of plants physiology and biochemistry, Siberian branch of the RAS, Lermontova st., 132, Irkutsk 664033 Russia

⁴Institute of Biophysics, Siberian Branch of the RAS, Akademgorodok, 50, bldg. 50, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: soukhovolsky@yandex.ru

This work is dedicated to analysing of the nature of the relationship between the radial growth of trees and remote sensing data. The calculations performed showed that there are certain connections between the satellite data and the values of the first differences in the widths of tree rings, but the strength of these correlations depends on the uniformity of the plantation trees' radial growth processes. The less synchronous in time are the series of the first differences in the widths of the tree rings (FD WTR), the weaker are the connections between the remote sensing data and the radial increment. Another factor influencing the nature of the relationship between the satellite data and the radial growth is damage to trees. Thus, weak or lacking links between satellite and field data can still be observed and the reason for this is the heterogeneity in growth processes periods of different trees in the stand.

Keywords: forest stands, tree rings, width, growth, synchronism, remote sensing data, correlations.

Acknowledgements: The work has been carried out with the support from the RFBR (grants № 17-29-05074 and № 18-04-00119).

REFERENCES

- Babst F., Bodesheim P., Charney N., Friend A.D., Girardin M.P., Klesse S., Moore D.J.P., Seftigen K., Dietze M.C., Eckes A.H., Enquist B., Frank D.C., Mahecha M.D., Poulter B., Record S., Trouet V., Turton R.H., Zhang Z., Evans M.E.K., When tree rings go global: challenges and opportunities for retro- and prospective insight, *Quaternary Science Reviews*, 2018, Vol. 197, pp. 120.
- Beck P.S.A., Andreu-Hayles L., D'Arrigo R.D., Anchukaitis K.J., Tucker C.J., Pinzón J.E., Goetz S.J., A large-scale coherent signal of canopy status in maximum latewood density of tree rings at arctic treeline in North America, *Global and Planetary Change*, 2013, Vol. 100, pp. 109–118.
- Berner L.T., Beck P.S.A., Bunn A.G., Goetz S.J., Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia, *Global Change Biology*, 2013, Vol. 19, pp. 3449–3462.
- Bunn A.G., Hughes M., Kirilyanov A.V., Losleben M., Shishov V.V., Berner L.T., Oltchev A., Vaganov E.A., Comparing forest measurements from tree rings and a space-based index of vegetation activity in Siberia, *Environmental Research Letters*, 2013, Vol. 8(035034).
- Büntgen U., Trouet V., Frank D., Leuschner H.H., Friedrichs D., Luterbacher J., Esper J., Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium, *Quaternary Science Reviews*, 2010, Vol. 29, pp. 1005–1016.
- Camarero J.J., Franquesa M., Sangüesa-Barreda G., Timing of drought triggers distinct growth responses in holm oak: implications to predict warming-induced forest defoliation and growth decline, *Forests*, 2015, Vol. 6, pp. 1576–1597.
- Cuny H.E., Rathgeber C.B.K., Frank D., Fonti P., Makinen H., Prislan P., Rossi S., Martinez Del Castillo E., Camarero J.J., Vavrčik H., Camarero J.J., Bryukhanova M.V., Jyske T., Gričar J., Gryc V., De Luis M., Vieira J., Kirilyanov A.V., Oberhuber W., Treml V., Huang J.G., Li X., Swidrak I., Deslauriers A., Liang E., Nöjd P., Gruber A., Nabais C., Morin H., Krause C., King G., Fournier M., Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests, *Nature Plants*, 2015, Vol. 1, p. 6.
- Fritts H.C., *Tree Rings and Climate*, Academic Press, 1976, 567 p.
- Hirota M., Holmgren M., Van Nes E.H., Scheffer M., Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions, *Science*, 2011, Vol. 334, pp. 232–235. <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm>
- Kalinina E.V., Knorre A.A., Fonti M.V., Vaganov E.A., Seasonal formation of tree rings in Siberian larch and Scots pine in the southern taiga of Central Siberia, *Russian J. Ecology*, 2019, Vol. 50, No. 3, pp. 227–233.
- Kaufmann R.K., D'Arrigo R.D., Paletta L.F., Tian H.Q., Jolly W.M., Myneni R.B., Identifying climatic controls on ring width: the timing of correlations between tree rings and NDVI, *Earth Interactions*, 2008, Vol. 12, pp. 1–14.
- Lloyd A.H., Fastie C.L., Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska, *Climate Change*, 2002, Vol. 52, pp. 481–509.
- Medvedeva M.A., Elsakov V.V., Savin I.Y., Bartalev S.A., O svyazi fenologicheskogo razvitiya rastitel'nosti taezhnoi zony s velichinoy NDVI, opredelennoi po sputnikovym dannym (About the correlation between vegetation phenological dynamics of northern taiga and satellite based NDVI values), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 319–329.

- Miklashevich T.S., Bartalev S.A., Metod opredeleniya fenologicheskikh kharakteristik rastitel'nogo pokrova na osnove vremennykh ryadov sputnikovykh dannyykh (Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 9–24.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L., The interpretation of spectral vegetation indexes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, Vol. 33, pp. 481–486.
- Pasho E., Alla A.Q., Climate impacts on radial growth and vegetation activity of two co-existing Mediterranean pine species, *Canadian J. Forest Research*, 2015, Vol. 45, pp. 1748–1756.
- Sass-Klaassen U., Fonti P., Cherubini P., Gričar J., Robert E.M.R., Steppe K., Bräuning A., A tree-centered approach to assess impacts of extreme climatic events on forests, *Frontiers in Plant Science*, 2016, Vol. 7, pp. 1069.
- Soukhovolsky V.G., Ivanova Y.D., Ovchinnikova T.M., Botvich I.Y., Modelirovanie fenodinamiki listopadnykh drevesnykh porod (Simulation of phenodynamics of deciduous tree species), *Lesovedenie*, 2017, No. 4, pp. 293–302.
- Vaganov E.A., Registratsiya potepleniya v tekushchem stoletii kletkami godichnykh kolets derev'ev (Registration of warming in the current century by tree-ring cells), *Doklady Akademii nauk*, 1996, Vol. 351, No. 2, pp. 281–283.
- Vicente-Serrano S.M., Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region, *Natural Hazards*, 2007, Vol. 40, pp. 173–208.
- Zuidema P.A., Frank D., Forests: Tree rings track climate trade-offs, *Nature*, 2015, Vol. 523, pp. 531.

УДК 581.5:57.045

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ ТОПОЛЯ БЕРЛИНСКОГО И ЛИПЫ МЕЛКОЛИСТНОЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ¹

© 2023 г. Д. А. Зайцев^а, *, Буй Динь Дык^б, А. В. Селиховкин^б

^аЛенинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства “Белогорка” – филиал ФГБНУ “ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха”,

ул. Институтская, 1, д. Белогорка, Гатчинский р-он, Ленинградская обл., 188338 Россия

^бСанкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*E-mail: disoks@gmail.com

Поступила в редакцию 18.02.2021 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Исследовалось влияние температуры и осадков на изменение радиального прироста древесины тополя берлинского (*Populus × berolinensis* Dipp.) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в Санкт-Петербурге. Керны отобраны со старых деревьев в парке Лесотехнического университета, в Палевском сквере, в г. Пушкине (тополь) и в Московском парке Победы (липа). Для исключения влияния фактора возраста образца на изменение ширины его годичных колец были использованы общепринятые методы детрендинга, расчеты проводились в программном обеспечении Arstan. Колебания осадков и температуры зимнего периода значимо не влияют на рост тополя и липы в Санкт-Петербурге. Летние осадки оказывают положительное, но не определяющее воздействие, в некоторых случаях радиальный прирост древесины увеличивается с ростом количества осадков. Температура не оказывает значимого воздействия на стандартизированные (очищенные от влияния возраста) показатели прироста. Нестандартизированные средние значения прироста при увеличении температуры в июле–сентябре достоверно снижаются. Воздействие температуры и осадков, по-видимому, проявляется опосредованно, усугубляя или сглаживая воздействие других факторов, в особенности фактора загрязнения воздуха. Воздействие загрязняющих веществ усиливается при повышении температуры в конце вегетационного сезона, т.к. происходит их накопление на поверхности листьев. Осадки смывают загрязняющие вещества, снижая интенсивность влияния загрязнения. Снижение прироста во второй половине 1990-х гг. у тополя при отсутствии такового у липы объясняется последствиями продолжительной вспышки массового размножения тополёвой моли – пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella*) в 1991–1999 гг. Высказанные предположения требуют дополнительных исследований, в частности определения уровня загрязнения листьев в течение вегетационного сезона и учета воздействия других факторов.

Ключевые слова: радиальный прирост древесины, *Populus × berolinensis* Dipp., *Tilia cordata* Mill., климатические факторы, городские насаждения, стандартизация прироста.

DOI: 10.31857/S0024114823010114, EDN: NKDFCX

Насаждения Санкт-Петербурга, крупнейшего северного мегаполиса, имеют сложную структуру в плане административной принадлежности, выполняемых функций, породного состава, природных условий и др. Воздействие экологических факторов на зелёные насаждения в городской среде специфично. Загрязнение воздуха, воды и почвы, изменение гидрологического режима, формирование своеобразных почвенных струк-

тур, изменение микроклиматических условий, в особенности увеличение температуры и суммы осадков в урбанизированных средах, формируют ответные реакции растений, существенно отличающиеся от таковых в природной среде (Lovett et al., 2000; Jillian et al., 2003; Волошук, Воронков, 2009; Алексеев и др., 2019).

Вблизи северной границы ареала древесные растения более уязвимы к воздействию негативных факторов как биогенных, так и климатических. В окрестностях Санкт-Петербурга проходит

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-16-00065.

северная граница ареалов для значительного числа видов древесных растений, в частности для дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.) и др. (Бялт и др., 2019). В последние десятилетия в Санкт-Петербурге происходит довольно быстрое изменение климата. Среднегодовая температура в 1931–1960 гг. составляла 4.6°C, в 1961–1990 гг. — 5.0°C, а в 1991–2020 — уже 6.3°C. Растет и среднее значение суммы осадков. Причем особенно резко температура выросла за последние 30 лет, а осадки — за последние 60 (Архив погоды в Санкт-Петербурге).

Изучению состояния городских насаждений и факторов, влияющих на его динамику, посвящено множество исследований (Vrecenak et al., 1989; Ковязин и др., 2002; Фёдорова и др., 2008; Фёдорова, 2009; Lu et al., 2010; Koeser et al., 2014; Алексеев и др., 2019 и др.), защищён ряд диссертаций (Мошеникова, 2011; Тимофеева, 2015; Ходачек, 2019 и др.). В этом плане для изучения ответных реакций древесных растений на воздействие экологических факторов, в особенности антропогенных и погодных, чрезвычайно эффективны дендрохронологические методы. Эти методы позволяют провести ретроспективный анализ состояния насаждений и воздействия на них различных факторов (Ловелиус, 1979, 2000, 2001; Cook, 1985). Однако по каким-то причинам радиальный прирост почти не используется как интегральный показатель состояния городских насаждений Санкт-Петербурга (Фёдорова, 2009; Мошеникова, 2011; Тимофеева, 2015; Бухарина и др., 2007; Ковязин и др., 2002; Ходачек, 2019; Материалы, 2020 и др.) и неизвестно, в какой степени динамика температуры и осадков воздействует на состояние насаждений в условиях Санкт-Петербурга (далее — СПб). Задачей данного исследования было установление роли основных климатических факторов (температуры и осадков) в изменении радиального прироста древесины лиственных пород городских насаждений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Основным исследуемым видом древесных растений был выбран тополь берлинский (*Populus × berolinensis* Dipp.), гибрид — тополь лавролистный (*P. laurifolia* Ledeb.) и тополь черный пирамидальный (*P. nigra* var. *italica* Münchh.) — основной гибрид тополей, который массово высаживали после Великой Отечественной войны (Бялт и др., 2019). Это позволило отобрать образцы древесины с компактно расположенных групп деревьев в трех точках — в парке Лесотехнического университета (северная часть СПб), в Палевском сквере

(пр. Елизарова, Невский район, центральная часть СПб), на Привокзальной площади и на Железнодорожной ул. (Пушкин, южный пригород СПб). Для проведения сравнительного анализа влияния климатических показателей на прирост древесины были также собраны керны у липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в Московском парке Победы, расположенном в южной части города.

Деревья, с которых отбирались керны, в каждой точке были жизнеспособными и располагались компактными группами. Керны отбирались на высоте груди приростным буравом Пресслера от 20 модельных деревьев. Возраст деревьев во всех парках варьировал от 60 до 80 лет, за исключением двух экземпляров липы мелколистной в Московском парке Победы, возраст которых составил до 83 и 89 лет. Изучение макроструктурных показателей древесины проводилось с помощью бинокулярного микроскопа МБС–9. Для расчетов использовался основной массив полученных данных за период с 1961 по 2018 гг.

Для оценки силы климатического сигнала в полученных данных использовался коэффициент чувствительности (Vaganov et al., 2006). Коэффициент чувствительности показывает, насколько варьирует радиальный прирост по годам, т.е. реакцию древостоя на различные внешние воздействия. Коэффициент вычисляется путем нахождения абсолютного значения разности соседних значений ширины колец, деленной на их среднюю величину. Древостой показывает хороший отклик на метеопараметры, если коэффициент чувствительности составляет не менее 0.2 (Vaganov et al., 2006).

В связи с различным возрастом исследуемых модельных деревьев (в основной массе в пределах двух классов возраста) использование усредненных абсолютных показателей прироста древесины может привести к неточной оценке влияния климата на прирост (Schweingruber, 1996). В связи с этим для исключения влияния фактора возраста образца в изменении ширины его годовичных колец были использованы общепринятые методы детрендinга (Fritts, 1976; Cook, 1985; Methods, 1990; Schweingruber, 1996; Vaganov et al., 2006). Расчеты проводились в программном обеспечении Arstan, которое позволило подобрать кривую хода роста индивидуально для каждого образца в связи с различиями в возрасте дерева на момент отбора керна (Cook, 1985). Для исключения тренда возраста применялись различные кривые, наилучшим образом отражающие ход роста дерева на разных периодах жизни. Использовались негативная (отрицательная) экспонента, линейная функция с отрицательным или нулевым уклоном,



Рис. 1. Динамика средней температуры и суммы осадков в Санкт-Петербурге.

или кривая Hugershoff, которая включает в себя функции полинома и отрицательной экспоненты (Cook, 1985).

После обработки в программном обеспечении Arstan были получены индексы прироста, показывающие уже очищенный от возрастного тренда сигнал. Индексы вычислялись путем деления измеренного показателя прироста на показатель модели. Таким образом, стандартизация данных предусматривала индексирование данных замеров ширины годичных колец по формуле:

$$I = if/is \times 100\%,$$

где I — относительный индекс, %;

if — фактическая ширина годичного кольца, мм;
 is — сглаженные значения нормы прироста в мм, в зависимости от возраста, рассчитанные в программе Arstan с применением вышеописанных кривых.

Полученные стандартизированные индексы прироста по образцам усреднялись в обобщенную древесно-кольцевую хронологию по пробной площади. В дальнейшем анализе применялись как абсолютные величины ширины годичного кольца, так и полученные стандартизированные индексы как более чувствительные для выделения достоверного воздействия внешних факторов на прирост. Для анализа влияния климатических факторов на проиндексированные древесно-кольцевые хронологии был применен ранговый корреляционный анализ по Спирмену как количественная оценка связи между исследуемыми явлениями.

В качестве климатических показателей использовались среднегодовая температура и сумма осадков за вегетационный сезон, расчетный период с мая по конец сентября составил 123 дня, также

применялся и показатель общей суммы осадков за год (Архив погоды в Санкт-Петербурге).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние показатели температуры и суммы осадков в Санкт-Петербурге за период с 1960 по 2018 г. варьируют в относительно небольших пределах (рис. 1), что в целом характерно для климата города (Материалы, 2020). В последние два десятилетия намечился тренд увеличения температуры.

Вариация прироста тополя после перехода деревьев во второй-третий классы возраста (1970 г. и далее) резко снижается (рис. 2). Затем до 2003 г. амплитуда колебаний изменяется в относительно небольших пределах. В 2003–2004 гг. наблюдается резкое снижение прироста в 2003–2007 гг., которое затем восстанавливается до средних значений. Следует отметить также некоторое снижение прироста на всех объектах в середине-второй половине 1990-х гг.

О пригодности полученных данных для дендрохронологического анализа говорят достаточно высокие коэффициенты чувствительности (0.20–0.22) на всех изучаемых локациях роста тополя берлинского, которые являются показателем реакции на факторы внешней среды, лимитирующие прирост.

Результаты расчета коэффициентов ранговой корреляции позволили оценить силу и направленность связи климатических показателей и годичного прироста. Обращает на себя внимание значимая отрицательная связь средней температуры вегетационного периода (в большинстве случаев также среднемесячной) и неиндексиро-

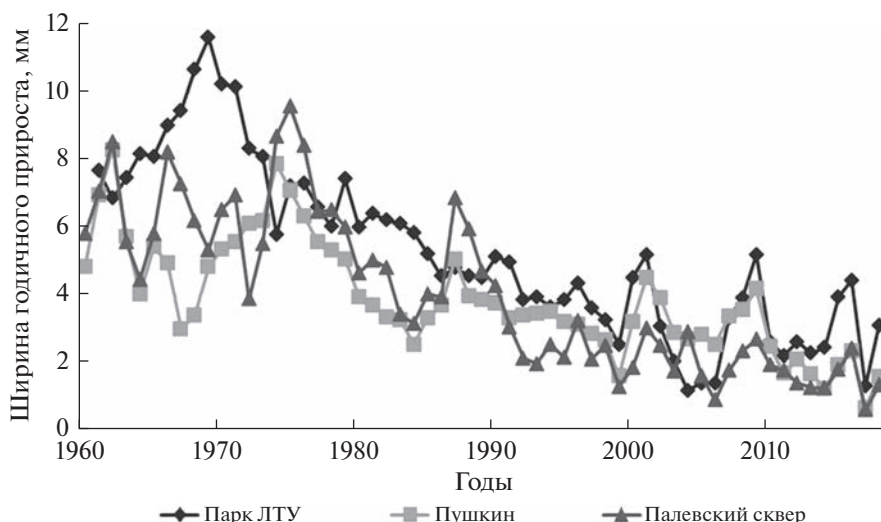


Рис. 2. Динамика ширины годичного радиального прироста древесины тополя берлинского в Санкт-Петербурге.

ванных значений ширины годичного прироста тополя берлинского (табл. 1). При этом для стандартизированных показателей значимых корреляций с температурой не было выявлено. По-видимому, стандартизация привела к излишнему сглаживающему эффекту в плане реакции тополя на такой фактор, как температура.

С показателями суммы осадков присутствует локальная значимая положительная корреляционная связь только для стандартизированных показателей прироста в Палевском сквере (табл. 2). Соответственно, наблюдается положительная корреляционная связь прироста с динамикой гидро-термического коэффициента Селянинова для данного объекта (табл. 3). В остальных случаях значимая корреляционная связь между радиальным приростом и суммой осадков отсутствует.

Однако следует отметить, что для индексированных показателей прироста коэффициенты корреляции прироста с суммой осадков, хотя не значимы на уровне $p < 0.05$, все-таки существенно выше, чем для неиндексированных значений (табл. 2).

Рассчитав коэффициенты корреляции между приростом, среднегодовой температурой и суммой осадков за весь год, мы получили такое же распределение, как и для вегетационного сезона. Значимая отрицательная корреляционная связь наблюдается для осредненных радиальных приростов и температуры: парк ЛТУ — $R_s = -0.56$; Палевский сквер — $R_s = -0.56$; Пушкин — $R_s = -0.48$; положительная связь для прироста и суммы осадков в Палевском сквере — $R_s = 0.30$. Корреляционная связь между этими показателями по месяцам за пределами вегетационного сезона незначима.

Таблица 1. Коэффициенты ранговой корреляции R_s между средними значениями радиального прироста тополя берлинского и средней температурой

Месяц	Корреляции R_s для осредненных радиальных приростов			Корреляции R_s для стандартизированных хронологий		
	ЛТУ	Палевский сквер	Пушкин	ЛТУ	Палевский сквер	Пушкин
V	-0.23	-0.35	-0.24	0.02	-0.04	0.12
VI	-0.08	-0.19	-0.10	-0.08	-0.17	-0.11
VII	-0.42	-0.40	-0.24	-0.17	-0.08	0.06
VIII	-0.41	-0.47	-0.49	0.13	-0.12	-0.09
IX	-0.41	-0.35	-0.42	-0.26	0.11	0.01
За весь вег. период	-0.47	-0.54	-0.43	-0.24	-0.08	0.04

Примечание. Полужирным шрифтом выделены показатели, значимые при $p < 0.05$.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции по Спирмену R_s между средними значениями радиального прироста тополя берлинского и суммой осадков

Месяц	Корреляции R_s для осредненных радиальных приростов			Корреляции R_s для стандартизированных хронологий		
	ЛТУ	Палевский сквер	Пушкин	ЛТУ	Палевский сквер	Пушкин
V	−0.19	−0.10	−0.21	−0.12	−0.06	−0.22
VI	−0.23	−0.04	−0.03	−0.07	0.22	0.12
VII	−0.07	−0.08	−0.03	0.11	0.22	0.13
VIII	−0.09	0.05	0.04	−0.21	0.26	0.22
IX	0.13	0.15	0.09	0.07	0.11	−0.06
За весь вег. период	−0.10	−0.04	−0.08	−0.11	0.31	0.11

Примечание. Полужирным шрифтом выделены показатели, значимые при $p < 0.05$.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции по Спирмену между средними значениями гидротермических коэффициентов увлажнения Селянинова и радиального прироста тополя берлинского за период с мая по сентябрь включительно

Корреляции R_s по месяцам для осредненных радиальных приростов			Корреляции R_s для стандартизированных хронологий		
ЛТУ	Палевский сквер	Пушкин	ЛТУ	Палевский сквер	Пушкин
−0.08	0.09	0.05	−0.05	0.29	0.12

Примечание. Полужирным шрифтом выделены показатели, значимые при $p < 0.05$.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции по Спирмену между показателями радиального прироста липы мелколистной и климатическими факторами

Месяц	Корреляции R_s со средней температурой		Корреляции R_s с суммой осадков	
	для осредненных приростов	для стандартизированных хронологий	для осредненных приростов	для стандартизированных хронологий
V	−0.13	0.04	−0.06	0.05
VI	0.03	0.08	−0.09	0.12
VII	−0.16	0.12	0.03	0.14
VIII	−0.22	0.00	0.16	0.25
IX	−0.14	0.00	−0.03	−0.05
За весь вег. период	−0.18	0.10	0.04	0.27

Примечание. Полужирным шрифтом выделены показатели, значимые при $p < 0.05$.

Для липы мелколистной исследование показало более высокий коэффициент чувствительности на внешние воздействия, чем для тополя (0.26). Однако для климатических воздействий значимая, но слабая корреляционная связь отмечена только между суммой осадков и приростом для стандартизированных хронологий (табл. 4). Значимых корреляций прироста и средних температур выявлено не было.

Сопоставление коэффициентов корреляции между приростом, температурой и осадками за год, за вегетационный сезон и отдельные месяцы показали, что колебания осадков и температуры зимнего периода значимо не влияют на рост тополя и липы в Санкт-Петербурге. Это вполне понятно. Снежный покров в Санкт-Петербурге исчезает к началу апреля (Архив погоды в Санкт-Петербурге), а к началу вегетационного сезона полностью смывается

дождями. Температура в зимний период обычно не опускается до значений менее -20°C , однако частые колебания температуры нередко приводят к появлению морозобойных трещин на отдельных деревьях (Фёдорова и др., 2008; Федорова, 2009; Селиховкин и др., 2019). По-видимому, это воздействие может проявляться локально и в целом не оказывает существенного влияния на прирост.

Некоторое воздействие на динамику прироста оказывают колебания температуры и осадков в течение вегетационного сезона. Положительное, но не определяющее воздействие летних осадков вполне объяснимо. Количество осадков и влажность в Санкт-Петербурге превышают средние показатели по Северо-западу (Научно-прикладной, 1988). Влаги более чем достаточно для нормального развития растений, при этом на всех участках, где проводились исследования, ливневый сток организован хорошо. Подтопления корневой системы не происходит. Однако в конце вегетационного периода из-за пылевого загрязнения ассимиляционного аппарата фотосинтетическая активность снижается. Соответственно, именно в августе осадки начинают играть некоторую положительную роль в росте растений.

Снижение прироста тополя при повышении температуры в Санкт-Петербурге, где сумма положительных (эффективных) температур относительно невелика, — несколько неожиданный факт. Это может быть связано с особенностями формирования радиального прироста данной породы под воздействием температуры, изменяющейся с возрастом. Уточнение особенностей физиологии, определяющих такое воздействие, требует дальнейших исследований.

Классические работы многочисленных авторов показывают, что загрязняющие вещества в городских условиях оказывают сильное воздействие на состояние городских насаждений (Жиллет, 1988; Бухарина и др., 2007). Возможно, что в городских условиях сочетание повышенной температуры и накопления загрязняющих веществ приводит к их более активной ассимиляции и усилению отравляющего воздействия. Накопление загрязняющих веществ должно происходить, начиная с середины сезона, и именно в июле–сентябре отмечается снижение прироста при повышении температуры, а в Палевском сквере у тополя и в Московском парке Победы у липы положительное воздействие осадков, смывающих загрязняющие вещества с листьев, отмечено в августе. Нельзя исключать и возможное влияние таких антропогенных факторов, как уплотнение и выемка грунта, нередкие в Санкт-Петербурге аварии трубопроводов и разливы горячей воды или сточных вод и т.п.

Снижение прироста во второй половине 1990х гг. у тополя при отсутствии такового у липы объясняется продолжительной (1991–1999 гг.) вспышкой массового размножения тополёвой моли — пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella*) (Буй Динь Дык и др., 2021), во время которой в течение нескольких лет повреждались все листья на тополях берлинских и бальзамических в Санкт-Петербурге (Селиховкин, 2010; Буй Динь Дык и др., 2021). Наиболее заметное снижение прироста в этот период наблюдалось в Палевском сквере, в котором плотность популяции вредителя была наибольшей. В 2017 г в этом районе началась вторая вспышка массового размножения, распространявшаяся в настоящее время на всю территорию города (Мамаев и др., 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что в большинстве случаев температура и осадки в Санкт-Петербурге не оказывают достоверного влияния на рост и, соответственно, состояние тополей, во всяком случае, исследуемого тополя берлинского. Воздействие температуры и осадков, по-видимому, проявляется опосредованно, усугубляя или сглаживая воздействие других факторов, в особенности загрязнения воздуха. Кроме того, могли оказывать существенное воздействие и другие антропогенные факторы, связанные с загрязнением и переуплотнением почвы. Серьезное воздействие оказывают и биологические факторы, вредители и болезни, способные привести насаждения к массовой гибели (Селиховкин и др., 2019, 2020). Однако высказанные предположения требуют дополнительных исследований, в частности определения уровня загрязнения листьев в течение вегетационного сезона и учёта воздействия других факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Ходачек О.А., Селиховкин А.В. Анализ факторов ослабления хвойных древостоев в рекреационных насаждениях // Биосфера. 2019. Т. 11. № 1. С. 48–61.
- Архив погоды в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс]: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Санкт-Петербурге (дата обращения: 10.10.2020).
- Буй Динь Дык, Леонтьев Л.Л., Барышникова С.В., Селиховкин А.В. Последствия массового размножения тополёвой нижнесторонней моли-пестрянки и других минирующих микрочешуекрылых в Санкт-Петербурге // Лесоведение. 2021. № 4. С. 372–378.
- Бухарина И.Л., Поварнишина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных расте-

- ний в урбанизированной среде: монография. Ижевск: ИЖГСХА, 2007. 216 с.
- Бялт В.В., Фирсов Г.А., Бялт А.В., Орлова Л.В. Культурная флора г. Санкт-Петербурга (Россия) и ее анализ // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журн. 2019. № 2(30). С. 11–103. URL: http://vestospu.ru/archive/2019/articles/2_30_2019.pdf. (дата обращения: 10.10.2020).
- Волощук А.Я., Воронков Н.Н. Зеленые насаждения внутриквартального озеленения в Санкт-Петербурге. СПб: СПбГЛТА, 2009. 47 с.
- Жилет Д.Г. Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 536 с.
- Ковязин В.Ф., Минкевич И.И., Шабнов В.М. Древесные породы зеленых насаждений Санкт-Петербурга и Пушкина, мониторинг их состояния и способы его улучшения. СПб.: СПбГПУ, 2002. 88 с.
- Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- Ловелиус Н.В. Дендроиндикация. Dendroindication. СПб.: ПАНИ, 2000. 313 с.
- Ловелиус Н.В. Становление дендроиндикации как направления научных и прикладных исследований. СПб.: Европейский дом, 2001. 312 с.
- Мамаев Н.А., Буй Динь Дык, Селиховкин А.В. Вторая вспышка размножения тополёвой моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 233. С. 81–94.
- Материалы оценки воздействия на окружающую среду. Методики оценки состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга и нормативов качества зеленых насаждений. СПб, 2020. 72 с. URL: www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2020/09/24/05/OBOS_Metodika_ekoocenki_ZH_2020_posle_obsuzhdeniy.pdf (дата обращения: 10.10.2020).
- Моценикова Н.Б. Оценка экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. М., 2011. 19 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 3. Карельская АССР, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Калининская и Смоленская области. / Под ред. Н.С. Смирнова. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 693 с.
- Селиховкин А.В. Особенности популяционной динамики тополёвой нижнесторонней моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Gracillariidae) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 192. С. 220–235.
- Селиховкин А.В., Варенцова Е.Ю., Зарудная Г.И., Поповичев Б.Г., Мусолин Д.Л. Вредители и патогены древесных растений в рекреационных насаждениях Санкт-Петербурга и окрестностей // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Матер. IV науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. С. 157–160.
- Селиховкин А.В., Дренкхан Р., Мандельштам М.Ю., Мусолин Д.Л. Инвазии насекомых-вредителей и грибных патогенов древесных растений на северо-западе европейской части России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 2. С. 263–283.
- Тимофеева Ю.А. Оценка влияния листовых вредителей на состояние липы в парковых насаждениях Санкт-Петербурга: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02. СПб., 2015. 21 с.
- Федорова Н.Б., Осипов Д.В., Григорьев А.С. Результаты мониторинга зеленых насаждений общего пользования в 2007 году // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2007 г. СПб.: Сезам-Принт, 2008. С. 347–355.
- Федорова Н.Б. Зеленые насаждения Санкт-Петербурга и мониторинг их состояния // Лесной вестник. 2009. № 5. С. 202–206.
- Ходачек О.А. Факторы, определяющие состояние хвойных пород в насаждениях, имеющих рекреационное значение в Санкт-Петербурге, Ленинградской области и соседних территориях: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02. СПб., 2019. 19 с.
- Cook E.R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. Dissertation, University of Arizona, Tucson, 1985. 183 p.
- Fritts H.C. Tree Rings and climate. London: Academic Press Inc., 1976. 567 p.
- Jillian W.G., Clive G.J., Todd E.D. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City // Nature. 2003. № 424. P. 183–187.
- Koeser A.K., Gilman E.F., Paz M., Harchick C. Factors influencing urban tree planting program growth and survival in Florida, United States // Urban Forestry & Urban Greening. 2014. № 13(4). P. 655–661.
- Lovett, G.M., Traynor M.M., Pouyat R.V., Carreiro M.M., Wei-Xing Zhu, Baxter J.W. Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient // Environmental Science and Technology. 2000. № 34(20). P. 4294–4300.
- Lu J.W.T., Svendsen E.S., Campbell L.K., Greenfeld J., Braden J., King K.L., Falxa-Raymond N. Biological, social, and urban design factors affecting young street tree mortality in New York City // Cities and the Environment. 2010. № 3(1). Article 5. P. 1–15.
- Cook E.R., Kairiukstis L.A. Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science. Boston; London: Kluwer Acad. Publ, 1990. 394 p.
- Schweingruber F.H. Tree Rings and Environment: Dendroecology. Bern: Paul Haupt. 1996. 609 p.
- Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. Growth dynamics of conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments. Ecological Studies. Springer, Berlin-Heidelberg, 2006. 358 p.
- Vrecenak A.J., Vodak M.C., Fleming L.E. The influence of site factors on the growth of urban trees // J. Arboriculture. 1989. № 15(9). P. 206–209.

Temperature and Precipitation Affect the Radial Growth of Berlin Poplar and Small-leaved Linden Trees in Saint Petersburg

D. A. Zaytsev^{1, *}, Buy Dinh Dyk², and A. V. Selikhovkin²

¹Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre, Institutskaya st., 1, Belogorka vlg, Gatchina district, Leningrad region, 188338 Russia

²Saint Petersburg Forestry University, Institutskiy ln., 5, Saint Petersburg, 194021 Russia

*E-mail: disoks@gmail.com

The effect of temperature and precipitation on the change in the radial growth of wood of Berlin poplar (*Populus × berolinensis* Dipp.) and small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in Saint Petersburg was studied. Cores were taken from old trees in the Forestry Technical University park, in the Palevsky square, in the city of Pushkin (poplar trees) and in the Moscow Victory Park (linden trees). To eliminate the influence of the samples' age factor on the change in its growth rings' width, the generally accepted detrending methods were used; the calculations were carried out in the Arstan software. Precipitation and temperature fluctuations during the winter period do not significantly affect the growth of poplar and linden in Saint Petersburg. Summer precipitation has a positive, but overall not a decisive effect, in some cases, the radial growth increases with increasing rainfall. Temperature has no significant effect on standardised (age-adjusted) growth rates. Non-standardised average values of growth under the increasing temperature conditions in July–September significantly decrease. The effects of temperature and precipitation appear to be indirect, exacerbating or offsetting the effects of other factors, especially the air pollution. The impact of pollutants increases with the increase in temperatures at the end of the growing season, because they accumulate on the leaves' surface. Precipitation washes away pollutants, reducing the intensity of their impact. Growth decline in poplar trees in the second half of the 1990s, in the absence of such an occurrence in linden, can be explained by the consequences of a prolonged outbreak of the poplar moth (*Phyllonorycter populifoliella*) mass reproduction in 1991–1999. The above assumptions require additional research; in particular, determining the level of leaf contamination during the growing season and taking into account the impact of other factors.

Keywords: radial wood growth, *Populus × berolinensis* Dipp., *Tilia cordata* Mill., climatic factors, urban stands, standardization of wood growth.

Acknowledgements: The study has been carried out with the financial support from the RSF grant № 21-16-00065.

REFERENCES

- Alekseev A.S., Khodachek O.A., Selikhovkin A.V., Analiz faktorov oslableniya khvoynykh drevostoev v rekreatsionnykh nasazhdeniyakh (Analysis of weakening factors of coniferous stands in recreational plantations), *Biosfera*, 2019, Vol. 11, No. 1, pp. 48–61.
- Arhiv pogody v Sankt-Peterburge (St. Petersburg weather archive), available at: https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Санкт-Петербурге (October 10, 2020)
- Bui D.D., Leont'ev L.L., Baryshnikova S.V., Selikhovkin A.V., Posledstviya massovogo razmnzheniya topolevoi nizhnestoronnei moli-pestyanki i drugikh miniruyushchikh mikrocheshuekrylykh v Sankt-Peterburge (Consequences of the mass reproduction of the Poplar Moth *Phyllonorycter populifoliella* and other mining moths in St. Petersburg), *Lesovedenie*, 2021, No. 4, pp. 372–378.
- Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E., *Ekologo–biologicheskie osobennosti drevesnykh rastenii v urbanizirovannoi srede* (Ecological and biological characteristics of woody plants in an urbanized environment), Izhevsk: IzhGSKhA, 2007, 216 p.
- Byalt V.V., Firsov G.A., Byalt A.V., Orlova L.V.S., Kul'turnaya flora g. Sankt-Peterburga (Rossiya) i ee analiz (Cultural flora of St. Petersburg (Russia) and its analysis), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2019, No. 2(30), pp. 11–103, available at: http://vestospu.ru/archive/2019/articles/2012_2030_2019.pdf (October 10, 2020)
- Cook E.R., *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*, Dissertation, University of Arizona, Tucson, 1985, 183 p.
- Cook E.R., Kairiukstis L.A., *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science*, Boston; London: Kluwer Acad. Publ, 1990, 394 p.
- Fedorova N.B., Osipov D.V., Grigor'ev A.S., Rezul'taty monitoringa zelenykh nasazhdenii obshchego pol'zovaniya v 2007 godu (Results of the monitoring of public green areas in 2007), In: *Okhrana okruzhayushchei sredy, prirodopol'zovanie i obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti v Sankt-Peterburge v 2007 g.* (Environmental protection, nature management and ensuring environmental safety in Saint Petersburg for 2007), Saint Petersburg: Sezam-Print, 2008, pp. 347–355.
- Fedorova N.B., Zelenye nasazhdeniya Sankt-Peterburga i monitoring ikh sostoyaniya (Green plantations in St. Petersburg and monitoring of their condition), *Lesnoi vestnik*, 2009, No. 5, pp. 202–206.
- Fritts H.C., *Tree Rings and climate*, London: Academic Press Inc., 1976, 567 p.
- Jillian W.G., Clive G.J., Todd E.D., Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City, *Nature*, 2003, No. 424, pp. 183–187.
- Khodachek O.A., *Faktory, opredelyayushchie sostoyanie khvoynykh porod v nasazhdeniyakh, imeyushchikh rekreatsionnoe znachenie v Sankt-Peterburge, Leningradskoi oblasti i sosednikh territoriyakh. Avtoreferat diss. kand. biol. nauk*

- (Factors determining the condition of conifers in plantations of recreational value in St. Petersburg, Leningrad Oblast and neighboring territories. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Saint Petersburg, 2019, 19 p.
- Koeser A.K., Gilman E.F., Paz M., Harchick C., Factors influencing urban tree planting program growth and survival in Florida, United States, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, No. 13(4), pp. 655–661.
- Kovyazin V.F., Minkevich I.I., Shabnov V.M., *Drevesnye porody zelenykh nasazhdenii Sankt-Peterburga i Pushkina, monitoring ikh sostoyaniya i sposoby ego uluchsheniya* (Tree species of plantations in St. Petersburg and Pushkin, their monitoring and ways to improve their condition), Saint Petersburg: SPbGPU, 2002, 88 p.
- Lovelius N.V., *Dendroindikatsiya* (Dendroindication), Saint Petersburg: PANI, 2000, 313 p.
- Lovelius N.V., *Izmenchivost' prirosta derev'ev. Dendroindikatsiya prirodnykh protsessov i antropogennykh vozdviizhii* (Variability of tree growth. Dendroindication of natural processes and anthropogenic influences), Leningrad: Nauka, 1979, 232 p.
- Lovelius N.V., *Stanovlenie dendroindikatsii kak napravleniya nauchnykh i prikladnykh issledovaniy* (Formation of dendroindication as a direction of scientific and applied research), Saint Petersburg: Evropeiskii dom, 2001, 312 p.
- Lovett, G.M., Traynor M.M., Pouyat R.V., Carreiro M.M., Wei-Xing Zhu, Baxter J.W., Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient, *Environmental Science and Technology*, 2000, No. 34(20), pp. 4294–4300.
- Lu J.W.T., Svendsen E.S., Campbell L.K., Greenfeld J., Braden J., King K.L., Falxa-Raymond N., Biological, social, and urban design factors affecting young street tree mortality in New York City, *Cities and the Environment*, 2010, No. 3(1), Article 5, pp. 1–15.
- Mamaev N.A., Bui D.D., Selikhovkin A.V., Vtoraya vspyshka razmnzheniya topolevoi moli-pestryanki Phyllonorycter populifoliella v Sankt-Peterburge (Second outbreak of poplar moth Phyllonorycter populifoliella in St. Petersburg), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2020, No. 233, pp. 81–94.
- Materialy otsenki vozdviizhiya na okruzhayushchuyu sredu. Metodiki otsenki sostoyaniya zelenykh nasazhdenii Sankt-Peterburga i normativov kachestva zelenykh nasazhdenii*, (Materials for assessing the impact on the environment. Methods for assessing the condition of green areas in St. Petersburg and the quality standards for green areas), Saint Petersburg, 2020, 72 p. available at: www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2020/09/24/05/OBOS_Metodika_eko-otsenki_3H_2020_posle_obscuzhdeniiy.pdf (October 10, 2020).
- Moshchenikova N.B., *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya zelenykh nasazhdenii Sankt-Peterburga, Avtoreferat diss. kand. biol. nauk* (Assessment of the ecological condition of green plantations in St. Petersburg. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Moscow, 2011, 19 p.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye* (Research and practical handbook on climate of the USSR. Series 3. Long-term data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, Parts 1–6, Vol. 3, Karel'skaya ASSR, Leningradskaya, Novgorodskaya, Pskovskaya, Kalininskaya i Smolenskaya oblasti, 693 p.
- Schweingruber F.H., *Tree Rings and Environment: Dendroecology*, Bern: Paul Haupt, 1996, 609 p.
- Selikhovkin A.V., Drenkhan R., Mandel'shtam M.Y., Musolin D.L., Invazii nasekomykh – vrediteli i gribnykh patogenov drevesnykh rastenii na severo-zapade evropeiskoi chasti Rossii (Invasions of insect pests and fungal pathogens of woody plants into the northwestern part of European Russia), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2020, Vol. 65, No. 2, pp. 263–283.
- Selikhovkin A.V., Osobennosti populyatsionnoi dinamiki topolevoi nizhnestoronnei moli-pestryanki Phyllonorycter populifoliella Tr. (Gracillariidae) (Peculiarities of the population dynamics of the poplar lowersided mottled moth Phyllonorycter populifoliella Tr. (Gracillariidae)), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2010, Vol. 192, pp. 220–235.
- Selikhovkin A.V., Varentsova E.Y., Zarudnaya G.I., Popovichev B.G., Musolin D.L., Vrediteli i patogeny drevesnykh rastenii v rekreatsionnykh nasazhdeniyakh Sankt-Peterburga i okrestnostei (Woody plant pests and pathogens in recreational plantations in St. Petersburg and surroundings), *Les Rossi: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie* (Forests of Russia: politics, industry, science, education), Proc. of IV Sci.-Tech. Conf, Saint Petersburg: SPbGLTU, pp. 157–160.
- Timofeeva Y.A., *Otsenka vliyaniya listoyadnykh vrediteli na sostoyanie lipy v parkovykh nasazhdeniyakh Sankt-Peterburga. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* (Evaluation of the influence of phyllophagous pests on the state of lime in parks of St. Petersburg. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), St. Petersburg, 2015, 21 p.
- Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V., *Growth dynamics of conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments. Ecological Studies*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2006, 358 p.
- Voloshchuk A.Y., Voronkov N.N., *Zelenye nasazhdeniya vnutrikvartal'nogo ozeleneniya v Sankt-Peterburge* (Green spaces for intra-block landscaping in St. Petersburg), Saint Petersburg: SPbGLTA, 2009, 47 p.
- Vrecenak A.J., Vodak M.C., Fleming L.E., The influence of site factors on the growth of urban trees, *J. Arboriculture*, 1989, No. 15(9), pp. 206–209.
- Zhillet D.G., *Zagryaznenie vozdukh i zhizn' rastenii* (Air pollution and plant life), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 536 p.

УДК 630*232(07)

ВЛИЯНИЕ ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИХ И БИОТОПИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СОСТОЯНИЕ КУЛЬТУР ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ В ФАЗЕ ПРИЖИВАНИЯ НА ЮГЕ-ВОСТОКЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. Е. М. Копцева^{а, *}, Ю. В. Кузьмина^а, И. А. Сорокина^{а, b}, А. А. Бушковский^с

^аСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^бБотанический Институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197376 Россия

^сООО «Майер-Мелнхоф Хольц Ефимовский»,
ул. Гагарина, 30, Ленинградская обл, Бокситогорский р-н, пгт Ефимовский, 187620 Россия

*E-mail: e.koptseva@spbu.ru

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

После доработки 24.11.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

В Бокситогорском районе Ленинградской области изучено влияние параметров фитоценоза (сомкнутость крон, высота, густота травостоя, проективное покрытие мхов) и биотопа (освещенность, кислотность, влажность и богатство почв) на морфометрические параметры и жизненность сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) с ОКС (открытой корневой системой) и ЗКС (закрытой корневой системой) в фазе приживания в контрастных условиях выращивания: под пологом разреженной осины, оставленной на вырубках и на открытых пространствах, вне влияния крон деревьев. Статистически доказано положительное влияние подпологового выращивания на сохранность и жизненность сеянцев обоих типов, при этом сеянцы с ЗКС обладают наилучшими показателями жизненности и приростом по главной оси. Однако высота и густота травянистого яруса в данных условиях отрицательно влияет на ветвление сеянцев. В отличие от подпологовых условий, на открытой территории состояние сеянцев больше подвержено влиянию абиотических факторов. В данных условиях обнаружена тесная положительная корреляция между жизненностью сеянцев с ОКС и основными параметрами почв (влажностью, кислотностью и обеспеченностью азотом). В силу лучшей освещенности на лишенных полога делянках сеянцы с ОКС имеют стабильно большие показатели прироста по главной оси. В данных условиях травяной покров на стадии приживания ели оказывает скорее защитное действие, поддерживая более оптимальный режим увлажнения и притенения сеянцы. Обоснована целесообразность применения культур с ЗКС на открытых пространствах, поскольку они меньше подвержены негативному влиянию факторов.

Ключевые слова: подпологовые культуры ели, сеянцы, фаза приживания, открытая корневая система, закрытая корневая система, фитосреда.

DOI: 10.31857/S0024114823010084, **EDN:** NJRUGK

Одной из важнейших задач современного лесного хозяйства является эффективное восстановление лесных массивов. При этом все больше внимание уделяется экологически ориентированным технологиям создания и выращивания лесных культур.

Преобладающий и наиболее распространенный в России вид лесных культур — последующие (открытые) культуры, создаваемые на вырубках. Такие культуры наряду с известными преимуществами имеют и существенные недостатки, к которым можно отнести проведение большого числа агротехнических уходов — особенно на старых, сильно задерненных вырубках. Кроме того, на таких вырубках утрачена лесная среда: изменен со-

став напочвенного покрова, водный режим почвы, ветровой режим и другие условия среды, что негативно влияет на приживаемость и качество культур на ранних стадиях.

Наиболее уязвимой стадией молодых культур является стадия приживания, которая у хвойных растений может длиться от 1 года до 3 лет и характеризуется наибольшим отпадом (Огиевский, Хиров, 1964). С одной стороны, в фазе приживания сеянцы демонстрируют свой потенциал в зависимости от физиологических и морфологических параметров, что в дальнейшем и определит их полевые характеристики (Grossnickle, 2018). С другой стороны, экологические и топографические особенности местоположения вырубки могут

оказывать влияние на длительность стадии приживания (Писаренко, Мерзленко, 1990). При этом замечено, что основным фактором, влекущим гибель лесных культур на ранних стадиях развития, являются климатические условия (Саксонов, 2020). Опытным путем был установлен факт, что у двухлетних сеянцев ели фаза приживания продолжается год и характеризуется торможением роста в высоту и толщину (Мерзленко, Бабиц, 2002).

Значительно реже в расстроенных рубками низкополнотных древостоях создаются подпологовые культуры. Вместе с тем требования рационального использования лесных ресурсов — в том числе использования довольно широко распространенных в условиях востока Ленинградской области лесных участков со значительным запасом спелой или перестойной осины, не представляющей существенного коммерческого интереса для лесозаготовителей, — позволяют более эффективно вовлекать разреженные в результате лесозаготовительной деятельности древостои осины в процесс лесовосстановления.

Сохранение древесного яруса обеспечивает наличие ряда благоприятных условий для саженцев (Редько и др., 2018): подавления роста травяного покрова, обогащения почвы органикой за счет листового опада (Соколовский, Юренин, 2007), защиты от поздневесенних и раннелетних заморозков (Сунгурова, Сунгуров, 2012; Сюнев, 2014). Вместе с тем негативное воздействие при сохранении древостоя проявляется в виде корневой конкуренции и снижения инсоляции, что приводит к задержке роста сеянцев в высоту (Сидоренков, 2003; Агеев, 2017). Было отмечено, что состояние елового подростка под пологом древостоев зависит от характеристик почвы, микрорельефа, степени развития живого напочвенного покрова и подлеска, а также режима освещенности и температурных условий. С изменением комплекса этих факторов изменяется состояние подростка ели и его структура (Грязькин, 2001).

Зависимость ростовых процессов и развитие вегетативных органов ели европейской в основном рассматривается в зависимости от региональных климатических параметров (температуры и количества атмосферных осадков), а также почвенных факторов (Miina, Saksa, 2013; Caudullo et al., 2016; Кищенко, 2017; Саксонов, 2020). На общую требовательность ели к влагообеспеченности почв и влажности воздуха обращают внимание во многих работах (Чернышов и др., 2007; Особенности культур ..., 2014; Caudullo et al., 2016). В условиях средней тайги максимальный прирост побегов ели европейской отмечен при влажности воздуха 60–70%. Вместе с тем значения данного метеорологического фактора не находятся в условиях средней тайги в минимуме (кроме засушливых лет), поэтому относительная влажность воздуха

как региональный климатический показатель существенно не влияет на ход прироста вегетативных органов (Кищенко, 2017).

Ожидаемо, что с улучшением почвенно-грунтовых условий продолжительность и интенсивность деятельности меристематических тканей возрастает, а значит, увеличивается годичный прирост древостоев. При сравнении роста плантационных культур ели европейской показано, что в условиях Ленинградской области недостаток тепла в течение вегетационного периода может компенсироваться плодородием почв, что сокращает разницу в росте между культурами в Псковской и Ленинградской областях к 20-летнему возрасту по среднему объему ствола и текущему приросту (Бутенко, 2013).

На стадии приживания сеянцы находятся под влиянием не только климатических параметров, но и в значительной мере под влиянием параметров фитоценоза и сформированной им фитосреды. Учет лесной типологии для целей лесокультурного производства оправдан на стадии проектирования способов лесовосстановления с точки зрения будущей выживаемости искусственных насаждений в тех или иных условиях местопроизрастания. Тем не менее, на примере хвойно-широколиственных лесов Среднего Поволжья показана неоднозначность применения способов лесовосстановления с ориентацией только на лесную типологию (Черных и др., 2021).

Живой напочвенный покров, являясь одним из компонентов лесного фитоценоза, оказывает разноплановое, а главное комбинированное воздействие на лесовозобновительные процессы, производя как положительный, так и отрицательный эффект на начальные этапы возобновления леса (Санников, Санникова, 1985; Рунова, Савченкова, 2008; Фролова и др., 2019). Так, на злаковой стадии демутиации лесной растительности на вырубках образуется плотная дернина, препятствующая росту всходов древесных растений, а продукты разложения злаковой ветоши снижают энергию прорастания семян и приживаемость сеянцев сосны и ели (Рунова, Савченкова, 2008; Фролова и др., 2019). Показано, что на вырубках в условиях относительно богатых супесчаных и суглинистых почв развивается пышная травянистая растительность, затрудняющая возобновление не только хвойных, но и лиственных пород (Савченкова, 2009). Однако влияние лесной наземной растительности на регенерацию деревьев выявляется не всегда (Frolova et al., 2019).

Снизить зависимость растущих сеянцев от условий среды на ранних стадиях создания культур помогает использование контейнеризованного посадочного материала (Leinonen et al., 2009; Бартенев, 2013). Сеянцы с ЗКС хорошо себя зарекомендовали в условиях слабой конкуренции с

травянистой растительностью, годового количества осадков не менее 600–700 мм, преобладания западных влажных ветров (Бартенев, 2013). Считается, что контейнеризованные сеянцы лучше переносят период пересадки, так как за счет торфа их корневая система развивается быстрее и становится более конкурентоспособной, чем у сеянцев с открытыми корнями (Жигунов и др., 2016).

Таким образом, можно отметить, что факторы, регулирующие динамику возобновления древесных растений, многообразны и во многом зависят от среды конкретной территории и часто действуют разнонаправленно. Выявить вклад определенного фактора в общий процесс возобновления древостоя без разностороннего изучения экологических условий, складывающихся как под пологом древостоя, так и вне его влияния, невозможно.

Цель настоящего исследования – сравнительный анализ влияния эколого-ценотических условий произрастания на жизненность и параметры сеянцев ели европейской с ОКС и ЗКС на стадии приживания при различных технологиях выращивания в условиях востока Ленинградской области.

О региональных особенностях подпологового выращивания лесных культур известно сравнительно немного (Бутенко, 2013). Данное исследование является актуальным для оценки эффективности различных технологий лесовосстановления не только непосредственно на территории Ленинградской области, но и на сопредельных территориях Северо-Запада России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Сбор материала был осуществлен летом 2018 г. в Бокситогорском районе Ленинградской области, на опытных делянках культур ели европейской в границах Анисимовского и Радогощинского лесничеств. Бокситогорский район располагается в умеренно-континентальном климатическом поясе. Среднемесячная температура января составляет –10...–12°C, а июля – 15–17°C, среднегодовое количество осадков в районе – 600–750 мм (Калинченко и др., 1991). Равнинный характер описываемой территории связан с размещенной здесь докембрийско-палеозойской кристаллической гранито-гнейсовой платформы, залегающей под толщей осадочных пород и четвертичных отложений (Геоботаническое районирование ..., 1989). Основной почвообразующей породой являются валунные суглинки. Широко представлены в районе подзолистые и дерново-подзолистые суглинистые, супесчаные или песчаные почвы.

В соответствии с утвержденным перечнем лесорастительных зон и лесорастительных районов территория Бокситогорского лесничества относится к Балтийско-Белозерскому таежному району

(Приказ МПР и Экологии РФ № 569; Приказ Федерального агентства лесного хозяйства № 353).

В геоботаническом отношении территория Бокситогорского района принадлежит к Тихвинскому округу полосы южнотаежных лесов Северодвинско-Верхнеднепровской подпровинции Североевропейской таежной провинции (Геоботаническое районирование ..., 1989). Коренные леса здесь сложены елью европейской и гибридогенной елью финской (*P. × fennica*) (Regel) Kom. [*P. abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.]. В дренированных позициях рельефа обычны ельники кисличные и черничные, в понижениях распространены преимущественно ельники сфагновые. Вторичные лесные сообщества представлены мелколиственными (осиново-березовыми и березовыми) и елово-мелколиственными лесами. В нижних ярусах лесов встречаются как бореальные (черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), золотарник обыкновенный (*Solidago virgaurea* L.) и т.д.), так и неморальные виды (звездчатка ланцетолистная (*Stellaria holostea* L.), медуница неясная (*Pulmonaria obscura* Dumort.), лютик кашубский (*Ranunculus cassubicus* L.), печеночница благородная (*Hepatica nobilis* Mill.) и т.д.).

Исследования проводили на опытных делянках Анисимовского и Радогощинского лесничеств. На момент рубки на делянках Анисимовского лесничества произрастал смешанный 80-летний березняк с осинкой и елью (4Б4Ос2Е) кисличный, полнотой 0.8. Почвы – подзолы альфегумусовые супесчаные на моренных отложениях волнистых равнин. В Радогощинском лесничестве рубке подвергся 80-летний березняк с осинкой и елью (5Б4Ос1Е) травяно-дубравный с полнотой 0.8. Почвы – подзолистые поверхностно-оглеенные на завалуненных суглинках.

На опытных делянках обоих лесничеств культуры ели были высажены в контрастные условия: под полог частично сохраненного осинового древостоя и в обширных окнах площадью до 2000 м² между оставленными синузиями осины, где древесный ярус отсутствовал.

В 2016 г. на территории делянки Анисимовского лесничества произведена частичная обработка почвы, характерная для нераскорчеванных рубок (Корчагов и др., 2017). После пропашки плугом через каждые 3–3.5 м были сформированы борозды. На дно канав вручную при помощи меча Колесова сеянцы ели с ОКС были высажены в шахматном порядке на расстоянии 0.7–1 м друг от друга. Уборка порубочных остатков и выкорчевывание пней на участке не производилась. Сеянцы ели трех лет с открытой корневой системой были взяты из Тихвинского питомника и имели стандартные, согласно ГОСТ 3317-90, параметры (вы-

сота стволика — 12 см; диаметр стволика у корневой шейки — не менее 2.0 мм).

В 2016 г. в Радогощинском лесничестве высаживание сеянцев с ЗКС происходило также вручную при помощи меча Колесова в ненарушенный травяной покров без пропашки друг за другом на расстоянии 1 м. Ряды сеянцев располагались на расстоянии 3–3.5 м. Контейнеризированные сеянцы ели двух лет с аналогичными морфологическими параметрами поступили из Лужского селекционно-семеноводческого центра.

В анализ были включены 202 сеянца ели европейской. В Радогощинском лесничестве измерения проводились для 151 сеянца с ЗКС. Из них 77 сеянцев были обследованы в условиях полога осины и 74 — вне его влияния. В Анисимовском лесничестве был обследован 51 сеянец ОКС: 27 — под пологом осины и 24 — вне полога. Неравномерное количество сеянцев с ОКС и ЗКС связано с тем, что в основном в подпологовых условиях на делянках были высажены сеянцы с закрытой корневой системой. Но при этом соотношение сеянцев по условиям (наличие/отсутствие полога) примерно равномерное в каждом типе посадочного материала. У каждого сеянца были измерены прирост по главной оси (стволу) за первый и второй годы роста на делянках, прирост в питомнике, подсчитано количество распустившихся и засохших почек, оценена жизненность.

Жизненность сеянцев оценена по трем категориям. Отличной жизненностью характеризовались равномерно охвоенные растения, имеющие зеленую окраску, без признаков усыхания ветвей и хвои, с полностью раскрывшимися почками. Удовлетворительная жизненность фиксировалась для сеянцев с частично пожелтевшей хвоей и (или) несколькими (1–2) пожелтевшими, раскрывшимися недостаточно почками. Сеянцы со значительно или полностью пожелтевшей хвоей, с большим количеством пожелтевших или засохших почек относились к категории неудовлетворительной жизненности. Также фиксировалось число усохших сеянцев.

Вокруг каждого сеянца на учетных геоботанических рамках (размером 0.5×0.5 м) выполнено геоботаническое описание, которое включало: определение общего проективного покрытия растительности и проективного покрытия каждого вида из травянистого и мохового яруса, измерение господствующей высоты травостоя. Общее количество геоботанических описаний соответствовало количеству сеянцев — 202.

Дополнительно на участках с сохраненным древесным пологом при помощи высотомера была измерена высота древостоя, а также определена сомкнутость крон осин. При наличии кустарников и отрастания пород возобновления опре-

деляли их видовой состав, обилие (в процентах) и господствующую высоту.

Характеристика условий среды на учетных площадках в пределах опытных делянок проводилась методом фитоиндикации на основе экологического шкалирования; оценки факторов (влажность почвы, освещенность, богатство почвы азотом, кислотность) приведены в баллах (Ellenberg et al., 1991; Булохов, 1996). Латинские названия видов растений приведены в соответствии с The International Plant Names Index (www.ipni.org).

Обработка материала проведена при помощи пакета программы Statistica версии 12.0. Для проверки выборок на нормальность использован критерий Колмогорова-Смирнова. Поскольку распределение значений переменных (приросты сеянцев по главной оси, общая высота и количество почек сеянцев ели) не соответствовало нормальному, для дальнейшей работы с данными были использованы непараметрические методы анализа. Сравнение выборок по исследуемым параметрам проведено по критерию Краскала-Уоллиса (Kruskal–Wallis test, далее K–W test) и медианному тесту. Для выявления связи между исследуемыми параметрами сеянцев и факторами биотопа (влажность почвы, освещенность, богатство почвы азотом), экотопа (кислотность) и фитоценотическими условиями среды (сомкнутость древостоя, высота и общее проективное покрытие травянистого яруса, общее проективное покрытие мохового покрова) был использован корреляционный анализ Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика фитоценологических условий на опытных делянках. Различия в фитоценологических условиях на делянках двух лесничеств изначально определяются типом лесорастительных условий. В Радогощинском лесничестве распространены более плодородные покровные суглинки, в Анисимовском — более кислые и менее плодородные супеси. Другой существенный фактор — частичное сохранение осинового полога (высота взрослых деревьев — 25–30 м, господствующий диаметр стволов — 24–28 см). При этом сомкнутость крон осин на делянках в Радогощинском лесничестве несколько выше, чем в Анисимовском (табл. 1).

На делянках Анисимовского лесничества в ходе рубок сохранен разреженный осинник (10Ос), 80-ти лет, полнота — 0.3, где в подпологовых условиях в значительной мере доминируют луговые (в том числе виды нарушенных лугов и залежей) и опушечные виды: вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* L.), ситник развесистый (*Juncus effusus* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.). Всего здесь было отмечено 29 видов травянистых растений и

Таблица 1. Средние значения параметров фитоценозов на опытных делянках лесничеств

Культуры:	Сеянцы с ОКС (Анисимовское лес-во)		Сеянцы с ЗКС (Радогощинское лес-во)	
	под пологом осин	без полога	под пологом осин	без полога
Среднее значение сомкнутости древесного яруса (в долях от 1)	0.25 ± 0.03	0	0.36 ± 0.02	0
Среднее значение высоты травостоя, мм	350 ± 30	310 ± 20	360 ± 20	480 ± 20
Среднее значение проективного покрытия травянистого яруса, %	40 ± 5	46 ± 5	71 ± 3	76 ± 2
Среднее значение проективного покрытия мохового яруса, %	18 ± 3	12 ± 2	6.5 ± 1.5	0.7 ± 0.5
Число видов травянистого яруса	29	19	43	43
Фитоиндикационные значения показателей (баллы):				
Шкала освещенности	6.2	6.6	5.7	6.7
Шкала влажности почвы	5.8 ± 0.1	5.2 ± 0.1	5.8 ± 0.1	6.6 ± 0.1
Шкала кислотности	4.4 ± 0.1	4.5 ± 0.1	5.5 ± 0.1	5.4 ± 0.1
Шкала обеспеченности почвы азотом	4.3 ± 0.1	4.9 ± 0.2	4.5 ± 0.2	4.9 ± 0.1
Тип лесорастительных условий	Осинник кисличный на дренированных супесях		Осинник травяно-дубравный на дренированных суглинках	

три вида мхов: политрихум можжевельниковидный (*Polytrichum juniperinum* Hedw.), атрихум волнистый (*Atrichum undulatum* (Hedw.) P. Beauv), дикранелла разностороннелистная (*Dicranella heteromalla* (Hedw.) Schimp.). В условиях отсутствия древесного полога в Анисимовском лесничестве напочвенный покров был гетерогенен, в нем пятнами доминировали те же виды, что и в подпологовых условиях, а также костяника (*Rubus saxatilis* L.). Всего в данных условиях нами было выявлено меньше видов травянистых растений и только два вида мхов (политрихум можжевельниковидный, атрихум волнистый). На участке наблюдали активное возобновление рябины и осины высотой до 0.5 м. В ходе вырубki был сохранен подрост ели, а также наблюдалось редкое естественное возобновление ели.

На делянках Радогощинского лесничества сохраненный разреженный осинник (10Ос) имел чуть большую полноту — 0.4. Видовое разнообразие травяного покрова здесь оказалось значительно выше, чем в Анисимовском лесничестве — это определено большим богатством суглинистых почв. В подпологовых условиях доминантами в покрове являются неморальные и южнотаежные лесные и опушечные виды: сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), ландыш (*Convallaria majalis* L.), земляника лесная, марьянник луговой (*Melampyrum pratense* L.), медуница (*Pulmonaria officinalis*), грушанка (*Pyrola rotundifolia* L.) и костяника. Из мхов — плагиомниум остроконечный

(*Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T.J. Кор.), политрихум можжевельниковидный.

Вне полога растительность также более неравномерная, выделяется несколько локально доминирующих видов: ситник нитевидный (*Juncus filiformis* L.), черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris* L.), клевер средний (*Trifolium medium* L.). Мхи представлены только двумя видами: плагиомниум остроконечный, политрихум можжевельниковидный. Отсутствие пропашки перед посадкой лучше сохраняет травяной покров. Так, проективное покрытие травянистого яруса заметно выше в Радогощинском лесничестве (в среднем 70–75%), чем в Анисимовском (в среднем 40–45%). При этом вне полога осин оно немного выше, чем в подпологовых условиях (табл. 1). Теснота связи между высотой травостоя и сомкнутостью является статистически значимой (умеренной), коэффициент корреляции Спирмена составил –0.33. Разница по высоте травостоя более заметна в контрастных условиях Радогощинского лесничества (K–W test; $p = 0.0001$).

Значительное разрастание трав угнетает развитие мохового покрова. В связи с этим покрытие мхов в целом незначительно (не более 20%) на делянках обоих лесничеств как в подпологовых условиях, так и вне их.

Фитоиндикационное исследование, проведенное методом экологического шкалирования, выявило некоторые различия в биотопических и экотопических условиях на опытных делянках (табл. 1). Так, по показателю реакция среды (кис-

Таблица 2. Средние значения параметров сеянцев ели в отличающихся лесокультурных условиях

Параметры сеянцев (мм):	Сеянцы с ОКС (Анисимовское лес-во)		Сеянцы с ЗКС (Радогощинское лес-во)	
	под пологом осин	без полога	под пологом осин	без полога
Прирост сеянцев в питомнике	25 ± 2	27 ± 3	25 ± 2	26 ± 2
Прирост сеянцев в первый год после посадки на делянку	20 ± 2	28 ± 5	23 ± 2	24 ± 2
Прирост сеянцев во второй год после посадки на делянку	32 ± 2	40 ± 4	40 ± 3	31 ± 2
Высота сеянцев во второй год после посадки на делянку	158 ± 7	180 ± 12	160 ± 6	170 ± 4
Количество открывшихся почек (шт.)	7 ± 1	9 ± 1	11 ± 1	10 ± 1

лотность), условия в пределах каждой из делянок практически не различаются и соответствуют умеренной кислотности (балл 4–5). Почвы обоих лесничеств умеренно богаты азотом (балл 4–5), при этом местообитания вне влияния полога осины немного лучше обеспечены данным элементом питания. В Радогощинском лесничестве по сравнению с Анисимовским сохраненный осиновый полог имел большую сомкнутость, что отразилось в значительных различиях по показателю освещенности на обследованных местообитаниях. Суглинистые почвы на делянках более влагоемки по сравнению с супесчаными, поэтому по шкале влажности почвы показатели более высокие вне влияния осинового полога в Радогощинском лесничестве.

Влияние условий выращивания на ростовые показатели сеянцев. В первый год жизни на делянках сеянцы не демонстрируют существенного изменения величины прироста по главной оси по сравнению с питомником, а тенденция уменьшения статистически незначима (табл. 2). Это является следствием после пересадочного стресса, поскольку в фазе приживания обычно наблюдается снижение темпов роста растений в высоту (Grossnickle, 2018). Окончанием данной фазы, в течение которой сеянцы испытывают послепересадочный стресс, является период, когда прирост в высоту становится равным или большим, чем прирост за последний год пребывания в питомнике (Жигунов и др., 2016). С этих позиций влияния условий на длительность прохождения фазы приживания у сеянцев выявлено не было. На второй год после посадки на всех опытных делянках у сеянцев наблюдается статистически значимое увеличение прироста по главной оси. При этом под пологом осин сеянцы с ЗКС прирастают в среднем на 9 мм больше ($K-W$ test: $p = 0.0072$), чем вне его влияния. В условиях отсутствия полога большими приростами характеризовались се-

янцы с ОКС ($K-W$ test: $p = 0.02$), разница составила в среднем 8 мм. Незначительные приросты сеянцев с ЗКС на открытых делянках во второй год можно объяснить негативным влиянием со стороны густого травостоя, высота которого здесь составила почти 50 см, что на 12–17 см выше, чем на остальных делянках. В результате на второй год жизни сеянцы с ЗКС и ОКС, растущие вне влияния полога, все же оказались в среднем на 16 мм выше, чем под осиновым пологом. Эта разница статистически значима как для сеянцев с ОКС ($K-W$ test: $p = 0.037$), так и для сеянцев с ЗКС ($K-W$ test: $p = 0.03$). Сохраненный осиновый полог оказывал затенение на культуры, ведь разница в фитоиндикационной оценке по фактору освещенности составила 1.00 балл между делянками в Радогощинском лесничестве (табл. 1). Ранее высокая значимость освещенности в подпологовых условиях для выживания проростков древесных растений была показана на примере березы, дуба и сосны (Frolova et al., 2019). В Анисимовском лесничестве осиновый древостой имел меньшую полноту и сомкнутость крон, вследствие чего разница в фитоиндикационных оценках освещенности между делянками не столько заметна. В различных условиях выращивания статистически значимой разницы по числу открывшихся почек у сеянцев разных типов не выявлено ($K-W$ test: $p = 0.6$ – для сеянцев с ЗКС; $p = 0.2$ – для сеянцев с ОКС).

Влияние условий выращивания на приживаемость и жизнеспособность сеянцев. В фазу приживания обычно наблюдается значительный отпад сеянцев (Мерзленко, Бабич, 2002). Полученные нами данные по приживаемости культур ели, созданных разным типом посадочного материала, демонстрируют большую (89%) приживаемость сеянцев ели европейской с ЗКС по сравнению с сеянцами с ОКС, у которых приживаемость составила всего 75%. При этом использование контейнеризованного посадочного материала по-

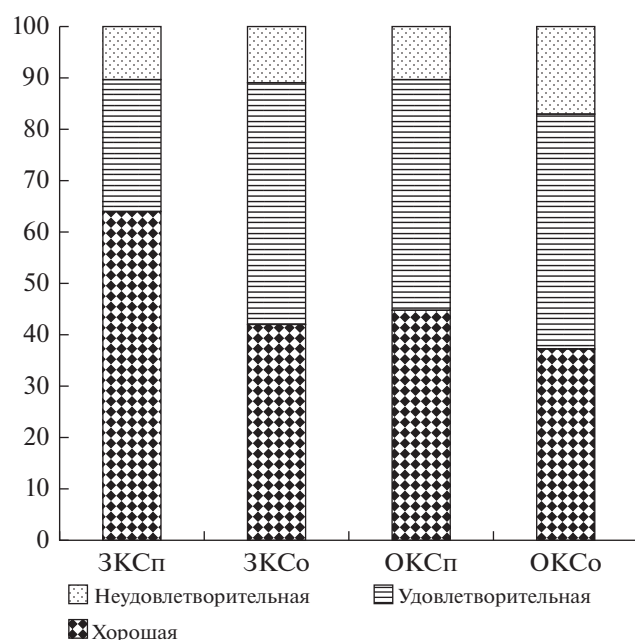


Рис. 1. Жизненность сеянцев ели европейской при различных технологиях выращивания. Примечание. ЗКСп, ОКСп — сеянцы, выращиваемые под пологом осин; ЗКСо, ОКСо — сеянцы, выращиваемые вне полога осин.

вышает приживаемость сеянцев ели именно в условиях отсутствия древесного полога, тогда как под пологом осин статистически значимых различий по приживаемости культур, созданных разным типом посадочного материала, выявлено не было (Кузьмина и др., 2018). Тем не менее, в подпологовых условиях доля сеянцев хорошей жизненности (64%) максимальна только при использовании контейнеризированного посадочного материала. На этих же делянках не производилась обработка почвы и пропашка, что также благоприятно сказывается на сохранности культур (Бутенко, 2013). Во всех остальных случаях доля сеянцев удовлетворительной жизненности сопоставима с сеянцами хорошего качества (рис. 1). Вне влияния полога при использовании сеянцев с ОКС суммарная доля культур удовлетворительного и неудовлетворительного качества (63%) превосходит культуры хорошего состояния. Статистический анализ также подтверждает, что в подпологовых условиях сеянцы обладают лучшими жизненными показателями (K–W test: $p = 0.0074$).

Влияние высоты и густоты травостоя и мохового покрова на сеянцы ели. Высота травостоя во всех случаях оказывает отрицательное влияние как на количество открывшихся почек, так и на общую жизненность сеянцев (табл. 4). Это не только следствие затенения, которое оказывает травостой, но также негативное влияние корневой конкуренции с растениями травянистого

яруса, поскольку именно для незащищенных корней сеянцев с ОКС выявлена наибольшая отрицательная теснота связи между анализируемыми параметрами. На возможное ограничивающее влияние конкуренции в подземной сфере за воду и минеральное питание, в том числе с видами живого напочвенного покрова обращали внимание при исследовании естественного возобновления древесных пород (Шаньгина, Феклистов, 2010; Шаньгина и др., 2010; Kuuluvainen, Ylläsjärvi, 2011; Axelsson et al., 2014; Фролова и др., 2019).

В целом для сеянцев с ОКС можно отметить, что не только травяной, но и моховой покров имеет тенденцию к негативному влиянию, особенно на открытых пространствах, где даже незначительное омоложение поверхности отрицательно сказывается как на ветвлении, так и на общей жизненности культур данного типа. Нами обнаружена тесная отрицательная связь между параметрами (табл. 4).

Ранее было показано отрицательное влияние некоторых ботанических групп и даже отдельных видов травянистых растений на культуры хвойных пород. Так, виды разнотравья (например, кипрей узколистый (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.)) в большей степени влияют на надземные органы хвойных культур, тогда как злаковые растения (луговик (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.) и вейник лесной (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth)) образуют задернение и заглушают культуры в подземной сфере (Лесные культуры Карелии, 2007; Гаврилова и др., 2020). Влияния отдельных видов трав на параметры и жизненность сеянцев нами статистически не выявлено в виду значительной гетерогенности травяного покрова на всех обследованных делянках. Тем не менее нами установлено, что на открытых территориях (вне полога осин) сомкнутый травяной покров эффективно притеняет сеянцы с ЗКС, повышая их жизненность.

Влияние параметров биотопа на сеянцы ели. Влияние факторов среды на жизненные показатели сеянцев ели ярко прослеживается только вне полога осин. На открытых делянках именно жизненность сеянцев с ОКС улучшается с увеличением почвенного богатства, повышением кислотности и влажности почвы. Обнаружена тесная связь анализируемых параметров. Под пологом осины фитосреда более стабильна и сеянцы менее зависимы от основных биотопических параметров (табл. 3). С этих позиций использование контейнеризированного посадочного материала на открытых делянках более оправдано, поскольку состояние сеянцев с ЗКС оказалось менее обусловлено основными факторами биотопа. Значения коэффициента корреляции оказались низкими.

Таблица 3. Теснота связи между факторами биотопа и экотопа анализируемых делянок и параметрами исследуемых семян (Spearman Rank Order Correlations $p < 0.05$)

Параметры семян	Освещенность	Влажность почвы	Кислотность	Богатство почвы азотом
ЗКС-культуры под пологом осины				
Количество открывшихся почек	0.01	−0.11	0.061	0.03
Жизненность семян	−0.06	−0.15	0.02	0.07
ЗКС-культуры в отсутствии полога осины				
Количество открывшихся почек	−0.14	−0.14	0.07	0.04
Жизненность семян	−0.08	−0.14	−0.02	−0.07
ОКС-культуры под пологом осины				
Количество открывшихся почек	0.10	0.03	−0.24	0.23
Жизненность семян	0.07	0.09	−0.18	−0.08
ОКС-культуры в отсутствии полога осины				
Количество открывшихся почек	−0.29	0.23	0.08	−0.12
Жизненность семян	−0.02	<u>0.47</u>	<u>0.54</u>	<u>0.40</u>

Примечание. Здесь и далее нижним подчеркиванием выделены высокие значения коэффициента корреляции Спирмена, отражающие умеренную (более 0.3) и заметную (более 0.5) тесноту связи анализируемых параметров.

Таблица 4. Теснота связи между параметрами фитоценоза, количеством почек и общей жизненностью семян ели европейской (Spearman Rank Order Correlations $p < 0.05$)

Параметры фитоценоза	Сеянцы с ОКС (Анисимовское лес-во)		Сеянцы с ЗКС (Радогощинское лес-во)	
	под пологом осин	без полога	под пологом осин	без полога
Количество открывшихся почек у семян				
Сомкнутость древостоя	−0.24	—	−0.10	—
Проективное покрытие мохового яруса	0.22	− <u>0.32</u>	0.23	0.05
Проективное покрытие травостоя	− <u>0.37</u>	−0.20	− <u>0.30</u>	<u>0.30</u>
Высота травостоя	− <u>0.51</u>	−0.03	−0.04	−0.01
Жизненность семян				
Сомкнутость древостоя	0.05	—	−0.01	—
Проективное покрытие мохового яруса	0.12	− <u>0.44</u>	0.08	0.03
Проективное покрытие травостоя	−0.05	0.21	0.06	<u>0.30</u>
Высота травостоя	−0.12	−0.2	−0.05	−0.06

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что древесный ярус оказывает влияние на культуры ели не напрямую, а через трансформацию основных экологических факторов как абиотической природы (освещенность, влажность), так и биотической (под пологом покров лесных трав обычно более разреженный и низкий, чем на открытых пространствах). В подпологовых условиях для семян с открытой и закрытой корневыми системами характерны более высокие жизненные по-

казатели. При этом культуры ели, созданные посадочным материалом с закрытой корневой системой, в фазе приживания обладают наилучшими показателями жизнестойкости и больше прирастают по главной оси, чем вне влияния крон.

В фазу приживания в подпологовых условиях наибольшее отрицательное влияние на рост и развитие лесных культур ели европейской вне зависимости от типа посадочного материала оказывает высота и густота травянистого яруса. Увеличение значений данных фитоценологических параметров

приводит к затенению сеянцев и усиливает корневую конкуренцию, что сокращает количество открявшихся почек и тем самым тормозит процессы ветвления у сеянцев. При этом для незащищенных корней ОКС-культур это влияние оказывается существенно более критичным, чем для контейнеризированного посадочного материала.

В отличие от подпологовых условий, на открытой территории состояние сеянцев больше подвержено влиянию абиотических факторов. Это особенно проявляется для сеянцев с ОКС. В силу лучшей освещенности на лишенных полога делянках сеянцы ели с открытой корневой системой, по сравнению с сеянцами с ЗКС, имеют стабильно большие показатели прироста. Кроме того, вне влияния древесного полога жизненное состояние сеянцев с открытой корневой системой более существенно зависит и от влажности почвы.

Таким образом, на открытых участках травяной покров на стадии приживания ели оказывает скорее защитное действие, поддерживая более оптимальный режим увлажнения, и притеняет корневые шейки сеянцев от ожогов. Кроме того, с увеличением проективного покрытия травостоя на открытых участках увеличивается количество жизнеспособных почек у контейнеризированных сеянцев и улучшается их жизненное состояние. Следовательно, умеренное окашивание культур ели в открытых условиях позволит сохранить защитные функции травостоя и избежать излишнего затенения сеянцев.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. В фазу приживания наибольшее влияние на рост и развитие лесных культур оказывает травянистый ярус фитоценозов. При этом в подпологовых условиях высота и густота травяного покрова отрицательно влияет на рост и развитие лесных культур ели европейской (вне зависимости от типа посадочного материала), тогда как на открытых участках травяной покров умеренной густоты оказывает скорее защитное действие, поддерживая более оптимальный режим увлажнения и притеня корневые шейки сеянцев от ожогов.

2. Прямого влияния сомкнутости крон сохраненного древесного полога на биометрические показатели и жизнеспособность сеянцев ели европейской выявлено не было вне зависимости от типа посадочного материала. Влияние древесного полога сказывается на сохранности и качестве лесных культур опосредованно, через изменение биотопических и фитоценологических параметров. Кроме того, оставление деревьев и отсутствие пропашки сохраняет травяной напочвенный покров, свойственный исходному типу леса, что в дальнейшем ускорит процессы демутиации.

3. Использование контейнеризированного посадочного материала более оправдано на открытых делянках, поскольку состояние сеянцев с ЗКС менее зависит от основных параметров биотопа. Кроме того, густота травостоя на открытых участках положительно коррелирует с параметрами сеянцев с закрытой корневой системой, что говорит о защитной роли травянистого яруса в данных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность руководству и сотрудникам компании ООО "Майер-Мелнхоф Хольц Ефимовский", по инициативе и при поддержке которой было организовано данное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеев А.А. Лесные культуры: учебное пособие для студентов направления 35.03.01 "Лесное дело". Красноярск, 2017. 95 с.
- Бартенев И.М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПЗМК // Лесотехнический журн. 2013. № 2(10). С. 123–130.
- Булохов А.Д. Экологическая оценка среды методами фитоиндикации. Брянск: БГПУ, 1996. 104 с.
- Бутенко О.Ю. Рост плантационных культур ели в Ленинградской и Псковской областях // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2013. № 4. С. 53–57.
- Гаврилова О.И., Морозова И.В., Ольхин Ю.В., Юрьева А.Л., Иоффе А.О. Динамика роста и оценка состояния культур сосны обыкновенной на вейниково-луговых вырубках методами дистанционного зондирования // Изв. вузов. Лесной журн. 2020. № 1. С. 63–74.
- Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР / Под ред. В.Д. Александровой, Т. К. Юрковской. Л.: Наука, 1989. 63 с.
- ГОСТ 3317-90 Сеянцы деревьев и кустарников. Технические условия.
- Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России). СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с.
- Жигунов А.В., Данилов Д.А., Шестакова Т.А., Неверовский В.Ю. Влияние вида посадочного материала на рост насаждений ели и сосны на постагрогенных землях Северо-Запада России // Вестник Поволжского ГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2016. Вып. 3. № 31. С. 30–39.
- Калининченко Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 384 с.
- Кищенко И.Т. Влияние климатических факторов на сезонный рост деревьев лиственных лесобразующих видов в таежной зоне // Лесной журн. (Изв. высш. учеб. заведений). 2017. № 1. С. 51–63.
- Коломинова М.В. Особенности культур основных лесобразующих пород: метод. указания. Ухта: УГТУ, 2014. 32 с.
- Корчагов С.А., Грибов С.Е., Карбасникова Е.Б., Карбасников А.А. Приживаемость и рост смешанных культур

- ели и лиственницы // Лесотехнический журн. 2017. № 1(25). С. 80–87.
- Кузьмина Ю.В., Чеснокова П.Д., Концева Е.М. Приживаемость культур ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. в контрастных условиях среды на востоке Ленинградской области при различных технологиях посадки // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве. Матер. II молодеж. междунар. науч.-практ. конф. г. Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2018 г. СПб.: Полиграф Экспресс, 2018. С. 28–30.
- Лесные культуры Карелии: (этапы раннего возраста) / Под ред. В.К. Хлюстова, О.И. Гавриловой, И.В. Морозовой; М-во сельского хоз-ва, Российский гос. аграрный ун-т — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва: ФГОУ ВПО РГАУ — МСХА, 2007. 223 с.
- Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Теория и практика выращивания сосны и ели в культурах. Архангельск: АГТУ, 2002. 220 с.
- Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. М.: Лесная промышленность, 1964. 49 с.
- Писаренко А.И., Мерзленко М.Д. Создание искусственных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.
- Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 23 декабря 2014 г. № 569 “О внесении изменений в приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18.08.2014 г. № 367 “Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации”.
- Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 8 октября 2015 г. № 353 “Об установлении лесосеменного районирования”.
- Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Лесные культуры. В 2 ч. Часть 2. М.: Юрайт, 2018. 305 с.
- Рунова Е.М., Савченкова В.А. Исследование влияния живого напочвенного покрова на характер возобновления вырубок в среднем Приангарье // Успехи современного естествознания. 2008. № 5. С. 49–51.
- Савченкова В.А. Влияние живого напочвенного покрова на естественное возобновление вырубок // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. № 23. С. 127–130.
- Саксонов С.С. Влияние засух на приживаемость лесных культур // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2020. Т. 29. № 4. С. 37–42.
- Санников С.Н., Санникова Н.С. Экология естественного возобновления сосны под пологом леса. М.: Наука, 1985. 152 с.
- Сидоренков В.М. Влияние условий произрастания на состояние культур ели под пологом средневозрастных мягколиственных насаждений // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2003. № 7. С. 24–26.
- Соколовский И.В., Юренин А.В. Опыт выращивания культур ели на дерново-подзолистой временно избыточно увлажняемой супесчаной почве // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство. Минск: БГТУ, 2007. № 15. С. 270–272.
- Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В. Культуры ели на луговой вырубке в северной подзоне тайги // Вестник КрасГАУ. Красноярск: Экология. 2012. Вып. 11. С. 123–128.
- Сюнев В.С. Интенсивное лесное хозяйство. Петрозаводск: ПетрГУ, 2014. 174 с.
- Фролова Г.Г., Фролов П.В., Шанин В.Н., Иванова Н.В. Анализ факторов, влияющих на возобновление основных лесобразующих пород в сосновых лесах южного Подмосковья // Математическое моделирование в экологии: Матер. VI Национ. науч. конф. с междунар. участ. Пушкино, 2019. С. 224–225.
- Черных Л.В., Черных Д.В., Черных В.Л. Апробация методики лесоводственно-статистического обоснования способов и объемов лесовосстановления на лесном участке // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 1(49). С. 64–81.
- Чернышов М.П., Аретфьев Ю.Ф., Титов Е.В., Беспаленко О.Н., Дорофеева В.Д., Кругляк В.В., Пятых А.М. Хвойные породы в озеленении Центральной России / Под ред. М.П. Чернышова. М.: Колос, 2007. 328 с.
- Шаньгина Н.П., Феклистов П.А. Возобновление коренных ельников и влияние экологических факторов на формирование подростов ели под пологом древостоев // Проблемы экологии в современном мире в свете учения В.И. Вернадского: Материалы Международной конференции. Тамбов: ТГУ, 2010. С. 118–122.
- Шаньгина Н.П., Феклистов П.А., Кузнецова А.А. Возобновление ели под пологом ельников в зависимости от напочвенного покрова // Экологические проблемы Севера: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 13. Архангельск, 2010. С. 27–30.
- Axelsson E., Lundmark T., Högborg P., Nordin A. Below-ground competition directs spatial patterns of seedling growth in boreal pine forests in Fennoscandia // Forests. 2014. V. 5. № 9. P. 2106–2121.
- Caudullo G., Tinner W., de Rigo D. *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats // European Atlas of Forest Tree Species. 2016. P. 114–116.
- Ellenberg H., Weber H.E., Dull R., Wirth V., Werner W., Paulsen D. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa // Scripta Geobotanica. 1991. № 18. P. 9–166.
- Frolova G.G., Frolov P.V., Shanin V.N., Ivanova N.V. Analysis of factors affecting the regeneration of major forest-forming species in the pine forests of the southern Moscow region // Forest Science Issues, 2019. № 4. P. 1–27.
- Grossnickle S.C. Seedling establishment on a forest restoration site-An ecophysiological perspective // Reforesta. Canada, 2018. № 6. P. 110–139.
- Kuuluvainen T., Ylläsjärvi I. On the natural regeneration of dry heath forests in Finnish Lapland: a review of V.T. Aaltonen // Scandinavian J. Forest Research. 2011. V. 26. P. 34–44.
- Leinonen T., Turtiainen M., Siekkinen A. Лесовосстановление на Северо-Западе России и сравнение с Финляндией: Комментарий финских специалистов. Йоэнсуу: Науч.-исслед. ин-т леса Финляндии, 2009. 38 с.
- Miina J., Saksa T. Predicting establishment of tree seedlings in regeneration areas of *Picea abies* in southern Finland // Baltic Forestry. 2013. V. 19. № 2. P. 187–200.
- The International Plant Names Index (www.ipni.org) (дата обращения: 19.11.2021)

Phytocenotic and Biotopic Parameters Affect the Condition of European Spruce Cultures during the Establishment Stage in the South-East of the Leningrad Region

Ye. M. Koptseva^{1, *}, Yu. V. Kuzmina¹, I. A. Sorokina^{1, 2}, and A. A. Bushkovskiy³

¹Saint Petersburg State University, Universitetskaya emb., 7–9, Saint Petersburg, 199034 Russia

²Komarov Botanical Institute of the RAS, Professora Popova st., 2, Saint Petersburg, 197376 Russia

³Mayr-Melnhof Holz-Yefimovskiy ltd.,

Gagarina st., 30, Yefimovskiy settl., Boksitogorskiy district, Leningrad oblast, 187620 Russia

*E-mail: e.koptseva@spbu.ru

In the Boksitogorskiy district of the Leningrad oblast, the study was conducted regarding the influence of phytocenotic parameters (crowns density, height, herbage density, moss cover) and biotopic parameters (illumination, acidity, moisture and soil richness) on the morphometric parameters and vitality of European spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) BRT (bare root trees) and RBT (root-balled trees) seedlings during the establishment phase under contrasting growing conditions: under the sparse aspen canopy left in clearings and in open spaces, outside the influence of tree crowns. The positive effect of undercanopy cultivation on the safety and viability of seedlings of both types has been statistically proven; with RBT seedlings having the best indicators of vitality and growth along the main axis. However, the herbaceous layer's height and density under these conditions adversely affected the branching of seedlings. Unlike the undercanopy conditions, when growing in the open, the condition of seedlings was more susceptible to the influence of abiotic factors. Under these conditions, a close positive correlation was found between the viability of seedlings with BRT and the main soil parameters (humidity, acidity, and nitrogen supply). Due to the better illumination on plots without canopies, seedlings with BRT had consistently high growth rates along the main axis. Under these conditions, the grass cover at the stage of spruce establishment was found to have a protective effect, maintaining a more optimal moisture regime and shading the seedlings. The practicality of using the RBT cultures in open spaces was still substantiated, since they were less susceptible to the negative influence of factors.

Keywords: spruce underplants, seedlings, establishment stage, bare root trees, root-balled trees, phytogenic medium.

REFERENCES

- Ageev A.A., *Lesnye kul'tury* (Forest cultures), Krasnoyarsk, 2017, 95 p.
- Axelsson E., Lundmark T., Högborg P., Nordin A., Below-ground competition directs spatial patterns of seedling growth in boreal pine forests in Fennoscandia, *Forests*, 2014, Vol. 5, No. 9, pp. 2106–2121.
- Bartenev I.M., K voprosu sozdaniya lesnykh kul'tur posadkoi PZMK (On the question of creation of forest cultures by PMCR planting), *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2013, No. 2 (10), pp. 123–130.
- Bulokhov A.D., *Ekologicheskaya otsenka sredi metodami fitoindikatsii* (Ecological assessment of the environment by phytindication methods), Bryansk: BGPU, 1996, 104 p.
- Butenko O.Y., Rost plantatsionnykh kul'tur eli v Leningradskoi i Pskovskoi oblastiakh (Intermediate results of growing plantation *Picea abies* in Leningrad and Pskov regions), *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*, 2013, No. 4, pp. 53–57.
- Caudullo G., Tinner W., de Rigo D., *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats, *European Atlas of Forest Tree Species*, 2016, pp. 114–116.
- Chernykh L.V., Chernykh D.V., Chernykh V.L., Aprobatsiya metodiki lesovodstvenno-statisticheskogo obosnovaniya sposobov i ob'emov lesovosstanovleniya na lesnom uchastke (Testing of the procedure of forest and statistical justification of methods and volumes of reforestation in the forest area), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2021, No. 1 (49), pp. 64–81.
- Chernyshov M.P., Aref'ev Y.F., Titov E.V., Bespalenko O.N., Dorofeeva V.D., Kruglyak V.V., Pyatykh A.M., *Khvoynye porody v ozelenenii Tsentral'noi Rossii* (Conifers in the landscaping of Central Russia), Moscow: Kolos, 2007, 328 p.
- Ellenberg H., Weber H.E., Dull R., Wirth V., Werner W., Paulsen D., *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*, *Scripta Geobotanica*, 1991, No. 18, pp. 9–166.
- Frolova G.G., Frolov P.V., Shanin V.N., Ivanova N.V., Analiz faktorov, vliyayushchikh na vozobnovlenie osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod v sosnovykh lesakh yuzhnogo Podmoskov'ya (Analysis of the factors influencing the renewal of the main forest-forming species in the pine forests of the southern Moscow region), *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii* (Mathematical modeling in ecology), Pushchino, Proc. of VI National sci. conf with international participation, Pushchino, 2019, pp. 224–225.
- Frolova G.G., Frolov P.V., Shanin V.N., Ivanova N.V., Analysis of factors affecting the regeneration of major forest-forming species in the pine forests of the southern Moscow region, *Forest Science Issues*, 2019, No. 4, pp. 1–27.
- Gavrilova O.I., Morozova I.V., Ol'khin Y.V., Yur'eva A.L., Ioffe A.O., Dinamika rosta i otsenka sostoyaniya kul'tur sosny obyknovЕННОI na veinikovo-lugovikovykh vyrubkakh

- metodami distantionnogo zondirovaniya (Growth dynamics and status assessment of Scots pine crops on reedgrass meadow cuts by remote sensing techniques), *Izv. vuzov. Lesnoi zhurnal.*, 2020, No. 1, pp. 63–74.
- Geobotanicheskoe raionirovanie Nechernozem'ya evropeiskoi chasti RSFSR (Geobotanical zoning of the Non-Chernozem region of the European part of the RSFSR)*, Leningrad: Nauka, 1989, 63 p. GOST 3317-90.
- Grossnickle S.C., Seedling establishment on a forest restoration site—An ecophysiological perspective, *Reforesta*, Canada, 2018, No. 6, pp. 110–139.
- Gryaz'kin A.V., *Vozobnovitel'nyi potentsial taezhnykh lesov (na primere el'nikov Severo-Zapada Rossii)* (Renewal potential of taiga forests (on the example of spruce forests in the North-West of Russia)), Saint Petersburg: SPbGLTA, 2001, 188 p.
- Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A., *Lesovosstanovlenie na vyрубках* (Reforestation in deforested area), Moscow: Ekologiya, 1991, 384 p.
- Kishchenko I.T., Vliyanie klimaticheskikh faktorov na sezonnyi rost derev'ev listvennykh lesoobrazuyushchikh vidov v taezhnoi zone (The impact of climatic factors on the seasonal growth of deciduous trees of the forest-forming species in the taiga zone), *Lesnoi zhurnal*, 2017, No. 1, pp. 51–63.
- Kolominova M.V., *Osobennosti kul'tur osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod* (Peculiarities of cultures of the main forest-forming species), Ukhta: UGTU, 2014, 32 p.
- Korchagov S.A., Gribov S.E., Karbasnikova E.B., Karbasnikov A.A., Prizhivaemost' i rost smeshannykh kul'tur eli i listvenitsy (The survival and growth of mixed cultures of spruce and larch), *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2017, No. 1(25), pp. 80–87.
- Kuuluvainen T., Ylläsjarvi I., On the natural regeneration of dry heath forests in Finnish Lapland: a review of V.T. Aaltonen, *Scandinavian J. Forest Research*, 2011, Vol. 26, pp. 34–44.
- Kuz'mina Y.V., Chesnokova P.D., Koptseva E.M., Prizhivaemost' kul'tur eli evropeiskoi Picea abies (L.) Karst. v kontrastnykh usloviyakh sredy na vostoке Leningradskoi oblasti pri razlichnykh tekhnologiyakh posadki (The survival rate of crops Picea abies ((L.)H. Karst.) in contrasting environmental conditions in the east of the Leningrad region with various technologies of planting), *Aktual'nye voprosy v lesnom khozyaistve (The current issues in forestry)*, Saint Petersburg, Proc. of II Sci.-Pract. Conf. of Young Scientists, November 14–15, 2018, Saint Petersburg: Poligraf Ekspress, pp. 28–30.
- Leinonen T., Turtiainen M., Siekkinen A., *Lesovosstanovlenie na Severo-Zapade Rossii i sravnenie s Finlyandiei: Kommentarii finskikh spetsialistov* (Reforestation in the North-West of Russia and comparison with Finland: Comments from Finnish specialists), Joensuu: Nauch.-issled. in-t lesa Finlyandii, 2009, 38 p.
- Lesnye kul'tury Karelii: etapy rannego vozrasta* (Forest plantings of Karelia (earlyage stages)), Moscow: FGOU VPO RGAU – MSKhA, 2007, 223 p.
- Merzlenko M.D., Babich N.A., *Teoriya i praktika vyrashchivaniya sosny i eli v kul'turakh* (Theory and practice of growing pine and spruce in crops), Arkhangel'sk: AGTU, 2002, 220 p.
- Miina J., Saksa T., Predicting establishment of tree seedlings in regeneration areas of Picea abies in southern Finland, *Baltic Forestry*, 2013, Vol. 19, No. 2, pp. 187–200.
- Ogievskii V.V., Khiron V.V., *Obsledovanie i issledovanie lesnykh kul'tur* (Survey and study of forest plantations), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1964, 50 p.
- Pisarenko A.I., Merzlenko M.D., *Sozdanie iskusstvennykh lesov* (Creation of homogeneous forests), Moscow: Agropromizdat, 1990, 270 p.
- Prikaz Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva ot 8 oktyabrya 2015 g. № 353 "Ob ustanovlenii lesosemennogo raionirovaniya"* (Order of the Federal Forestry Agency of October 8, 2015 No. 353 "On the establishment of forest seed zoning").
- Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii RF ot 23 dekabrya 2014 g. № 569 "O vnesenii izmenenii v prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii ot 18.08.2014 g. № 367 "Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nykh zon Rossiiskoi Federatsii i Perechnya lesnykh raionov Rossiiskoi Federatsii"* (Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of December 23, 2014 No. 569 "On Amendments to the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of August 18, 2014 No. 367 "On Approval of the List of Forest Plantation Zones of the Russian Federation and the List of Forest Regions of the Russian Federation").
- Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A., *Lesnye kul'tury. V 2 ch. Chast' 2* (Forest cultures. In 2 parts. Part 2), Moscow: Yurait, 2018, 305 p.
- Runova E.M., Savchenkova V.A., *Issledovanie vliyaniya zhivogo napochvennogo pokrova na kharakter vozobnovleniya vyrubok v srednem Priangar'e* (Investigation of the influence of living ground cover on the nature of the resumption of clearings in the middle Angara region), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2008, No. 5, pp. 49–51.
- Saksonov S.S., Vliyanie zasukh na prizhivaemost' lesnykh kul'tur (Influence of droughts on the survival rate of forest crops), *Samarskaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii*, 2020, Vol. 29, No. 4, pp. 37–42.
- Sannikov S.N., Sannikova N.S., *Ekologiya estestvennogo vozobnovleniya sosny pod pologom lesa* (Ecology of natural regeneration of pine under the forest canopy), Moscow: Nauka, 1985, 152 p.
- Savchenkova V.A., Vliyanie zhivogo napochvennogo pokrova na estestvennoe vozobnovlenie vyrubok (Influence of living ground cover on the natural regeneration of clearcuts), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, No. 23, pp. 127–130.
- Shan'gina N.P., Feklistov P.A., Kuznetsova A.A., *Vozobnovlenie eli pod pologom el'nikov v zavisimosti ot napochvennogo pokrova* (Renewal of spruce under the canopy of spruce forests depending on the ground cover), *Ekologicheskie problemy Severa: Mezhhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*, 2010, Vol. 13, pp. 27–30.
- Shan'gina N.P., Feklistov P.A., *Vozobnovlenie korennykh el'nikov i vliyanie ekologicheskikh faktorov na formirovanie*

podrosta eli pod pologom drevostoev (Renewal of indigenous spruce forests and the influence of environmental factors on the formation of spruce undergrowth under the canopy of forest stands), *Problemy ekologii v sovremennom mire v svete ucheniya V.I. Vernadskogo* (Problems of ecology in the modern world in the light of the teachings of V.I. Vernadsky), Tambov, Proc. of Intl. Conf, Tambov: TGU, 2010, pp. 118–122.

Sidorenkov V.M., Vliyanie uslovii proizrastaniya na sostoyanie kul'tur eli pod pologom srednevozrastnykh myagkolistvennykh nasazhdenii (Influence of growing conditions on the state of spruce crops under the canopy of medium-aged soft-leaved plantations), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2003, No. 7, pp. 24–26.

Sokolovskii I.V., Yurenaya A.V., Opyt vyrashchivaniya kul'tur eli na dernovo-podzolistoi vremenno izbytochno uvlazhnyayemoi supeschanoi pochve (Experience in growing spruce crops on soddy-podzolic temporarily excessively

moistened sandy loamy soil), *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaistvo*, 2007, No. 15, pp. 270–272.

Sungurova N.R., Sungurov R.V., Kul'tury eli na lugovikovo vyрубке v severnoi podzone taigi (Fir tree cultures on meadow cutting down place in the taiga northern subzone), *Vestnik KrasGAU*, 2012, Vol. 11, pp. 123–128.

Syunev V.S., *Intensivnoe lesnoe khozyaistvo* (Intensive forestry), Petrozavodsk: PetrGU, 2014, 174 p.

The International Plant Names Index, www.ipni.org (November 19, 2021).

Zhigunov A.V., Danilov D.A., Shestakova T.A., Nevrovskii V.Y., Vliyanie vida posadochnogo materiala na rost nasazhdenii eli i sosny na postagrogennykh zemlyakh Severo-Zapada Rossii (The impact of the planting material on the growth rate of spruce and pine plantations on post-agricultural lands of the north-west of Russia), *Vestnik Povolzhskogo GTU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2016, Vol. 3, No. 31, pp. 30–39.

УДК 630*181:581*192

ВЗАИМОСВЯЗИ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ТАНИНОВ, ЛИГНИНА, АЗОТА И УГЛЕРОДА В РАСТЕНИЯХ ЕЛЬНИКОВ КУСТАРНИЧКОВО-ЗЕЛЕНОМОШНЫХ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ¹

© 2023 г. Н. А. Артемкина*

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,
мкр-н Академгородок, д. 14а, Апатиты, Мурманская обл., 184200 Россия

*E-mail: n.artemkina@ksc.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Анализировали стареющие (оппадающие) органы (листья/хвоя) следующих растений: ель сибирская (*Picea abies* ssp. *obovata* (Ledeb.) Domin), береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.), водяника гермафродитная (*Empetrum hermaphroditum* Hager.), черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), политрихум (*Polytrichum* spp.), дерен шведский (*Chamaepericlymenum suecicum* (L.) Aschers. & Graebn. (*Cornus suecica* L.)), овсик извилистый (*Deschampsia flexuosa* (L.) Trin.). Установили значительное варьирование химического состава (содержание лигнина, фенольных соединений, танинов, азота и углерода, а также стехиометрические отношения “C/N”, “лигнин/N”, “лигнин/целлюлоза”) среди растений северотаежных лесов на межвидовом уровне. Поступление вторичных метаболитов с опадом зависит от видового состава растительных сообществ и вклада различных видов растений в состав растительного покрова. На внутривидовом уровне (для ели сибирской, произрастающей в различных положениях ландшафта ельников кустарничково-зеленомошных (автоморфный, транзитный и аккумулятивный ландшафты)) определили повышение содержания растворимых танинов ($p < 0.05$) в хвое ели в автоморфной позиции ландшафта. Изучены некоторые взаимосвязи между вторичными метаболитами, азотом и углеродом в составе стареющих фотосинтезирующих органах доминирующих различных видов растений в северотаежных ельниках кустарничково-зеленомошных.

Ключевые слова: фенольные соединения, лигнин, танины, азот, углерод, северотаежные леса, внутривидовое изменение, межвидовое изменение.

DOI: 10.31857/S0024114823010047, EDN: NGJMDA

Вторичные метаболиты, в том числе фенольные соединения вносят значительный вклад во взаимодействие растений с окружающей средой (Cheynier et al., 2013). Ранее мы установили, что мозаика растительности в лесных биогеоценозах определяет пространственную гетерогенность состава верхних органогенных горизонтов почв, формирующихся из опада доминирующих растений разного качества. Поступления элементов питания (C, N) и вторичных метаболитов (фенольных соединений, танинов и лигнина) с опадом зависят от видового состава растительных сообществ и вклада различных видов растений в состав растительного покрова (Артемкина и др., 2018а, 2018б; Шевченко и др., 2019; He et al., 2019; Rosenfield et al., 2020).

Известно, что скорость разложения опада определяется, в том числе стехиометрическими отношениями “C/N”, “лигнин/N”, “лигнин/целлюлоза” (Berg, 2014).

Показатель “C/N” повсеместно используется в экспериментах по разложению опада растений, передает взаимосвязь между азотом и углеродом, т.е. питательным статусом опада растений. Отношение “C/N” в опаде растений – хороший предсказатель скорости разложения этого опада. Чем уже отношение “C/N”, тем быстрее разлагается опад. При низких соотношениях C : N (например, при высоких концентрациях N) микроорганизмы высвобождают N непосредственно из опада. При более высоких начальных соотношениях C : N чистая иммобилизация обычно происходит, когда микроорганизмы получают доступ к N, находящемуся в подстилке, и преобразуют его в микробную биомассу или экзоферменты (Parton et al.,

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания темы НИР № 1021051803679-9.

2007). На начальных стадиях трансформации опада высокое содержание азота способствует разложению, тогда как на следующей стадии, стадии лигнина, оказывает обратное воздействие, так как происходит угнетение грибов белой гнили (Berg, 2000).

Показатель “лигнин/N” может выступать как индикатор динамики азота в процессах трансформации и формирования органического вещества почвы (Osono, Takeda, 2004). Установлена значимая отрицательная корреляционная связь ($r = -0.66$, $P < 0.001$) между начальным соотношением “лигнин/N” в опаде растений, произрастающих в Европе, и скоростью разложения этого опада (Fortunel et al., 2009).

Показатель отношения “лигнин/целлюлоза” в значительной степени определяет в дальнейшем скорость разложения опада в первой фазе его трансформации (Berg, 2014). В долгосрочной перспективе концентрация целлюлозы уменьшается, тогда как концентрация лигнина увеличивается, и существует уровень, при котором относительные количества остаются постоянными.

Было определено, что разложение всех органов (листья, стебли, корни, репродуктивные части) последовательно изменялось связанными со структурой растений показателями (лигнин, С и влажность) (Aerts et al., 2012). Другие исследования показывают, что идентичность опада (полное множество черт, включенных в каждую разновидность растений) — лучший предсказатель, чем простой стехиометрический показатель межвидового изменения скорости разложения опада (Cornwell и др., 2008). Ранее нами были представлены только результаты отдельно по фенольным соединениям, отдельно по С и N (горизонтальное, внутрибиогеоценотическое (между отдельными элементарными биогеоареалами) и межбиогеоценотическое варьирование). В этой работе показаны взаимодействия вторичных метаболитов с С и N.

Наша работа направлена на изучение взаимосвязей между вторичными метаболитами (фенольные соединения, включая лигнин, танины), азотом и углеродом в составе стареющих фотосинтезирующих органах доминирующих различных видов растений в северотаежных ельниках кустарничково-зеленомошных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследования ельников кустарничково-зеленомошных расположены в центральной части Кольского полуострова ($67^{\circ}29'$ с.ш., $34^{\circ}32'$ в.д.) в водосборном бассейне озера Умбозеро (Мананов, Никонов, 1981). В древесном ярусе преобладает ель сибирская, возраст которой варьирует от 30 до 200 лет и более. В напочвенном покрове встречаются: водяника гермафродитная,

плевроциум Шребера, политрихум обыкновенный (*Polytrichum commune* Hedw.), брусника обыкновенная, черника обыкновенная, дерен шведский, овсик извилистый. Пробные площади размером 50×50 м заложены в 5-кратной повторности в ельниках кустарничково — зеленомошных. На каждой пробной площади отобраны для анализа образцы стареющих фотосинтезирующих органов растений (хвоя ели, листья кустарничков, зеленые мхи).

В лаборатории образцы высушивали, затем каждый из них измельчали и просеивали через сито с ячейей 1 мм. Содержание азота определяли по Кьельдалю, углерода — по Тюрину. Количественное определение растворимых конденсированных танинов в образцах проводили фотоколориметрическим методом (555 нм) после взаимодействия с раствором н-бутанол: HCl (95 : 5 v/v) (Ossipova et al., 2001). Концентрации фенольных соединений определяли фотоколориметрическим методом (730 нм) с реактивом Фолина — Чокальтеу (Kanerva et al., 2008). Расчет количества фенольных соединений и танинов проводили по калибровочным графикам, построенным по таниновой кислоте и конденсированным танинам листьев березы Черепанова (*Betula pubescens* ssp. *Czerepanovii*) соответственно. Содержание лигнина определяли с помощью обработки пробы 72%-ной серной кислотой после предварительного кипячения в растворе ЦТАБ (10 г цетилтриметиламмония бромид в 1 л 0.5-молярного раствора H₂SO₄) (Rowland, Roberts, 1994).

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью пакета программ Excel 7.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были определены концентрации вторичных метаболитов, в том числе лигнина, азота и углерода в доминирующих видах растений ельника кустарничково-зеленомошного. Анализировали стареющие (опадающие) органы (листья/хвоя) следующих растений: ели сибирской, березы пушистой, брусники обыкновенной, водяники гермафродитной, черники обыкновенной, плевроциума Шребера, политрихума, дерена шведского, овсика извилистого (табл. 1).

Содержание углерода существенно изменялось между исследованными видами растений с максимальными значениями для водяники гермафродитной (55.9%) и минимальными для дерена шведского (41.2%). Концентрации азота были наибольшими в березе пушистой (1.64%) и чернике обыкновенной (1.40%), немного меньше азота накапливалось в дерене шведском (1.14%). Минимальное содержание азота было установлено в политрихуме (0.62%) и водянике гермафродитной (0.65%).

Таблица 1. Химический состав растений ельника кустарничково-зеленомошного

Виды растений	C, %	N, %	C/N	Лигнин/N	Лигнин/целлюлоза
Ель сибирская	52.4 ± 1.3	0.83 ± 0.07	64 ± 5	18.0 ± 1.2	0.92 ± 0.05
Плевроциум Шребера	45.6 ± 1.8	0.70 ± 0.07	67 ± 6	33.3 ± 2.6	0.68 ± 0.05
Политрихум	44.8 ± 2.0	0.62 ± 0.05	80 ± 5	49.0 ± 7.2	0.71 ± 0.03
Водяника гермафродитная	55.9 ± 1.5	0.65 ± 0.03	87 ± 6	43.8 ± 4.6	2.49 ± 0.12
Брусника обыкновенная	50.1 ± 1.0	0.94 ± 0.14	49 ± 9	15.5 ± 2.4	0.67 ± 0.08
Черника обыкновенная	49.6 ± 0.7	1.40 ± 0.18	35 ± 4	8.8 ± 0.3	0.80 ± 0.02
Береза пушистая	47.3 ± 1.5	1.64 ± 0.04	29 ± 1	8.6 ± 0.2	1.31 ± 0.10
Дерен шведский	41.2 ± 0.9	1.14 ± 0.03	36 ± 1	2.0 ± 0.2	0.19 ± 0.02
Овсик извилистый	45.0 ± 1.6	0.95 ± 0.03	47 ± 3	3.4 ± 0.2	0.12 ± 0.00

Примечание. Представлены средние значения и стандартная ошибка ($n = 3-5$).

Значение показателя “C/N” существенно варьирует в зависимости от вида растений, и его можно представить в порядке уменьшения: водяника гермафродитная (87), политрихум (80), плевроциум Шребера (67), ель сибирская (64), брусника обыкновенная (49), овсик извилистый (47), дерен шведский (36), черника обыкновенная (35), береза пушистая (29). Причем изменения показателя “C/N” объясняются как трансформациями азота, так и углерода в различных видах растений.

По уровню значения показателя “лигнин/N” опад можно расположить в следующий ряд: политрихум (49.0) > листья водяники гермафродитной (43.8) > плевроциум Шребера (33.3) > хвоя ели сибирской (18.0) > листья брусники обыкновенной (15.5) > листья черники обыкновенной (8.8) > листья березы пушистой (8.6) > овсик извилистый (3.4) > дерен шведский (2.0). Таким образом, по рассматриваемому параметру наиболее устойчивыми к разложению являются мхи политрихума, наименее — дерен шведский.

Отношение “лигнин/целлюлоза” (в значительной степени определяет в дальнейшем скорость разложения опада в первой фазе его трансформации) уменьшается в порядке: водяника гермафродитная (2.49) > ель сибирская (0.83) > черника обыкновенная (0.80) > политрихум обыкновенный (0.71) > плевроциум Шребера (0.68) > брусника обыкновенная (0.67) > дерен шведский (0.19) > овсик извилистый (0.12).

Самые большие отношения C/N и лигнин/N были определены для водяники гермафродитной (85.8 и 43.8 соответственно), политрихума (72.5 и 49.0) и плевроциума Шребера (64.8 и 33.3). Кроме того, для листьев водяники гермафродитной найден самый широкий показатель “лигнин/целлюлоза” (2.49). Именно этим трем видам опада свойственна низкая скорость разложения, и, следовательно, замедленный круговорот питательных веществ.

Мы установили, что различные виды растений могут быть сгруппированы согласно своему химическому составу (рис. 1). Два компонента, N и лигнин, как уже было сказано выше, играют определяющую роль в процессах трансформации опада и в первую очередь влияют на скорость его разложения (Berg, 2000; Лебедев, Шестибратов, 2021). Ранее были выявлены особенности влияния эндогенного и минерального азота как на минерализацию, так и на гумификацию лесного опада (Ларионова и др., 2017). Анализируя полученные данные, мы нашли, что различные виды растений фактически сформировали отличные гомогенные группы, которые не накладывались друг на друга (рис. 1). Исключение составляют: водяника гермафродитная и политрихум, химический состав которых близок по этим параметрам. Для сравнения: стареющие органы водяники гермафродитной и политрихума характеризуются наличием одновременно низких концентраций N и высоких лигнина, тогда как опад черники обыкновенной и березы пушистой отличается высоким содержанием N и средними концентрациями лигнина. Для многолетней хвои ели сибирской были определены более высокие концентрации лигнина, чем для брусники обыкновенной, и далее — для овсика извилистого и дерена шведского при среднем содержании N.

Рассмотрев взаимосвязь лигнина и углерода, мы также нашли различные гомогенные группы растений. Группа из политрихума обыкновенного и плевроциума Шребера показывает высокое содержание лигнина и среднее углерода. Черника обыкновенная, брусника обыкновенная, береза пушистая и ель сибирская формируют группу с высоким содержанием C и средним лигнина. Овсик извилистый и дерен шведский образуют группу с низким содержанием лигнина при средних концентрациях C. Отдельную позицию занимает водяника гермафродитная, у которой высокое содержание и лигнина, и углерода.

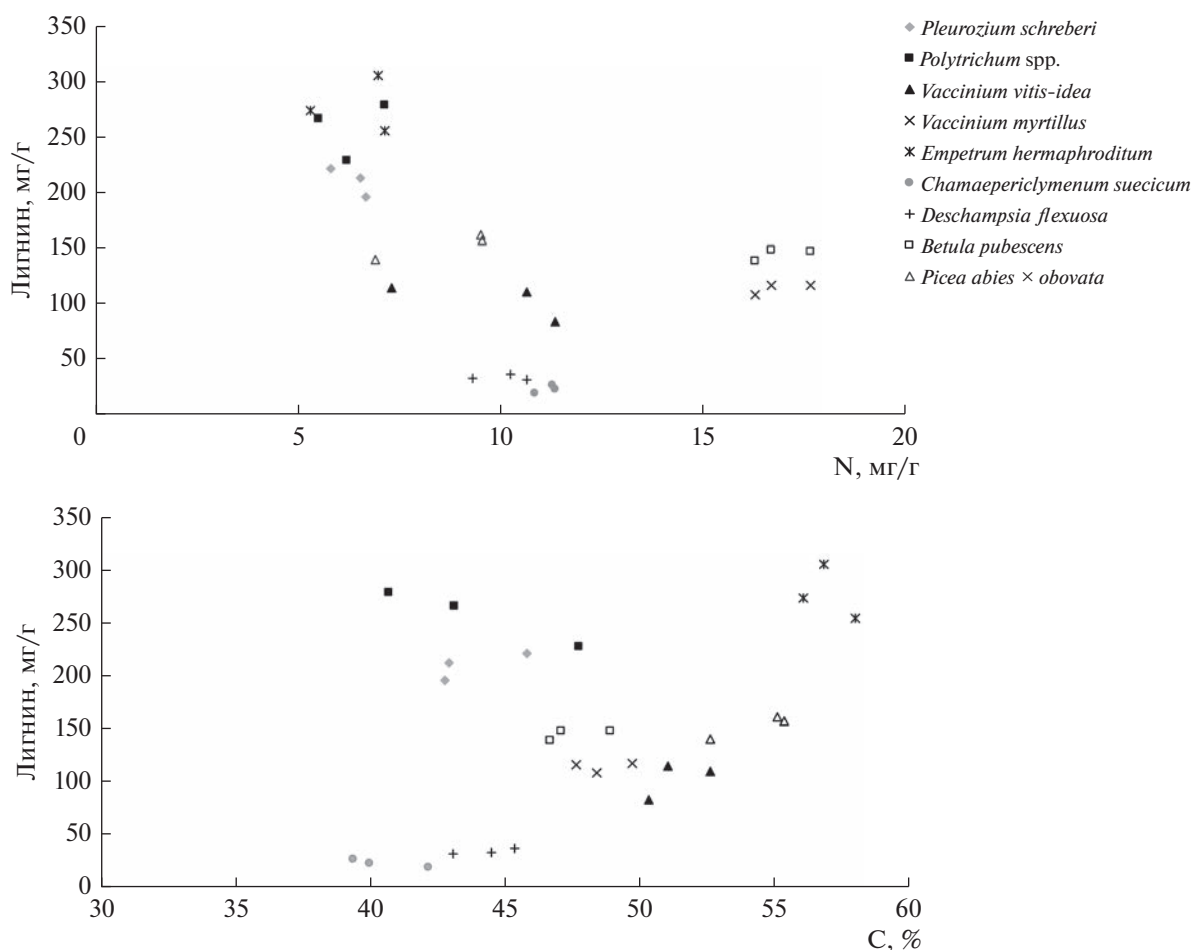


Рис. 1. Концентрации лигнина, азота (N) и углерода (C) в различных видах растений ельника кустарничково-зелено-мошного.

Фенольные соединения обладают высокой аллелопатической активностью и подавляют всхожесть семян (Лебедев, Лебедев, 2015; Колмогорова, Уфимцев, 2018). Содержание лигнина, фенольных соединений и танинов соответствует данным, представленным ранее для растений бореальных лесов Швеции (Wardle et al., 2003). По показателям фенольных соединений и азота (рис. 2) практически большинство видов проявляют индивидуальный характер, за исключением брусники обыкновенной и дерена шведского (высокое содержание фенольных соединений и среднее N), а также политрихума обыкновенного и плевроциума Шребера (низкое содержание азота и фенольных соединений). Для черники обыкновенной свойственны высокие концентрации и фенолов, и азота. Для ели сибирской — средние концентрации N при среднем содержании фенолов. Береза пушистая выявляется в области значительного содержания N при среднем фенолов. Овсяник извилистый показывает низкое содержание фенолов и среднее азота, а водяника гермафродитная — низкое содержание азота и фенольных соединений.

Такое же разнообразие химического состава свойственно растениям при сопоставлении концентраций углерода и фенольных соединений. Овсяник извилистый показывает низкое содержание углерода при низком содержании фенольных соединений, еще ниже этот показатель установлен для политрихума обыкновенного и плевроциума Шребера. Опад ели сибирской обнаруживает высокое содержание углерода при среднем фенольных соединений. Береза пушистая проявляется на диаграмме в области средних концентраций углерода и фенольных соединений. Высокое содержание фенольных соединений типично для брусники обыкновенной (высокие концентрации C), черники обыкновенной (средние концентрации C) и дерена шведского (низкие концентрации C). Водяника гермафродитная при низких концентрациях фенольных соединений показывает максимальные среди рассматриваемых растений концентрации углерода.

Проанализировав взаимосвязь танинов и азота (рис. 3), мы нашли четыре основных кластера. Брусника обыкновенная представляет высокие

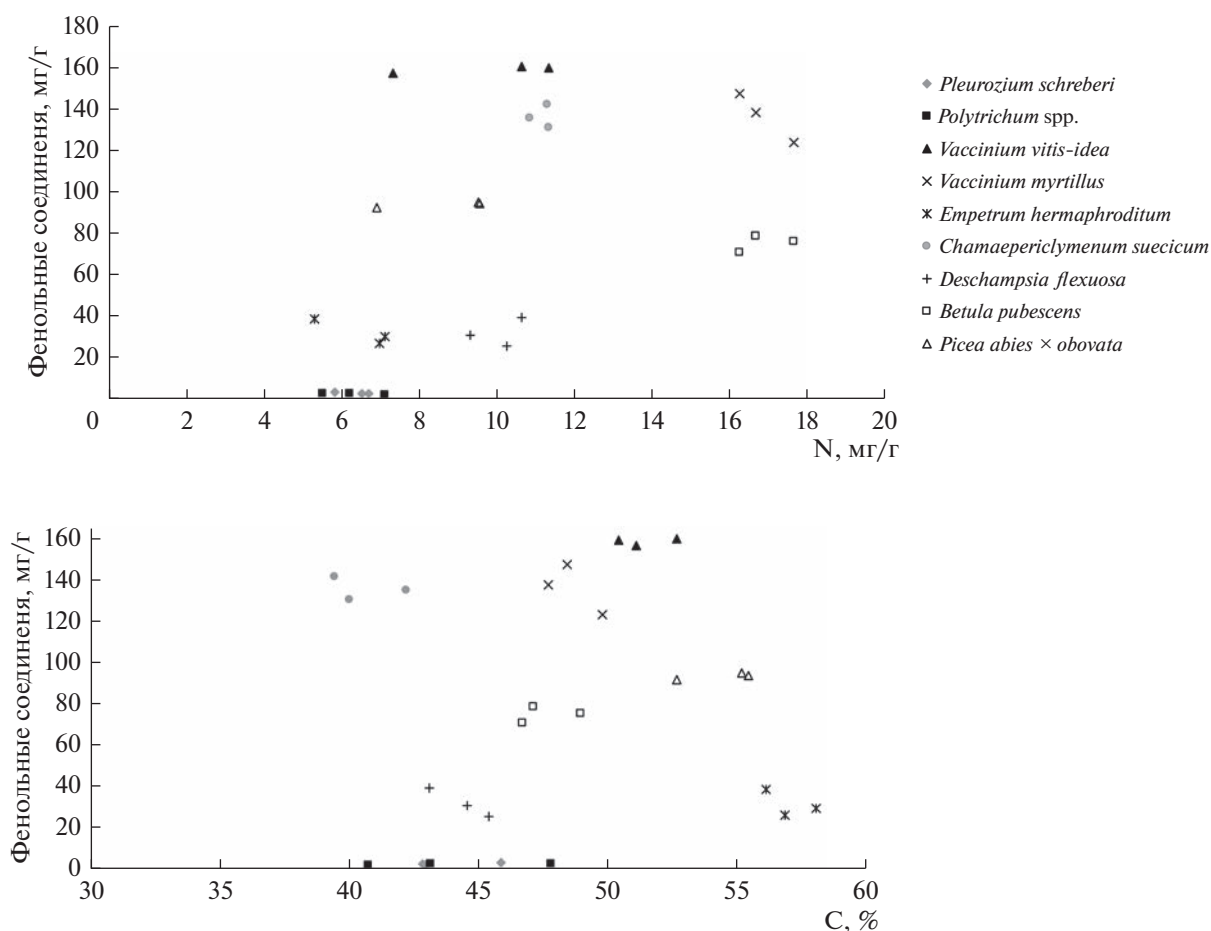


Рис. 2. Концентрации фенольных соединений, азота (N) и углерода (C) в различных видах растений ельника кустарничково-зеленомошного.

концентрации танинов при средних значениях азота. Опаву березы пушистой и черники обыкновенной присуще высокое содержание азота при среднем танинов. Водяника гермафродитная проявляется в области низкого содержания и танинов, и азота. Средние значения концентраций азота и танинов характерны для опада ели сибирской. Минимальные концентрации танинов свойственны овсику извилистому и дерену шведскому при средних значениях азота.

Четыре группы растений мы определили при анализе взаимодействия танинов и углерода. Максимальные концентрации танинов при средних значениях углерода типичны для брусники обыкновенной. Береза пушистая и черника обыкновенная представлены в области средних значений содержания танинов и углерода. Ель сибирская и черника обыкновенная проявляются в области максимальных значений углерода и малых концентраций танинов. Овсик извилистый и дерен шведский показывают минимальные концентрации и углерода, и танинов.

Ель сибирская произрастает в различных положениях ландшафта ельников кустарничково-зеленомошных (автоморфный ландшафт, транзитный ландшафт, аккумулятивный ландшафт). Проанализировав взаимосвязи лигнина, фенольных соединений, танинов, азота и углерода, мы нашли только повышение содержания танинов ($p < 0.05$) в хвое ели в автоморфной позиции ландшафта. Автоморфная позиция ландшафта находится на вершине склона. Одним из основных факторов влияния на повышение содержания танинов в данном случае может быть световой режим (Kivimäenpää et al., 2014). По другим характеристикам достоверных различий не установлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы определили значительное варьирование химического состава растений (лигнин, фенольные соединения, танины, азот и углерод) северотаежных лесов на межвидовом уровне. Поступление вторичных метаболитов с опадом определяется видовым составом расти-

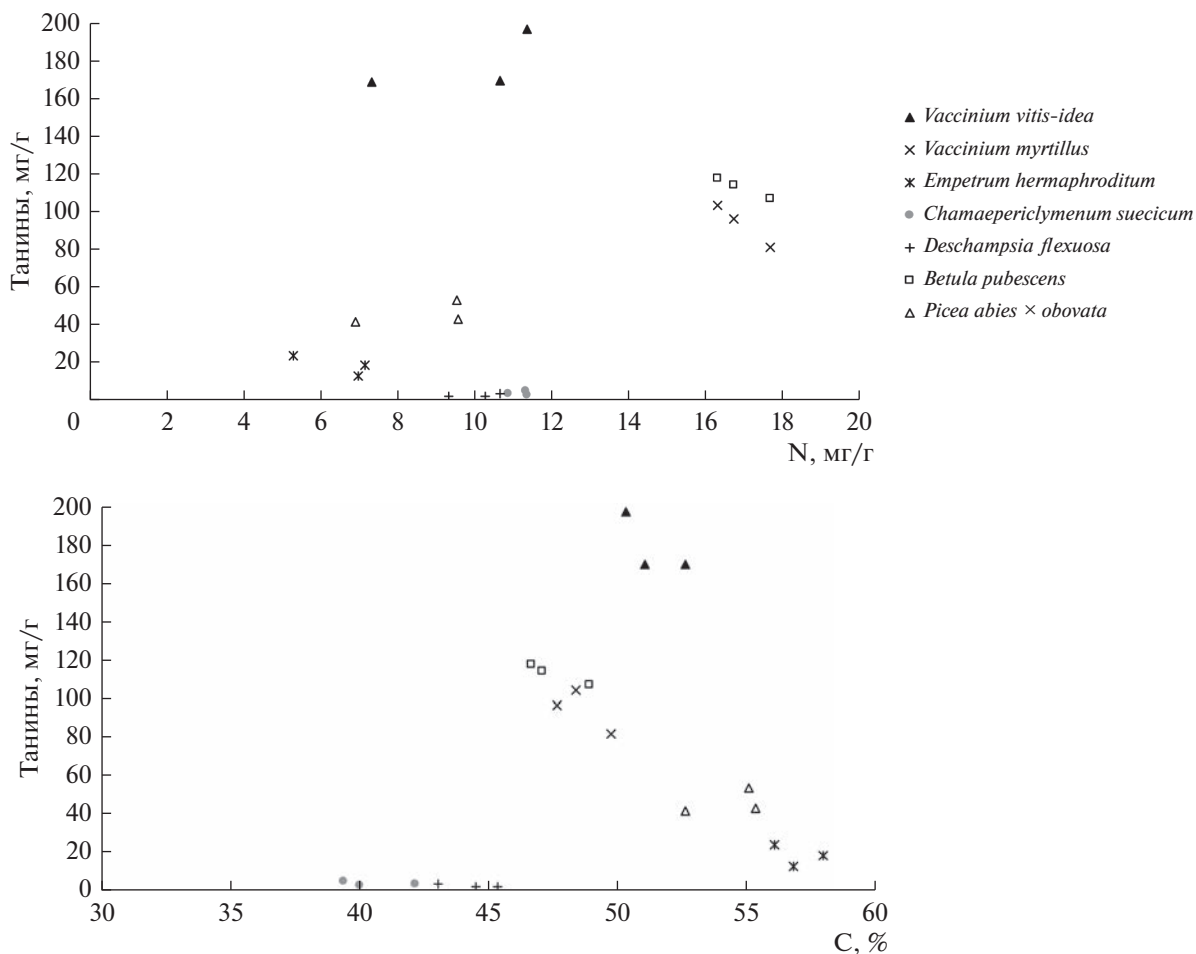


Рис. 3. Концентрации танинов, азота (N) и углерода (C) в различных видах растений ельника кустарничково-зелено-мошного.

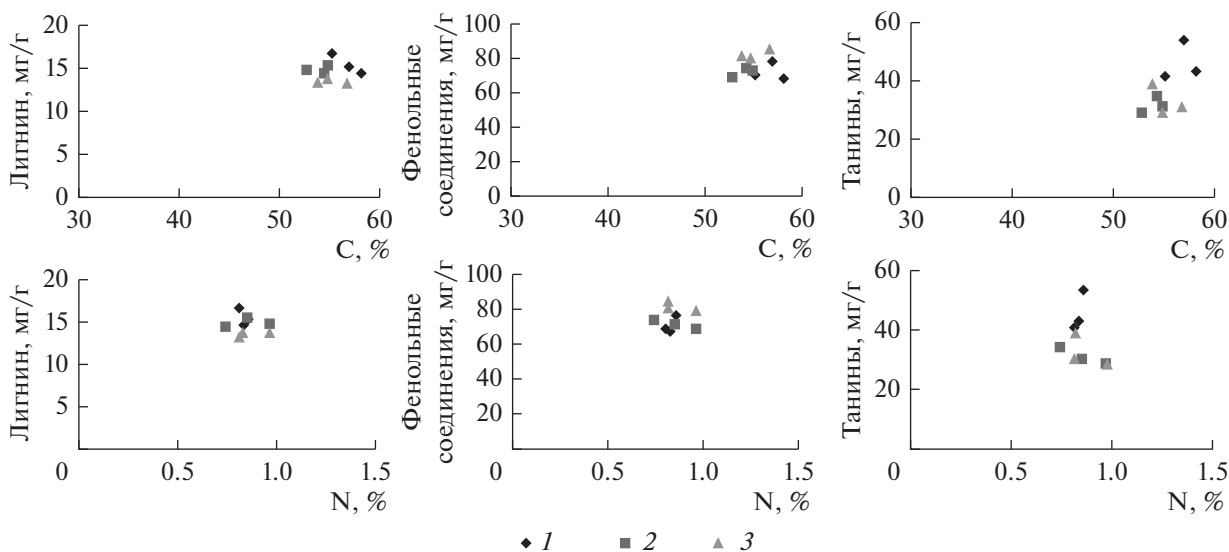


Рис. 4. Концентрации лигнина, фенольных соединений, танинов, азота (N) и углерода (C) в опаде ели сибирской в различных положениях ландшафта. 1 – автоморфный ландшафт; 2 – транзитный ландшафт; 3 – аккумулятивный ландшафт.

тельных сообществ и вкладом различных видов растений в состав растительного покрова (Артемкина и др., 2018а). На внутривидовом уровне (для ели сибирской) определили только повышение содержания танинов ($p < 0.05$) в хвое ели в автоморфной позиции ландшафта.

Полученные данные послужат возможной основой для более полного понимания того, как будут влиять различные растения на химические свойства опада и почвы в арктических лесных экосистемах, а следовательно, на особенности их функционирования. На основе корреляционных связей между качеством опада и скоростью разложения химический состав опада (содержание фенольных соединений, в том числе танинов, лигнина) может быть использован как предсказатель для определения темпов потери массы среди растений и также может послужить ключевыми переменными в биогеохимических моделях, описывающих процессы в экосистемах, в частности, процесс разложения опада растений, процесс трансформации углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемкина Н.А., Орлова М.А., Лукина Н.В. Микромозаика растительности и вариабельность химического состава L-горизонтов подстилки северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных // Лесоведение. 2018а. № 2. С. 97–106.
<https://doi.org/10.7868/S002411481802002X>
- Артемкина Н.А., Лукина Н.В., Орлова М.А. Пространственное варьирование содержания вторичных метаболитов, углерода и азота в подстилках северотаежных ельников // Лесоведение. 2018б. № 1. С. 37–47.
<https://doi.org/10.7868/S0024114818010035>
- Колмогорова Е.Ю., Уфимцев В.И. Некоторые особенности химического состава опада сосны обыкновенной, произрастающей в условиях породного отвала // Успехи современного естествознания. 2018. № 11–2. С. 267–272.
- Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес де Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Каганов В.В. Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опавов в модельном эксперименте // Лесоведение. 2017. № 2. С. 128–139.
- Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Генная инженерия биосинтеза лигнина в деревьях: компромисс между свойствами древесины и жизнеспособностью растений // Физиология растений. 2021. Т. 68. № 4. С. 339–355.
- Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Вопросы аллелопатии в лесных фитоценозах – состояние и перспективы // Агрохимия. 2015. № 4. С. 85–91.
- Манаков К.Н., Никонов В.В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука, 1981. 196 с.
- Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Смирнов В.Э., Гераскина А.П., Горнов А.В., Грабенко Е.А., Тихонова Е.В., Лукина Н.В. Сукцессионная динамика растительности и запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 163–176.
<https://doi.org/10.1134/S0024114819030082>
- Aerts R., van Bodegom P.M., Cornelissen J.H.C. Litter stoichiometric traits of plant species of high-latitude ecosystems show high responsiveness to global change without causing strong variation in litter decomposition // New Phytologist. 2012. V. 196. P. 181–188.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04256.x>
- Berg B. Foliar Litter Decomposition: A Conceptual Model with Focus on Pine (*Pinus*) Litter – A Genus with Global Distribution // ISRN Forestry. 2014. V. 2014. P. 1–22.
<https://doi.org/10.1155/2014/838169>
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // Forest Ecology and Management. 2000. V. 133. P. 13–22.
- Cheynier V., Comte G., Davies K.M., Lattanzio V., Martens S. Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology // Plant Physiology and Biochemistry. 2013. V. 72. P. 1–20.
- Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K., Dorrepaal E., Eviner V.T., Godoy O., Hobbie S.E., Hoorens B., Kurokawa H., Perez-Harguindeguy N. et al. 2008. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide // Ecology Letters. 2008. V. 11. № 10. P. 1065–1071.
- Fortunel C., Garnier E., Joffre R., Kazakou E., Quested H., Grigulis K., Lavorel S., Ansquer P., Castro H., Cruz P., Doležal J., Eriksson O., Freitas H., Golodets C., Jouany C., Kigel J., Kleyer M., Lehsten V., Lepš J., Meier T., Pake-man R., Papadimitriou M., Papanastasis V. P., Quetier F., Robson M., Sternberg M., Theau J.-P., Thebault A., Zaroval M. Leaf traits capture the effects of land use changes and climate on litter decomposability of grasslands across Europe // Ecology. 2009. V. 90. № 3. P. 598–611.
- He M., Zhao R., Tian Q., Huang L., Wang X., Liu F. Predominant effects of litter chemistry on lignin degradation in the early stage of leaf litter decomposition // Plant and Soil. 2019. V. 442. P. 453–469.
<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04207-6>
- Kanerva S., Kitunen V., Lopenen J., Smolander A. Phenolic compounds and terpenes in soil organic horizon layers under silver birch, Norway spruce and Scots pine // Biology and Fertility of Soils. 2008. V. 44. P. 547–556.
- Kivimäenpää M., Riikonen J., Sutinen S., Holopainen T. Cell structural changes in the mesophyll of Norway spruce needles by elevated ozone and elevated temperature in open-field exposure during cold acclimation // Tree Physiology. 2014. V. 34. № 4. P. 389–403.
- Osono T., Takeda H. Accumulation and release of nitrogen and phosphorus in relation to lignin decomposition in leaf litter of 14 tree species // Ecological Research. 2004. V. 19. № 6. P. 593–602.
- Ossipova S., Ossipov V., Haukioja E., Lopenen J., Pihlaja K. Proanthocyanidins of mountain birch leaves: quantification and properties // Phytochemical Analysis. 2001. V. 12. № 2. P. 128–133.
- Parton W., Silver W.L., Burke I.C., Grassens L., Harmon M.E., Currie W.S., King J.Y., Adair E.C., Brandt L.A., Hart S.C., et al.

Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition // *Science*. 2007. V. 315. P. 361–364. <https://www.jstor.org/stable/20035252>

Rosenfield M.V., Keller J.K., Clausen C., Cyphers K., Funk J.L. Leaf traits can be used to predict rates of litter decomposition // *Oikos*. 2020. V. 129. P. 1589–1596. <https://doi.org/10.1111/oik.06470>

Rowland A.P., Roberts J.D. Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1994. V. 25. № 3–4. P. 269–277.

Wardle D.A., Nilsson M.-C., Zackrisson O., Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. V. 35. P. 827–835.

Relations of Phenolic Compounds, Tannins, Lignin, Nitrogen and Carbon in Plants of the Empetro-Piceetum Forests of the Kola Peninsula

N. A. Artemkina*

*Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the RAS,
Academgorodok st., 14a, Apatity, Murmansk Oblast, 184200 Russia*

*E-mail: n.artemkina@ksc.ru

The study presents an analysis of aging (falling) organs (leaves/needles) of the following plants: Siberian spruce (*Picea abies* ssp. *obovata* (Ledeb.) Domin), downy birch (*Betula pubescens* Ehrh), common cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.), crowberry hermaphroditic (*Empetrum hermaphroditum* Hager.), blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.), Schreber's pleurium (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), polytrichum (*Polytrichum* spp.), dwarf cornel (*Chamaepericlymenum suecicum* (L.) Aschers. & Graebn. (*Cornus suecica* L.)), wavy hair-grass (*Deschampsia flexuosa* (L.) Trin.). A significant variation in the chemical composition (the content of lignin, phenolic compounds, tannins, nitrogen and carbon, as well as the stoichiometric ratios "C/N", "lignin/N", "lignin/cellulose") was found among plants of the northern taiga forests at the interspecific level. The influx of secondary metabolites with litter depends on the plant communities' species composition and the contribution of various plant species to the vegetation cover's composition. At the intraspecific level (for Siberian spruce growing in different landscape positions within empetro-piceetum forests (in automorphic, transit and accumulative landscapes)) an increase in the content of soluble tannins ($p < 0.05$) in spruce needles from the automorphic positions of landscape was determined. Also have been studied some interrelations between secondary metabolites, nitrogen and carbon in the composition of aging photosynthetic organs of dominant plant species in northern taiga empetro-piceetum forests.

Keywords: phenolic compounds, lignin, tannins, nitrogen, carbon, northern taiga forests, intraspecific variability, interspecific variability.

Acknowledgements: the study has been carried out within the framework of the State contract for the research topic № 1021051803679-9.

REFERENCES

Aerts R., van Bodegom P. M., Cornelissen J. H. C., Litter stoichiometric traits of plant species of high-latitude ecosystems show high responsiveness to global change without causing strong variation in litter decomposition, *New Phytologist*, 2012, Vol. 196, pp. 181–188. DOI 10.1111/j.1469-8137.2012.04256.x

Artemkina N.A., Lukina N.V., Orlova M.A., Prostranstvennoe var'irovanie sodержaniya vtorichnykh metabolitov, ugleroda i azota v podstilkakh severotaezhnykh el'nikov (Spatial variability of secondary metabolites, carbon and nitrogen in litters of spruce forests in northern taiga), *Lesovedenie*, 20186, No. 1, pp. 37–47.

Artemkina N.A., Orlova M.A., Lukina N.V., Micromosaic structure of vegetation and variability of the chemical composition of L layer of the litter in dwarf shrub–green moss spruce forests of the northern taiga, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018a, Vol. 11, No. 7, pp. 754–761.

Berg B., Foliar Litter Decomposition: A Conceptual Model with Focus on Pine (*Pinus*) Litter – A Genus with Global

Distribution, *ISRN Forestry*, 2014, Vol. 2014, pp. 1–22. DOI <http://dx.doi.org/10.1155/2014/838169>

Berg B., Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils, *Forest Ecology and Management*, 2000, Vol. 133, pp. 13–22.

Cheyrier V., Comte G., Davies K. M., Lattanzio V., Martens S., Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology, *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, Vol. 72, pp. 1–20.

Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K., Dorrepaal E., Eviner V.T., Godoy O., Hobbie S.E., Hoorens B., Kurokawa H., Perez-Harguindeguy N. et al., Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide, *Ecology Letters*, 2008, Vol. 11, No. 10, pp. 1065–1071.

Fortunel C., Garnier E., Joffre R., Kazakou E., Quested H., Grigulis K., Lavorel S., Ansquer P., Castro H., Cruz P., Doležal J., Eriksson O., Freitas H., Golodets C., Jouany C., Kigel J., Kleyer M., Lehsten V., Lepš J., Meier T., Pake-man R., Papadimitriou M., Papanastasis V. P., Quetier F., Robson M., Sternberg M., Theau J.-P., Thebault A., Zarovali M., Leaf traits capture the effects of land use changes

and climate on litter decomposability of grasslands across Europe, *Ecology*, 2009, Vol. 90, No. 3, pp. 598–611.

He M., Zhao R., Tian Q., Huang L., Wang X., Liu F., Predominant effects of litter chemistry on lignin degradation in the early stage of leaf litter decomposition, *Plant and Soil*, 2019, Vol. 442, pp. 453–469.

DOI <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04207-6>

Kanerva S., Kitunen V., Loonen J., Smolander A., Phenolic compounds and terpenes in soil organic horizon layers under silver birch, Norway spruce and Scots pine, *Biology and Fertility of Soils*, 2008, Vol. 44, pp. 547–556.

Kivimäenpää M., Riikonen J., Sutinen S., Holopainen T., Cell structural changes in the mesophyll of Norway spruce needles by elevated ozone and elevated temperature in open-field exposure during cold acclimation, *Tree Physiology*, 2014, Vol. 34, No. 4, pp. 389–403.

Kolmogorova E.Y., Ufimtsev V.I., Nekotorye osobennosti khimicheskogo sostava opada sosny obyknovЕННОй, proizrastayushchei v usloviyakh porodnogo otvala (Some peculiarities of the chemical composition of Scotch pine debris, growing under conditions of coal pit), *Uspekhi sovremenno-go estestvoznaniya*, 2018, No. 11-2, pp. 267–272.

Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes-De-Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V., Vliyanie azota na mineralizatsiyu i gumifikatsiyu lesnykh opadov v model'nom eksperimente (The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study), *Lesovedenie*, 2017, No. 2, pp. 128–139.

Lebedev V.G., Shestibratov K.A., Genetic engineering of lignin biosynthesis in trees: compromise between wood properties and plant viability, *Russian J. Plant Physiology*, 2021, Vol. 68, No. 4, pp. 596–612.

Lebedev V.M., Lebedev E.V., Voprosy allelopattii v lesnykh fitotsenozakh – sostoyanie i perspektivy (Questions of allelopathy in forest phytocenoses – state and prospects), *Agrokimiya*, 2015, No. 4, pp. 85–91.

Manakov K.N., Nikonov V.V., *Biologicheskii krugovorot mineral'nykh elementov i pochvoobrazovanie v el'nikakh Krainego Severa* (Biologic cycle of mineral elements and pedogenesis in spruce forest of the High Arctic), Leningrad: Nauka, 1981, 196 p.

Osono T., Takeda H., Accumulation and release of nitrogen and phosphorus in relation to lignin decomposition in leaf litter of 14 tree species, *Ecological Research*, 2004, Vol. 19, No. 6, pp. 593–602.

Ossipova S., Ossipov V., Haukioja E., Loonen J., Pihlaja K., Proanthocyanidins of mountain birch leaves: quantification and properties, *Phytochemical Analysis*, 2001, Vol. 12, No. 2, pp. 128–133.

Parton W., Silver W.L., Burke I.C., Grassens L., Harmon M.E., Currie W.S., King J.Y., Adair E.C., Brandt L.A., Hart S.C. et al., Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition, *Science*, 2007, Vol. 315, pp. 361–364, available at: <https://www.jstor.org/stable/20035252>

Rosenfield M.V., Keller J.K., Clausen C., Cyphers K., Funk J.L., Leaf traits can be used to predict rates of litter decomposition, *Oikos*, 2020, Vol. 129, pp. 1589–1596. DOI 10.1111/oik.06470

Rowland A.P., Roberts J.D., Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, Vol. 25, No. 3–4, pp. 269–277.

Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Smirnov V.E., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Grabenko E.A., Tikhonova E.V., Lukina N.V., Suktsessionnaya dinamika rastitel'nosti i zapasy pochvennogo ugleroda v khvoino-shirokolistvennykh lesakh Severo-Zapadnogo Kavkaza (Succession dynamics of vegetation and storages of soil carbon in mixed forests of Northwestern Caucasus), *Lesovedenie*, 2019, No. 3, pp. 163–176.

Wardle D.A., Nilsson M.-C., Zackrisson O., Gallet C., Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest, *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, Vol. 35, pp. 827–835.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПОБЕГОВ ИВЫ ТРЕХТЫЧИНКОВОЙ ПРИ РАЗНОМ АТМОСФЕРНОМ УВЛАЖНЕНИИ

© 2023 г. А. А. Афонин*

Брянский государственный университет им. академика И.Г. Петровского,
ул. Бежицкая, д. 14, Брянск, 241036 Россия

*E-mail: afonin.salix@gmail.com

Поступила в редакцию 06.09.2021 г.

После доработки 19.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

В статье проанализированы современные тенденции рационального использования быстрорастущих кустарниковых ив. Ива трехтычинковая (*Salix triandra* L.) рассматривается как источник прута для плетения, а также как вид, выполняющий важные экосистемные функции. Цель исследования — выявить влияние неравномерного распределения осадков на рост и развитие побегов ивы трехтычинковой. Тест-объект — генетически выровненная модельная инбредно-клоновая популяция ивы трехтычинковой. Материал — однолетние саженцы, выращенные из неукорененных черенков. Изучена динамика развития побегов в четырех клонах ивы трехтычинковой в два разных года с избыточным увлажнением. Второй год наблюдений отличался от предыдущего избытком осадков в период укоренения черенков. В условиях эксперимента максимальная длина годичных побегов составила 210–220 см, независимо от года наблюдений. Установлена цикличность изменения суточного прироста побегов. Полный сезонный цикл развития годичных побегов включает четыре многодневных цикла. Второй и третий многодневные циклы характеризуются наибольшим суточным приростом побегов в первой половине лета. Максимальный суточный прирост побегов в оба года наблюдений составил 4.1–4.9 см/сут в начале лета. Весенний и позднелетний суточный прирост на большинстве побегов не превысил 2.3–2.7 см/сут. На второй год наблюдений позднелетний суточный прирост (в среднем 1.9 см/сут) был немного выше, чем в первый год (в среднем 1.6 см/сут). Выявлена синхронизация развития побегов в начале лета, независимо от года наблюдений и от фактора клона. Избыточное увлажнение в период укоренения черенков приводит к смещению пиковых значений суточных приростов на более поздние сроки. На фоне неравномерного распределения осадков выявлено влияние фактора клона на сезонную динамику суточного прироста. При изучении роста и развития побегов в клонах ивы трехтычинковой необходимо учитывать неравномерность распределения осадков в первой половине вегетационного периода.

Ключевые слова: ивы, *Salix triandra* L., изменения климата, избыточное увлажнение, однолетние побеги, суточный прирост, динамика развития, цикличность развития.

DOI: 10.31857/S0024114823010023, **EDN:** NGFDVE

Ивы (*Salix* L.) — большая по количеству группа общеизвестных древесно-кустарниковых растений, включающая около 450 видов с многочисленными подвидами и разновидностями, а также естественными и искусственными гибридами (Wu et al., 2018). Наибольшее практическое значение имеют высокопродуктивные виды *Salix*, которые легко размножаются корневыми черенками (Анциферов, 1984). Благодаря своей способности к вегетативному размножению, ивы являются отличными системами для исследования клональных реплик, выращенных в разных условиях (Berlin et al., 2017).

Ивы устойчивы к ряду стрессов, в том числе к стрессам, обусловленным недостатком или избытком воды в почве (Zhang et al., 2020). Поэтому

ивы обычно высаживают на маргинальных землях, например, в районах, подверженных наводнениям. Для растений, созданных посадкой неукорененных черенков, этап укоренения имеет решающее значение. Избыточное увлажнение в этот период может оказать негативное влияние на растения (Rodríguez et al., 2018).

Практическое значение ив трудно переоценить. В зонах умеренного климата быстрорастущие виды *Salix* представляют собой источник энергетической биомассы (Stolarski et al., 2019). Плантации ивы с коротким оборотом могут поддерживать экосистемные услуги, связанные с круговоротом питательных веществ (Weih et al., 2021). Ивы широко применяются в защитном лесоразведении благодаря своей крайней выносли-

ности, способности к вегетативному размножению с образованием мощной корневой системы (Zhu et al., 2016). Ивы используются для широкого спектра экологических проектов, включая очистку сточных вод, прибрежные буферы и очистные заболоченные участки (Fredette et al., 2019; Zhang et al., 2020). Побеги ив содержат такие биологически активные вещества, как фенологликозиды, флавоноиды, дубильные вещества и фенолокислоты (Gligorić et al., 2019).

Ива трехтычинковая (*S. triandra* L., syn. *S. amygdalina* L.) — типичный представитель высокопродуктивных кустарниковых ив секции *Amygdalinae* Koch (*Triandrae* Dum.) подрода *Salix* Nas. (*Amerina* Dum.) (Skvortsov, 1999). Одна из самых важных культурных ив как источник прута для плетения выращивается на сырьевых плантациях в режимах регулярной срезки для изготовления корзиночных материалов (Noletto-Dias et al., 2019). Ива трехтычинковая представляет интерес как вид, выполняющий различные экосистемные функции, в частности, в весенний период обеспечивает пищей медоносных пчел и других насекомых-опылителей (Wu et al., 2019). Также ива является перспективным источником фармацевтического сырья (Санникова и др., 2018).

Способность растений выживать в новых условиях окружающей среды, вызванных изменением климата, зависит от популяций, обладающих достаточной генетической изменчивостью, чтобы адаптироваться к сезонным изменениям (Richards et al., 2020). За последние 50 лет наблюдалась устойчивая тенденция к повышению средних температур воздуха и увеличению годовых сумм осадков на всей территории России во все сезоны (Доклад ..., 2021). Способность деревьев реагировать на изменение климата — актуальный вопрос как в контексте естественных лесов, так и в контексте искусственных посадок (Cortés et al., 2020).

Температура воздуха и количество осадков оказывают значительное влияние на урожай ивы (Narayana et al., 2020). В связи с повсеместным изменением климата ожидается увеличение частоты экстремальных дождей (Rodríguez et al., 2018). В результате возможно возникновение стресса избыточного увлажнения (excessive moisture stress, EM-stress) (Powers et al., 2009).

Влияние избыточного атмосферного увлажнения на развитие черенковых саженцев ив изучалось путем постановки горшечных экспериментов в теплицах и на открытом воздухе (Rodríguez et al., 2018; Keita et al., 2021). В то же время ростовые реакции черенковых саженцев на экстремальные изменения гидротермического режима в условиях полевого опыта изучены недостаточно.

Ранее нами было показано, что ива трехтычинковая может использоваться как тест-объект

для изучения влияния кратковременной ранне-летней засухи на рост и развитие побегов (Афонин, 2021а).

Цель данного исследования — выявить влияние неравномерного распределения осадков на рост и развитие однолетних черенковых саженцев в клонах ивы трехтычинковой при избыточном весенне-летнем увлажнении в разные годы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в салицетуме Брянского государственного университета (53°16'23.50" с.ш., 34°21'11.50" в.д.) на территории Брянского округа зоны широколиственных лесов. Тип почв — автоморфные, серые лесные, на лёссовидном карбонатном суглинке. Тип лесорастительных условий — D3 (мезогигрофильная дубрава). Исходный тип растительности — *Quercetum coryloso-aegopodiosum*.

В качестве тест-объекта использовалась генетически выровненная модельная инбредно-клонная популяция ивы трехтычинковой. Подробная история родоначальников клонов и технология создания инбредно-клонной популяции описаны ранее (Афонин, 2021б). В качестве материала использовали черенковые саженцы первого года жизни, для чего ежегодно проводилось обновление тест-объекта.

Наблюдения за развитием побегов проводили в погодно-климатических условиях 2020 и 2021 гг. Для анализа динамики агрометеорологических факторов на территории района исследований в течение периодов вегетации использовались апробированные процедуры (Ma et al., 2021). Исходные данные по суточной динамике температуры воздуха $T^{\circ}\text{C}$ и количества осадков R , мм в районе исследований (метеостанция Брянск: 53°12'45" с.ш., 34°10'54" в.д.) получены из открытого источника (Погода и климат ..., 2021), а затем сгруппированы по декадам (Литвинова, 2021).

Основу данного исследования составили результаты наблюдений в 2021 г. за развитием побегов в четырех клонах (*tr04*, *tr05*, *tr18*, *tr20*) при 3-кратной повторности. В качестве контроля использовались материалы 2020 г. — те же клоны, но повторность 6-кратная (Афонин 2021б). Все саженцы формировались в один побег. Для получения исходных данных каждые 4 сут в период активного роста побегов (май—август) производили измерение их длины (L , см). Далее методом скользящей рамки шириной 8 сут и пошаговым смещением 4 сут вычисляли суточный прирост побегов (ΔL , см/сут). Полученные результаты были обработаны статистически с использованием ресурсов приложения МО Excel. Для дальнейшего анализа строили графики сезонной динамики L и ΔL . Подробная методика получения исходных

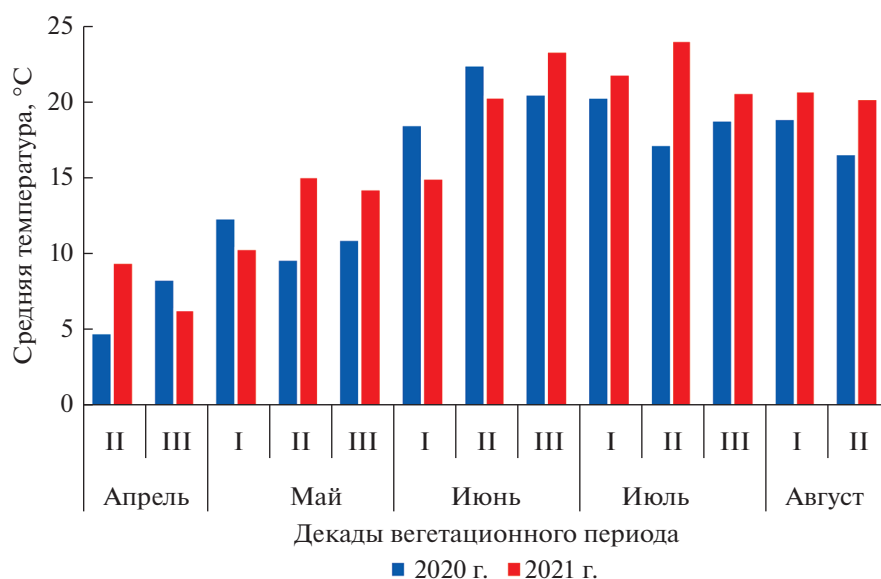


Рис. 1.

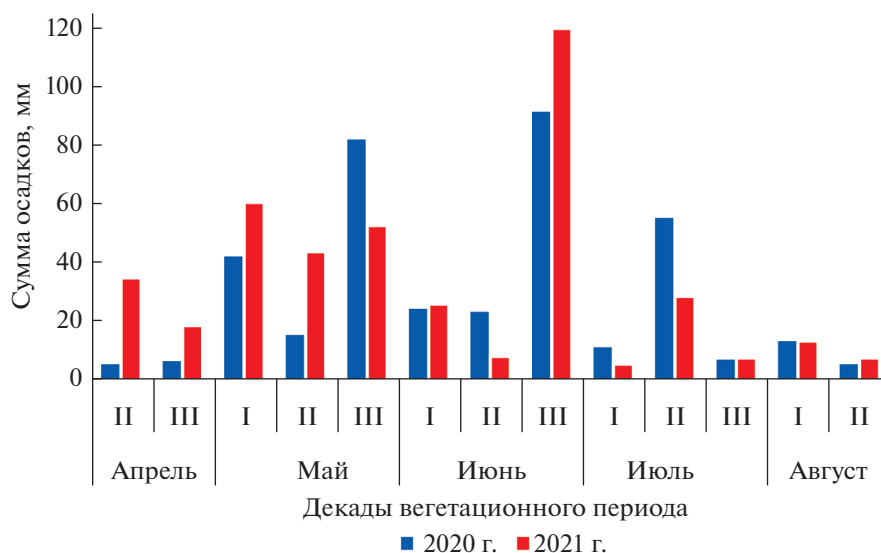


Рис. 2.

данных и алгоритм анализа рядов динамики развития побегов описаны нами ранее (Афонин 2021б). Для оценки сезонного размаха изменчивости суточного прироста в разные годы вычисляли среднеквадратичную амплитуду A_{RMS} — квадратный корень из среднего квадрата фактических отклонений ΔL от среднегодового прироста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика средних декадных температур воздуха и подекадных сумм осадков в теплые периоды 2020 и 2021 гг. показана на рис. 1 и 2.

В оба года наблюдений первые половины вегетационных периодов (май-июнь) охарактеризовались умеренно теплой погодой с избыточным атмосферным увлажнением. Отклонения температур от средних многолетних значений в мае-июне составили $+0.3^{\circ}\text{C}$ в 2020 г. и $+0.7^{\circ}\text{C}$ в 2021 г. Количество осадков за май-июнь в 2020 г. достигло 279 мм (204% от нормы), в 2021 г. — 297 мм (214% от нормы). Вторые половины вегетационных периодов (с 1 июля по 20 августа) в оба года наблюдений охарактеризовались сухой погодой. Количество осадков в 2020 г. составило 76% от нормы, в 2021 г. — 58%. При этом отклонения

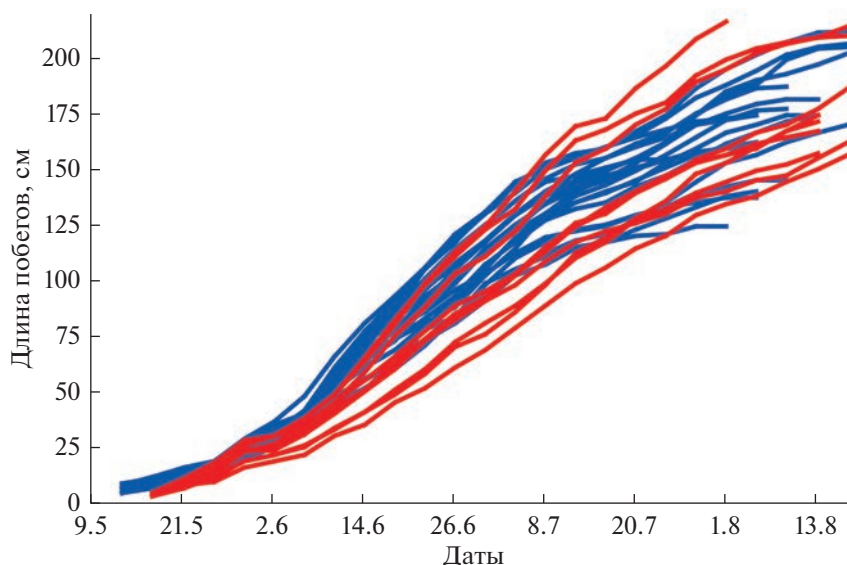


Рис. 3.

температур от средних многолетних значений составили $+0.2^{\circ}\text{C}$ в 2020 г. и $+2.3^{\circ}\text{C}$ в 2021 г. (с третьей декады июля и до конца августа 2021 г. наблюдалась атмосферная засуха средней интенсивности). В то же время начало вегетационного периода 2021 г., по сравнению с предыдущим годом, охарактеризовалось избыточным атмосферным увлажнением: в интервале с 20 апреля по 20 мая сумма осадков в 2021 г. составила 124 мм против 67 мм в этом же интервале 2020 г. Средняя температура воздуха в 2021 г. в интервале с 20 апреля по 10 мая оказалась на 2.03°C ниже, чем в предыдущем году.

В оба года исследований часть побегов завершила развитие (с отмиранием верхней почки) в третьей декаде июля, а часть продолжила рост до середины августа. Для дальнейшего исследования были использованы побеги длиной не менее 125 см, завершившие рост в августе: 20 побегов в 2020 г. и 10 побегов в 2021 г. В результате удалось проследить динамику роста и развития побегов на протяжении всего периода вегетации. Сезонная динамика роста исследованных побегов в 2020 и 2021 гг. показана на рисунке 3.

В оба года наблюдений траектории сезонной динамики роста исследованных побегов имели конфигурацию кумулятивных S-образных кривых. Рост побегов в 2021 г. по сравнению с 2020 г. начался с задержкой примерно на 4 сут: длина побегов достигла 10 см в 2020 г. к 17–21 мая, а в 2021 г. — к 21–25 мая. Смещение начальных этапов роста побегов на более поздние сроки в 2021 г. может быть следствием дожливой прохладной погоды в период укоренения черенков (конец апреля–начало мая). Наиболее интенсивный рост побегов в оба года наблюдений выявлен в период с 6 июня по 12 июля.

Во второй половине июля и до середины августа рост побегов продолжился, но с меньшей интенсивностью. Кратковременная атмосферная засуха во второй половине лета 2021 г. не оказала заметного влияния на рост побегов. По итогам вегетационных периодов двух лет наблюдений самые длинные побеги образовали саженцы клона *tr04*: в 2020 г. длина побегов составила 210–215 см, в 2021 г. — 210–220 см.

Динамика суточного прироста побегов в 2020 и 2021 гг. охарактеризовалась отчетливо выраженной цикличностью (рис. 4).

В оба года наблюдений в конце весны, 25–29 мая, суточный прирост побегов достиг слабо выраженного поздневесеннего максимума. Далее, в самом начале лета, 2 июня, на большинстве побегов, независимо от клоновой принадлежности, выявлен минимум ΔL , после которого суточный прирост побегов резко увеличился. В 2020 г. к 10 июня суточный прирост достиг абсолютного максимума, который на большинстве побегов составил около 4 см/сут, а на самых сильных побегах — 4.1–4.9 см/сут. В 2021 г. после прохождения раннелетнего минимума суточный прирост увеличился, но динамика суточного прироста побегов разных клонов оказалась различной. На побегах клона *tr04* к 14–18 июня был достигнут абсолютный максимум суточного прироста — 3.8–4.4 см/сут, что соответствует пиковым значениям ΔL в 2020 г. На большинстве побегов остальных клонов абсолютный максимум ΔL — 2.4–3.3 см/сут — был достигнут к 18–22 июня. После прохождения максимумов суточный прирост неравномерно снижался с образованием локальных максимумов 30 июня в 2020 г. и 8 июля в 2021 г. Таким образом, в 2021 г. среднелетние пики оказались смещенными на

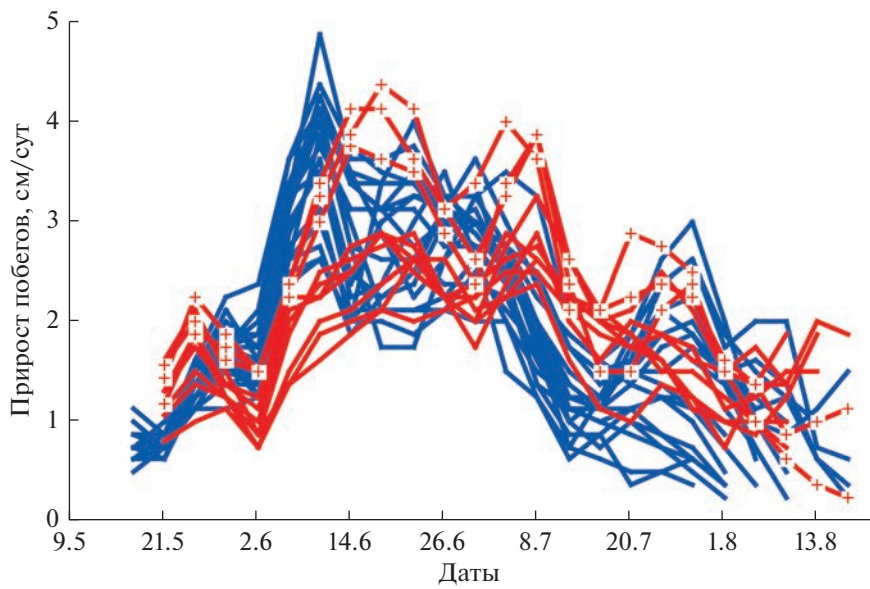


Рис. 4.

8 сут на более поздние даты. Интервалы же между этими пиками – 20 сут – оказались одинаковыми в разные годы и независимыми от фактора клона.

В оба года наблюдений в середине лета на большинстве побегов выявлен среднелетний минимум суточного прироста: 12–16 июля в 2020 г. и 16–20 июля в 2021 г. Независимо от года наблюдений и от фактора клона, после 16 июля ритмы суточного прироста побегов синхронизировались. К 24–28 июля суточный прирост несколько увеличился, а затем произошло его снижение вплоть до окончания вегетации. Таким образом, в оба года наблюдений выявлено 4 многодневных цикла колебаний суточного прироста. Летним циклам предшествуют раннелетние минимумы, синхронизированные независимо от года наблюдений и от фактора клона.

Среднегодовые показатели суточного прироста побегов приведены в табл. 1.

Средние значения суточного прироста побегов в 2021 г. оказались на 0.11 см/сут больше, чем в 2020 г., однако это превышение статистически недостоверно ($P > 0.10$). Среднеквадратичная амплитуда колебаний суточного прироста в 2020 г. оказалась заметно выше, чем в 2021 г. Большие

значения A_{RMS} в 2020 г. обусловлены большими пиковыми значениями ΔL в начале июня. В то же время в 2021 г. высокие значения ΔL и A_{RMS} на побегах клона *tr04* дали несколько завышенное значение этих показателей: средний суточный прирост на побегах клона составил 2.42 ± 0.129 см/сут (против 1.85 ± 0.048 см/сут на побегах остальных клонов) при амплитуде колебаний суточного прироста 1.10 см/сут (против 0.61 см/сут на побегах остальных клонов). В целом сезонная динамика суточного прироста побегов клона *tr04* в 2021 г. оказалась сходной с сезонной динамикой нарастания побегов всех клонов в 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разные годы с избыточным атмосферным увлажнением динамика нарастания побегов на однолетних черенковых саженцах ивы трехтычинковой охарактеризовалась цикличностью, обусловленной чередованием максимумов и минимумов суточного прироста. При этом раннелетние минимумы синхронизированы независимо от года наблюдений, от фактора клона и от индивидуальных особенностей саженцев. В то же

Таблица 1. Изменчивость динамики суточного прироста побегов в разные годы

Показатели динамики суточного прироста	2020 г.	2021 г.
Количество вычисленных значений суточного прироста	427	215
Среднегодовой суточный прирост	$\Delta L_{cp} = 1.91 \pm 0.047$ см/сут	$\Delta L_{cp} = 2.02 \pm 0.054$ см/сут
Среднеквадратичная амплитуда колебаний суточного прироста	$A_{RMS} = 0.99$ см/сут	$A_{RMS} = 0.79$ см/сут
Коэффициент вариации суточного прироста	$CV = 51.3\%$	$CV = 39.2\%$

время в динамике нарастания побегов второго года наблюдений выявлены некоторые особенности: начальные (весенние) этапы роста, а также раннелетние пики суточных приростов побегов смещены на более поздние сроки. Такие смещения могли быть обусловлены более дождливой погодой в конце апреля – первой половине мая. Кроме того, на второй год выявлено влияние фактора клона на амплитуду колебаний суточного прироста.

Таким образом, при изучении влияния избыточного увлажнения на рост и развитие побегов ивы трехтычинковой необходимо учитывать особенности подекадного распределения атмосферных осадков в период укоренения черенков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анциферов Г.И. Ива. М.: Лесная промышленность, 1984. 101 с.
- Афонин А.А. Сезонная динамика длины междоузлий *Salix triandra* L. (Salicaceae) на фоне кратковременной атмосферной засухи // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021а. № 1. С. 104–112.
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-1-104-112>
- Афонин А.А. Эпигенетическая изменчивость структуры сезонной динамики развития побегов ивы трехтычинковой (*Salix triandra*, Salicaceae) // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2021б. № 2(38). С. 1–14. http://vestospu.ru/archive/2021/articles/1_38_2021.pdf.
<https://doi.org/10.32516/2303-9922.2021.38.1>
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. Москва, 2021. 104 с. http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf (дата обращения 23.08.2021 г.).
- Литвинова О.С. Влияние декадного атмосферного увлажнения на урожайность яровой пшеницы в лесостепной зоне Новосибирской области // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 2. С. 274–283.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621020060>
- Погода и климат. Климатический монитор. Брянск. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26898> (дата обращения 02.09.2021 г.).
- Санникова Е.Г., Попова О.И., Компанцева Е.В. Ива трехтычинковая (*Salix triandra* L.) – перспективы и возможности использования в медицине и фармации // Фармация и фармакология. 2018. № 6(4). С. 318–339.
- Berlin S., Hallingbäck H.R., Beyer F., Nordh N.-E., Weih M., Rönnberg-Wästljung A.-C. Genetics of phenotypic plasticity and biomass traits in hybrid willows across contrasting environments and years // Annals of Botany. 2017. V. 120. № 1. P. 87–100.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcx029>
- Cortés A.J., Restrepo-Montoya M., Bedoya-Canas L.E. Modern Strategies to Assess and Breed Forest Tree Adaptation to Changing Climate // Frontiers in Plant Science. 2020. V. 11. P. 583323.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.583323>
- Fredette C., Labrecque M., Comeau Y., Brisson J. Willows for environmental projects: A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus *Salix* // J. Environmental Management. 2019. V. 246. P. 526–537.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.010>
- Glgorić E., Igić R., Suvajdžić L., Grujić-Letić N. Species of the genus *Salix* L.: biochemical screening and molecular docking approach to potential acetylcholinesterase inhibitors // Applied Sciences. 2019. V. 9. № 9. P. 1842.
<https://doi.org/10.3390/app9091842>
- Harayama H., Uemura A., Utsugi H., Han Q., Kitao M., Maruyama Y. The effects of weather, harvest frequency, and rotation number on yield of short rotation coppice willow over 10 years in northern Japan // Biomass and Bioenergy. 2020. V. 142. P. 105797.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105797>
- Keita N., Bourgeois B., Evette A., Tisserant M., González E., Breton V., Goulet C., Poulin M. Growth Response of Cuttings to Drought and Intermittent Flooding for Three *Salix* Species and Implications for Riverbank Soil Bioengineering // Environmental Management. 2021. V. 67. P. 137–1144.
<https://doi.org/10.1007/s00267-021-01444-3>
- Ma X., Pang Z., Wu J., Zhang G., Dai Y., Zou J., Kan H. Seasonal pattern of stem radial growth of *Salix matsudana* and its response to climatic and soil factors in a semi-arid area of North China // Global Ecology and Conservation. 2021. V. 28. P. e01701.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01701>
- Noletto-Dias C., Wu Y., Bellisai A., Macalpine W., Beale M.H., Ward J.L. Phenylalkanoid Glycosides (Non-Salicinoids) from Wood Chips of *Salix triandra* × *dasyclados* Hybrid Willow // Molecules. 2019. V. 24. № 6. P. 1152.
<https://doi.org/10.3390/molecules24061152>
- Powers M.D., Pregitzer K.S., Palik B.J., Webster C.R. Water relations of pine seedlings in contrasting overstory environments // Forest Ecology and Management. 2009. V. 258. № 7. P. 1442–1448.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.040>
- Richards T.J., Karacic A., Apuli R.P., Weih M., Ingvarsson P.K., Rönnberg-Wästljung A.C. Quantitative genetic architecture of adaptive phenology traits in the deciduous tree, *Populus trichocarpa* (Torr. and Gray) // Heredity. 2020. № 125. P. 449–458.
<https://doi.org/10.1038/s41437-020-00363-z>
- Rodríguez M.E., Doffo G.N., Cerrillo T., Luquez V.M.C. Acclimation of cuttings from different willow genotypes to flooding depth level // New Forests. 2018. V. 49. № 3. P. 415–427.
<https://doi.org/10.1007/s11056-018-9627-7>
- Skvortsov A.K. Willows of Russia and adjacent countries. Taxonomical and geographical revision. Joensuu: University of Joensuu, 1999. 307 p.
- Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworowski J., Krzyżaniak M. Extensive Willow Biomass Production on Marginal Land // Polish Journal of Environmental Studies. 2019. V. 28. № 6. P. 4359–4367.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/94812>
- Weih M., Nordh N.-E., Manzoni S., Hoeber S. Functional traits of individual varieties as determinants of growth and nitrogen

use patterns in mixed stands of willow (*Salix* spp.) // Forest Ecology and Management. 2021. V. 479. P. 118605. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118605>

Wu D., Wang Y., Zhang L., Dou L., Gao L. The complete chloroplast genome and phylogenetic analysis of *Salix triandra* from China // Mitochondrial DNA Part B. 2019. V. 4. № 2. P. 3571–3572. <https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1674743>

Wu Q., Liang X., Dai X., Chen Y., Yin T. Molecular discrimination and ploidy level determination for elite willow culti-

vars // Tree Genetics & Genomes. 2018. V. 14. P. 65. <https://doi.org/10.1007/s11295-018-1281-x>

Zhang J., Yuan H., Li Y., Chen Y., Liu G., Ye M., Yu C., Lian B., Zhong F., Jiang Y., Xu J. Genome sequencing and phylogenetic analysis of allotetraploid *Salix matsudana* Koidz. // Horticulture Research. 2020. V. 7. P. 201. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-00424-8>

Zhu Y., Wang G., Li R. Seasonal Dynamics of Water Use Strategy of Two *Salix* Shrubs in Alpine Sandy Land, Tibetan Plateau // PLoS ONE. 2016. V. 11. № 5. P. e0156586. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156586>

Development Dynamics of the Almond Willow's Shoots on Different Levels Atmospheric Moisture

A. A. Afonin*

Bryansk State University, Bezhitskaya st., 14, Bryansk, 241036 Russia

*E-mail: afonin.salix@gmail.com

The article provides an analysis of the modern trends in the rational use of fast-growing shrub willows. The almond willow (*Salix triandra*) is considered a source of wicker for weaving, as well as a species performing important ecosystem functions. The purpose of the research was to identify the influence of uneven precipitation distribution on the growth and development of the *S. triandra* shoots. The test site had a genetically aligned model inbred-clonal population of *S. triandra*. One-year willow saplings grown from unrooted cuttings were chosen as a study material. The development dynamics of *S. triandra* shoots was studied in four clones and in two different years with excessive moisture. The second year of observations differed from the previous one by an excess of precipitation during the cuttings rooting. Under experimental conditions, the maximum length of annual shoots was 210–220 cm, regardless of the year of observation. The cyclicity was determined in the shoots' daily growth's variations. The full seasonal development cycle of shoots includes four multi-day cycles. The second and third multi-day cycles are characterised by the greatest daily growth of shoots in the first half of summer. The maximum daily growth in both years of observation was 4.1–4.9 cm/day and occurred in early summer. The spring and late summer daily growth of most shoots did not exceed 2.3–2.7 cm/day. In the second year of observation, the late-summer daily growth (on average 1.9 cm/day) was slightly higher than in the first year (on average 1.6 cm/day). The synchronization of the shoots development in the beginning of summer was revealed, regardless of the year of observation and the clones' factor. Excessive moisture during the rooting of cuttings lead to a shift in the peak values of daily growth at a later date. Against the background of an uneven distribution of precipitation, the influence of the clones' factor on the seasonal dynamics of daily growth was revealed. When studying the growth and development of shoots in *S. triandra* clones, it is necessary to take into account the uneven distribution of precipitation in the first half of the vegetation period.

Keywords: willow, *Salix triandra*, climate change, excessive moisture, one-year shoots, daily growth, development dynamics, cyclicity of development.

REFERENCES

Antsiferov G.I., Iva (Willow), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1984, 101 p.

Afonin A.A., Sezonnaya dinamika dliny mezhdouzlii *Salix triandra* L. (Salicaceae) na fone kratkovremennoi atmosfery zasukhi (Seasonal dynamics of internode length of *Salix triandra* L. (Salicaceae) against the background of short-term atmospheric drought), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2021a, No. 1, pp. 104–112. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-1-104-112>

Afonin A.A., Epigeneticheskaya izmenchivost' struktury sezonnoi dinamiki razvitiya pobegov ivy trekhtychnikovoi (*Salix triandra*, Salicaceae) (Epigenetic variability of the structure of seasonal dynamics of shoot development of almond

willow (*Salix triandra*, Salicaceae)), *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific J.*, 2021b, No. 2(38), pp. 1–14, available at: http://vestospu.ru/archive/2021/articles/1_38_2021.pdf. <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2021.38.1>

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god (A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020), Moscow, 2021, 104 p., available at: http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf (August 23, 2021).

Litvinova O.S., Vliyanie dekadnogo atmosfernogo uvlazhneniya na urozhainost' yarovoi pshenitsy v lesostepnoi zone Novosibirskoi oblasti (Influence of decadal atmospheric moisture on spring wheat yield in the forest-steppe zone of Novosibirsk oblast), *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*,

2021, Vol. 85, No. 2, pp. 274–283.

<https://doi.org/10.31857/S2587556621020060>

Pogoda i klimat. Klimaticheskii monitor (Weather and climate. Climate monitor. Bryansk), Bryansk, available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26898> (September 02, 2021).

Sannikova E.G., Popova O.I., Kompantseva E.V. Iva trekhtychinkovaya (*Salix triandra* L.) – perspektivy i vozmozhnosti ispol'zovaniya v meditsine i farmatsii (Willow triandra (*Salix triandra* L.): prospects and opportunities for use in medicine and pharmacy), *Farmatsiya i farmakologiya*, 2018, No. 6(4), pp. 318–339.

Berlin S., Hallingbäck H.R., Beyer F., Nordh N.-E., Weih M., Rönnberg-Wästljung A.-C., Genetics of phenotypic plasticity and biomass traits in hybrid willows across contrasting environments and years, *Annals of Botany*, 2017, Vol. 120(1), pp. 87–100.

<https://doi.org/10.1093/aob/mcx029>

Cortés A.J., Restrepo–Montoya M., Bedoya–Canas L.E., Modern Strategies to Assess and Breed Forest Tree Adaptation to Changing Climate, *Frontiers in Plant Science*, 2020, Vol. 11, pp. 583323.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.583323>

Fredette C., Labrecque M., Comeau Y., Brisson J., Willows for environmental projects: A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus *Salix*, *J. Environmental Management*, 2019, Vol. 246, pp. 526–537.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.010>

Gligorić E., Igić R., Suvajdžić L., Grujić–Letić N., Species of the genus *Salix* L.: biochemical screening and molecular docking approach to potential acetylcholinesterase inhibitors, *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9(9), pp. 1842.

<https://doi.org/10.3390/app9091842>

Harayama H., Uemura A., Utsugi H., Han Q., Kitao M., Maruyama Y., The effects of weather, harvest frequency, and rotation number on yield of short rotation coppice willow over 10 years in northern Japan, *Biomass and Bioenergy*, 2020, Vol. 142, pp. 105797.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105797>

Keita N., Bourgeois B., Evette A., Tisserant M., González E., Breton V., Goulet C., Poulin M., Growth Response of Cuttings to Drought and Intermittent Flooding for Three *Salix* Species and Implications for Riverbank Soil Bioengineering, *Environmental Management*, 2021, Vol. 67, pp. 137–1144.

<https://doi.org/10.1007/s00267-021-01444-3>

Ma X., Pang Z., Wu J., Zhang G., Dai Y., Zou J., Kan H., Seasonal pattern of stem radial growth of *Salix matsudana* and its response to climatic and soil factors in a semi-arid area of North China, *Global Ecology and Conservation*, 2021, Vol. 28, pp. e01701.

<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01701>

Noieto-Dias C., Wu, Y., Bellisai A., Macalpine W., Beale M.H., Ward J.L., Phenylalkanoid Glycosides (Non-Salicinoids) from Wood Chips of *Salix triandra* × *dasyclados* Hybrid Willow, *Molecules*, 2019, Vol. 24(6), pp. 1152.

<https://doi.org/10.3390/molecules24061152>

Powers M.D., Pregitzer K.S., Palik B.J., Websters C.R., Water relations of pine seedlings in contrasting overstory environments, *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 258(7), pp. 1442–1448.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.040>

Richards T.J., Karacic A., Apuli R.P., Weih M., Ingvarsson P.K., Rönnberg-Wästljung A.C., Quantitative genetic architecture of adaptive phenology traits in the deciduous tree, *Populus trichocarpa* (Torr. and Gray), *Heredity*, 2020, No. 125, pp. 449–458.

<https://doi.org/10.1038/s41437-020-00363-z>

Rodríguez M.E., Doffo G.N., Cerrillo T., Luquez V.M.C., Acclimation of cuttings from different willow genotypes to flooding depth level, *New Forests*, 2018, Vol. 49, pp. 415–427.

<https://doi.org/10.1007/s11056-018-9627-7>

Skvortsov A.K., *Willows of Russia and adjacent countries. Taxonomical and geographical revision*, Joensuu: University of Joensuu, 1999, 307 p.

Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M., Extensive Willow Biomass Production on Marginal Land, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, Vol. 28(6), pp. 4359–4367.

<https://doi.org/10.15244/pjoes/94812>

Weih M., Nordh N.-E., Manzoni S., Hoeber S., Functional traits of individual varieties as determinants of growth and nitrogen use patterns in mixed stands of willow (*Salix* spp.), *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 479, pp. 118605.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118605>

Wu D., Wang Y., Zhang L., Dou L., Gao L., The complete chloroplast genome and phylogenetic analysis of *Salix triandra* from China, *Mitochondrial DNA Part B*, 2019, Vol. 4(2), pp. 3571–3572.

<https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1674743>

Wu Q., Liang X., Dai X., Chen Y., Yin T., Molecular discrimination and ploidy level determination for elite willow cultivars, *Tree Genetics & Genomes*, 2018, Vol. 14, pp. 65.

<https://doi.org/10.1007/s11295-018-1281-x>

Zhang J., Yuan H., Li Y., Chen Y., Liu G., Ye M., Yu C., Lian B., Zhong F., Jiang Y., Xu J., Genome sequencing and phylogenetic analysis of allotetraploid *Salix matsudana* Koidz., *Horticulture Research*, 2020, Vol. 7, pp. 201.

<https://doi.org/10.1038/s41438-020-00424-8>

Zhu Y., Wang G., Li R., Seasonal Dynamics of Water Use Strategy of Two *Salix* Shrubs in Alpine Sandy Land, Tibetan Plateau, *PLoS ONE*, 2016, Vol. 11(5), pp. e0156586.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156586>

УДК 630*114

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И МЕТАНА В ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ОЛИГОТРОФНОГО ЛЕСНОГО БОЛОТА И ИХ ЭМИССИЯ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. Л. И. Инишева^а, *, М. А. Сергеева^а, А. В. Головченко^б, Б. В. Бабилов^с^аТомский государственный педагогический университет, ул. Киевская, д. 60, Томск, 634061 Россия^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 19991 Россия^сСанкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Институтский переулок, д. 5, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*E-mail: inisheva@mail.ru

Поступила в редакцию 12.06.2021 г.

После доработки 08.01.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Болотные и заболоченные территории лесопокрываемых площадей и открытых болот принимают совместное участие в глобальном цикле углерода. Им принадлежит важная роль в депонировании парниковых газов. В этой статье проанализирована многолетняя динамика концентрации парниковых газов CO_2 и CH_4 в торфяной залежи и их эмиссия на естественном и мелиорируемом олиготрофном болоте в южнотаежной зоне Западной Сибири. Показано, что значительная роль в динамике концентрации CO_2 и CH_4 в торфяной залежи принадлежит погодным условиям каждого месяца теплого периода, ботаническому составу, активности биохимических процессов, структуре и физико-механическим свойствам торфяной залежи. Выявлена внутризалежная, пространственная и временная динамика показателей концентрации парниковых газов. Доказано, что существуют многокомпонентные зависимости концентрации CO_2 и CH_4 от параметров внешних и внутризалежных условий. Определены параметры концентрации в торфяной залежи олиготрофного болота на малом заболоченном водосборе реки Ключ: экстремальные концентрации CO_2 составили 0.002–3.64 ммоль/дм³, CH_4 – 0.003–2.03 ммоль/дм³; значения удельных потоков варьировали по CO_2 в пределах от –22.2/ до 157.8 мг С/(м² ч), удельные потоки CH_4 были равны в экстремальных величинах –3.0/ – 5.3 мг С/(м² ч), потоки за теплый период по CO_2 составили 20–110 г С/(м² год), по CH_4 – 0.8–3.7 г С/(м² год). На объекте лесомелиорации выявлено незначительное увеличение активности удельных потоков CO_2 по сравнению с естественным болотом при близких концентрациях парниковых газов в торфяной залежи. Показано, что в условиях отсутствия эксплуатации осушительной системы наблюдается процесс повторного заболачивания. Из-за огромных площадей болот на Западно-Сибирской равнине и агрессивного характера процесса заболачивания предполагается проведение на территории ее таежной зоны умеренной и выборочной лесомелиорации.

Ключевые слова: Западная Сибирь, олиготрофное болото, торфяная залежь, лесомелиорация, мониторинг, парниковые газы, заболачивание.

DOI: 10.31857/S0024114823010060, **EDN:** NHLQDM

Лесное хозяйство является основным фондо-держателем болотных и заболоченных земель. К категории болото в лесном хозяйстве относят естественные участки с поверхностным слоем торфа мощностью не менее 30 и 20 см – на осушенных участках при отсутствии на ней древесной растительности или при наличии ее с высотой 0.3 и менее для молодняков и 0.2 – для других групп древесной растительности. Открытые болота относятся к категории нелесных земель, выделяемых отдельной строкой в материалах лесоустройства (Инструкция по ..., 1995). Около 22% лесного фонда страны заболочено. При оценке

степени и типа заболоченности во внимание берется не болото, а условия местопроизрастания и тип леса. Отраслевой характер учета площади болот, разная терминология приводят к неодинаковой оценке их площади (Торфяные болота ..., 2001). Вместе с тем выявление болотных и заболоченных участков лесопокрываемых площадей и открытых болот предполагает их совместное участие в глобальном цикле углерода, т. к. только дополнительное поглощение углерода из атмосферы растениями и последующее его депонирование в виде торфяной залежи и произрастающих на ней деревьев может компенсировать выбросы CO_2 и тем

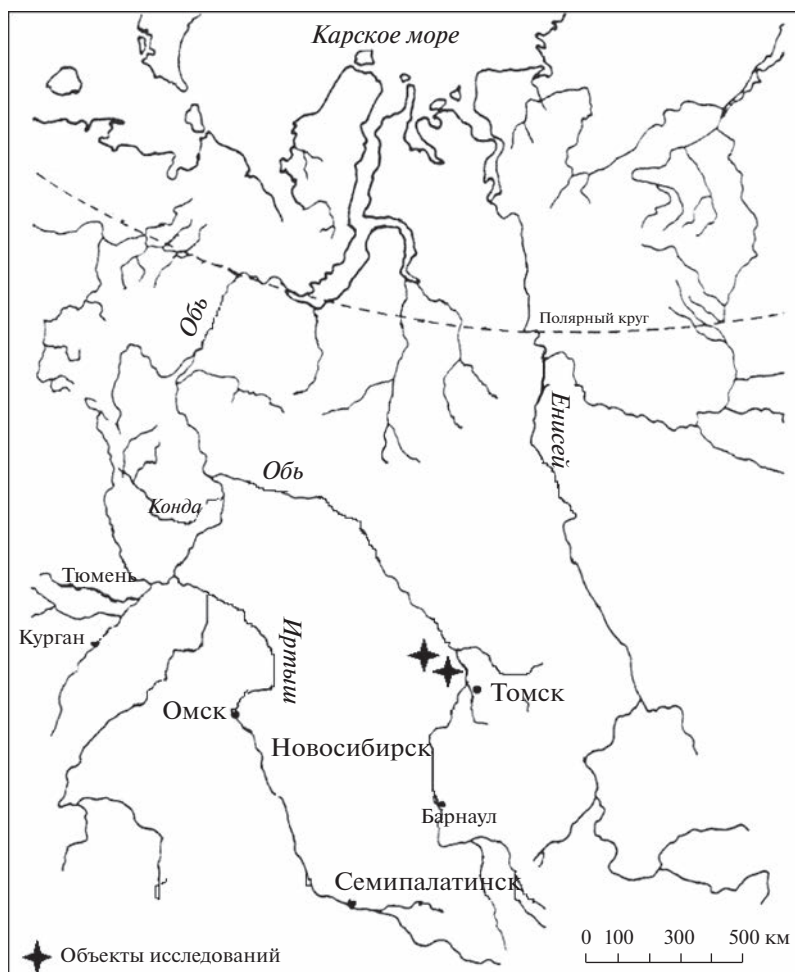


Рис. 1. Расположение объектов исследования.

самым оказать положительное влияние на климат. Этим вопросам ученые уделяют много внимания (Вомперский и др., 1999; Наумов, 2002; Карелин и др., 2014; Cardinael et al., 2017; Leroy et al., 2017; Cardinael et al., 2018; De Stefano, Jacobson, 2018; Бобрик и др., 2020; Кузнецова и др., 2020; Wiesmeier et al., 2020). По данным ученых (Romanovskaya et al., 2020), динамика нетто-поглощения и выбросов парниковых газов от управляемых экосистем на 60% в 1990 г. и на 80% в 2018 г. определялась углеродным бюджетом в лесах. Участники научных дебатов “Оценка поглощения парниковых газов лесами: мифы и реальность”, состоявшихся в марте 2021 г., отметили, что особое внимание должно быть уделено оценке динамики почвенного пула углерода, вклад которого в общие запасы углерода в лесах России составляет больше 50%, но к настоящему времени учтен явно недостаточно. Важно было бы уязвлять получаемые результаты ученых по экосистемам, независимо от их отраслевой разобщенности между собой, в рамках целостного описания углеродного функционирования экосистем России.

Целью данной работы было изучение концентрации парниковых газов в торфяной залежи естественного олиготрофного болота и формирование потоков углерода за теплый период в многолетнем цикле погодных условий.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в северо-восточной части Васюганского болота, располагающейся на территории южнотаежной зоны Западной Сибири (рис. 1). Наблюдения велись на 2-х участках: на естественном болоте в пределах малого заболоченного водосбора реки Ключ с олиготрофным типом торфяной залежи (ТЗ) (координаты пункта наблюдения $56^{\circ}58'23.02''$ с.ш., $82^{\circ}36'43.78''$ в.д.) и олиготрофном болоте – “5 участок Васюганского болота”, расположенном южнее естественного болота и частично освоенном под лесомелиорацию (координаты пункта наблюдения $56^{\circ}50'49.33''$ с.ш., $82^{\circ}53'41.91''$ в.д.).

Таблица 1. Характеристика торфяных залежей объектов исследования

Глубина, см	Малый водосбор реки Ключ			5 участок Васюганского болота		
	вид торфа	R/A ^c мас. %	pH солевой	вид торфа	R/A ^c мас. %	pH солевой
0–50	Фускум, В	0/3	3.5	Фускум, В	5/5	3.6
50–75	Фускум, В	5/2	3.5	Фускум, В	5/5	3.4
75–100	Медиум, В	5/2	4.0	Фускум, В	5/2	4.4
100–150	Медиум, В	10/2	4.2	Фускум, В	15/5	4.6
150–200	Сосново-пушицевый, П	50/6	6.0	Пушицево-сфагновый, П	25/9	5.6
200–250	Осоковый, Н	50/4	6.0	Древесно-пушицевый, П	30/12	6.3
250–300	Травяной, Н	55/5	6.0	Травяной, Н	50/13	6.3

Примечание. В – верховой тип торфа; П – переходный тип торфа; Н – низинный тип торфа; R – степень разложения, %; A^c – зольность, %.

Климат южнотаежной зоны Западной Сибири характеризуется холодной зимой, со значительным снежным покровом и довольно влажным, коротким, но теплым, а иногда и жарким летом (Коженкова, Рутковская, 1974). Среднемесячная температура воздуха января и июля служат показателем общих термических ресурсов территории, которая отличается сравнительно низким уровнем теплообеспеченности. По сравнению с аналогичной широтой европейской части России ресурсы тепла в Западной Сибири на 10–12% ниже. За теплый период выпадает более половины годовых осадков (329–412 мм). Для зимнего периода характерна холодная продолжительная зима. По нашим данным (Инишева, 2020), промерзание ТЗ на исследуемой территории зависит от микрорельефа. Так, на повышенных элементах глубина промерзания на верховом болоте может достигать 50 см, на пониженных – 35 см.

Растительность олиготрофного болота, располагающегося на заболоченном водосборе реки Ключ, относится к кустарничково-травяно-сфагновой ассоциации. Угнетенный древесный ярус представлен сосной обыкновенной (*Pinus silvestris* L. f. *Litwinowii*). Кустарничковый ярус развит обильно на микроповышениях и сложен багульником болотным (*Ledum palustre* L.), хамедафне прицветничковой (*Chamaedaphne calyculata* L.), подбелом обыкновенным (*Andromeda polifolia* L.) и голубикой обыкновенной (*Vaccinium uliginosum* L.). На вершинах кочек растет клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus*). Травяной ярус представлен куртинками пушицы влажалолюбивой (*Eriophorum vaginatum* L.), морошки (*Rubus chamaemorus* L.) и росянки круглолистной (*Drosera rotundifolia* L.). В моховом покрове на повышениях доминирует сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum* Klinggr. (95%)), на межкочковых понижениях встречаются сфагнум узколистный (*Sph. Angustifolium*) и сфагнум божественный (*Sph. Magellanicum*). Торфяная за-

лежь достигает мощности 3 м и с поверхности представлена фускум- и медиум-торфом мощностью 1.5 м. Далее идет слой сосново-пушицевого торфа переходного типа 0.4 м, который сменяется осоковым низинным торфом высокой степени разложения (50%) и мощностью 30 см (табл. 1). Возраст ТЗ на этой территории равен 5200 ± 180 14С лет BP (СО РАН 8041).

Объект “5 участок Васюганского болота” занимает площадь 18000 га. На территории в 4 тыс. га построена осушительная сеть под лесомелиорацию. Расстояние между каналами – 150 м, проектная норма осушения – 0.6 м. Фитоценоз аналогичен болоту на водосборе реки Ключ. Торфяная залежь мощностью 3.0 м представлена фускум-торфом до глубины 150 см. Далее следует сосново-пушицевый переходный слой торфа, который сменяется древесно-пушицевым и травяным низинным торфом. До глубины 1.0 м степень разложения постоянная – в пределах 5%, а далее она увеличивается до 50% на глубине 2.5 м. Возраст ТЗ – 5465 ± 140 14С лет (СО РАН–7646). Подстилающие породы на обоих объектах – глины с содержанием раковин пресноводных моллюсков, реакция среды от сильно кислой – в верховой залежи, до слабо кислой – в низинной.

На исследуемых объектах проводили наблюдения за стоком на оборудованном гидрометрическом посту, изучали уровни болотных вод (УБВ) каждую декаду месяца (Наставления ..., 1978). За нулевую отметку принимали условную отметку средней поверхности болотного ландшафта, за среднюю поверхность болота – поверхность, соответствующую отметке средней высоты элементов микрорельефа (Методические указания ..., 2011), положение уровня определяли как разность отметок репера и зеркала болотных вод. Для изучения водного режима отбирали пробы торфа до глубины УБВ еженедельно. Влажность, ботанический состав, степень разложения и pH солевой

вытяжки анализировали по книге “Технический анализ торфа” (1992). Датирование ТЗ выполнено на радиоуглеродной установке QUANTULUS-1220 (бензольно-сцинтилляционный вариант) в лаборатории геологии и палеоклиматологии кайнозоя Института геологии и минералогии СО РАН. Метеоусловия рассчитывали по данным, опубликованным на сайтах, — <http://meteocenter.net/> (2008–2012 гг.) и <http://aisori-m.meteo.ru/> (2013–2015 гг.).

Полевые исследования проводились 1–2 раза в месяц с мая по сентябрь. Концентрацию парниковых газов в ТЗ изучали “peepers”-методом. Прибор для определения концентрации диоксида углерода и метана в ТЗ был предоставлен Институтом геологии университета Невшателя (Steinmann, Shotyk, 1996). В качестве пробоотборников использовали камеры из оргстекла размером 30 × 40 мм, объемом 30 мл. Мембранный сульфоновый фильтр накладывали на боковую стенку камеры и фиксировали винтами. Камеру заполняли дистиллированной водой и закрывали мембранным сульфоновым фильтром со второй стороны. Соединенные между собой полыми пластиковыми трубками камеры опускали на всю глубину ТЗ с учетом ее стратиграфии. После 30 дней, необходимых для уравнивания газовой фазы ТЗ и камеры, их вынимали из ТЗ и из каждой камеры шприцом на 10 мл через полисульфоновый мембранный фильтр производили забор жидкости, которую переносили в равном объеме (5 мл) в 3 вакутейнера. В них же для прекращения микробиологической активности добавляли 2–3 капли HgCl₂, вакутейнеры помещали в коробку пробками вниз и доставляли в лабораторию. После дегазации отобранный из пробирок газ анализировали на газовом хроматографе “Кристалл 5000.1”.

Для измерения удельных потоков CO₂ и CH₄ первоначально использовали метод И.Н. Шаркова (Шарков, 2005), а в последующем — метод статических замкнутых камер. Экспозиционную камеру из оргстекла объемом 60.8 литра на время измерения устанавливали на стальное нержавеющее основание размером 37 × 37 см, которое предварительно заглубляли в торф на 10 см. Герметизация системы достигалась с помощью гидрозатвора. Циркуляцию воздуха в камере осуществляли с помощью встроенного вентилятора (Naumov, Smolentseva, 2013). Вентилятор был постоянно подключен к аккумулятору. Во время экспозиции камеры накрывали теплоизоляцией с ламинированной отражающей фольгой. После проветривания камеры приступали к измерению. Сразу же после установки камер отбирали первую пробу в шприц, вставленный в трубку пробоотборника — газообразные трубки длиной 0.5 м (предварительно шприцем прокачивали воздух 3–5 раз за 6–10 с). Отбор газовых проб производили шприцем (объем 20 мл). Время экспозиции

составляет 30–60 мин с отбором контрольных проб через 10–15 мин. Через 30 мин последовательно отбирали пробы во второй и третий вакутейнеры. Пробы анализировали в лаборатории на газовом хроматографе “Кристалл-5000.1”. Потоки углерода рассчитывали за теплый период с мая по сентябрь. Все лабораторные исследования проводили в аккредитованной лаборатории Томского государственного педагогического университета (РОСС RU.0001.516054) и в ЦКП ТГУ “Аналитический центр геохимии природных систем”. Данные анализировали при помощи пакета программ Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Болото на малом заболоченном водосборе реки Ключ. Исследования на олиготрофном болоте малого водосбора выполняли в летние периоды 2004–2013 гг. При характеристике погодных условий использовали комплексный показатель — гидротермический коэффициент (ГТК) по Г.Т. Селянинову, представляющий отношение суммы осадков за период с температурой выше 10°C к испаряемости, выраженной суммой температуры за этот же период, уменьшенной в 10 раз. Репрезентативность этого показателя хорошо обоснована в работах М.И. Будыко (1974). За восьмилетний период исследований 2 года относились к средним годам за теплый период — 2004, 2007 гг., ГТК которых — 1.3–1.6. Два года (2005 и 2011 гг.) с ГТК 1.8–2.1 характеризовались как увлажненные. Экстремально сухих лет за период наблюдений не было отмечено. К относительно сухим годам принадлежали 4 года (2006, 2010, 2012, 2013 гг.) с ГТК 0.8–1.2. Пределы колебаний УБВ относительно средней поверхности болота за период исследований были равны 13 см при среднем квадратическом отклонении 4 см и коэффициенте вариации 2.47, амплитуда колебаний составила 20–/–30/ см. Влажность верхнего полуметрового слоя ТЗ поддерживалась в пределах 0.8–1.0 полной влагоемкости, в нижних слоях — на уровне полной влагоемкости.

Концентрация парниковых газов в торфяных залежах. Мониторинг концентрации CO₂ и CH₄ в 3-х метровой ТЗ олиготрофного болота водосбора реки Ключ показал, что, несмотря на разность погодных условий, средние значения концентрации CO₂ в ТЗ колебались по годам в небольших пределах 0.2–2.6 ммоль/дм³ (при экстремальных значениях 0.002–3.64 ммоль/дм³) и CH₄ — 0.1–1.5 ммоль/дм³ (при экстремальных — 0.003–2.03 ммоль/дм³). Повышенные концентрации CO₂ в ТЗ отмечались на протяжении 3 лет (с 2005 по 2007 гг. с ГТК соответственно 1.8–0.9 и 1.3), а высокие значения средних концентраций CH₄ в ТЗ (до 1.5 ммоль/дм³) — в среднемноголетнем по ГТК 2004 г. Эти данные

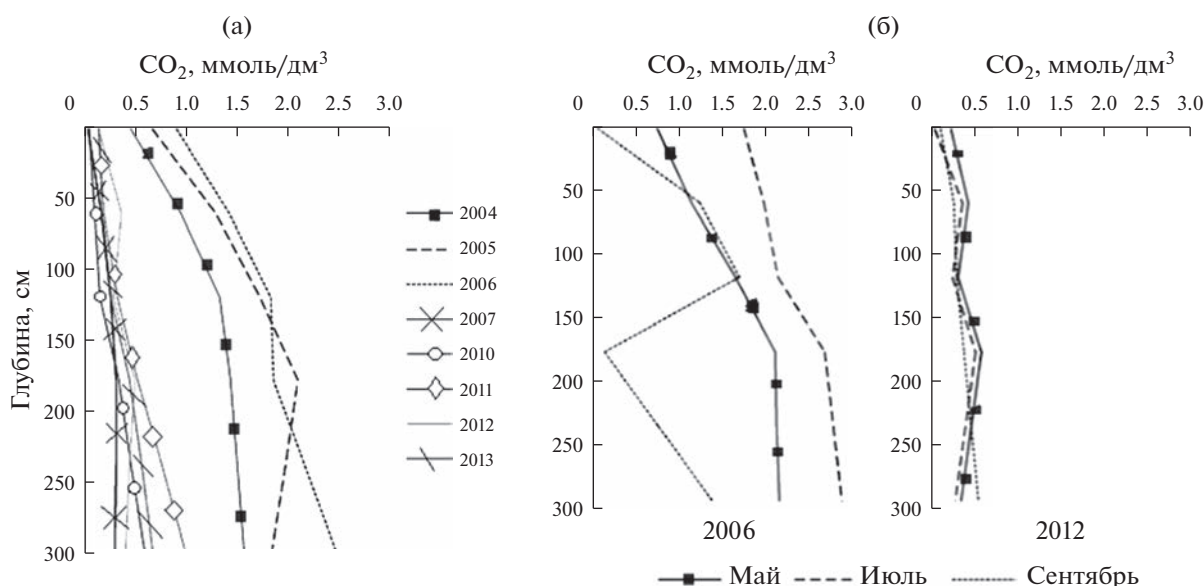


Рис. 2. Динамика концентрации CO₂ в торфяной залежи (а) по годам, в среднем за теплый период; (б) в сухие годы, ммоль/дм³.

свидетельствуют о том, что в разные по гидротермическим условиям теплые периоды концентрации парниковых газов в ТЗ характеризуются небольшим интервалом их значений. Аналогичные результаты были получены и другими исследователями. Так, в работах А.В. Наумова (Наумов, 1994, 2002) было показано, что концентрация CO₂ в ТЗ олиготрофного типа на территории южнотажной зоны Западной Сибири варьировала от 0.12 до 3.16 ммоль/дм³, а другими авторами для этой же территории (Махов и др., 1999) определено, что концентрация CO₂ в олиготрофных торфяных болотах изменялась в пределах 0.04–1.98 ммоль/дм³, а CH₄ – в пределах 0.1–3.0 ммоль/дм³. Таким образом, многолетние исследования с разными погодными условиями подтвердили тот же диапазон изменения концентрации парниковых газов в олиготрофной ТЗ, что и в разовых определениях других исследователей, это свидетельствует о пространственной их однородности и, возможно, определяется практически постоянно переувлажненным характером территории.

Представляет интерес рассмотреть динамику концентраций CO₂ по глубине ТЗ в средних значениях за теплый период исследования (рис. 2а). Интервал значений концентраций CO₂ в ТЗ был в пределах 0.01–2.5 ммоль/дм³. Увеличение концентрации CO₂ вниз по глубине ТЗ происходило практически во все годы исследований и в основном на 2-х глубинах. Граничным слоем, где отмечалось увеличение концентраций CO₂, можно обозначить слой 150–200 см (смена залежи верхового типа на переходную) и также на глубине –

200 см (смена переходной залежи на низинную). И только в 2005 г. (ГТК 1.8) при первоначальном увеличении концентрации CO₂ от поверхности ТЗ вниз, с глубины 150–200 см, концентрация CO₂ к подстилающим породам снизилась. Можно объяснить это исключение из общей закономерности очень влажным летним периодом, но во влажный 2011 год с ГТК 2.1 отмечаемое снижение концентрации по ТЗ к подстилающим породам не повторилось. Возможно, этот факт объясняется неодинаковым распределением ГТК по месяцам этих лет. В 2005 г. наиболее влажным оказался сентябрь (ГТК 4.1), когда отмечалось снижение температуры в ТЗ, а также активности вегетации растений. Это могло послужить причиной чрезмерной увлажненности ТЗ и привести к снижению активности биохимических процессов, продуцирующих CO₂, в то время как в 2011 г. практически аналогичный ГТК (3.9) был в августе, создавая лучшие условия для активности биохимических процессов.

Перейдем к обсуждению динамики CO₂ в ТЗ за 2 относительно сухих года – 2006 (ГТК 0.9) и 2012 (ГТК 0.8), погодные условия которых довольно редко отмечаются в условиях переувлажненной территории Западной Сибири (рис. 2б). В 2012 г. динамика концентрации CO₂ в ТЗ за май–сентябрь была практически монотонной и в небольших пределах – от 0.1 до 0.5 ммоль/дм³, и только в сентябре отмечалось небольшое увеличение к подстилающим породам. В 2006 г., в мае–июле, в ТЗ прослеживались синхронные изменения концентрации CO₂ по глубине ТЗ с изменением направления в сторону ее увеличения в слое

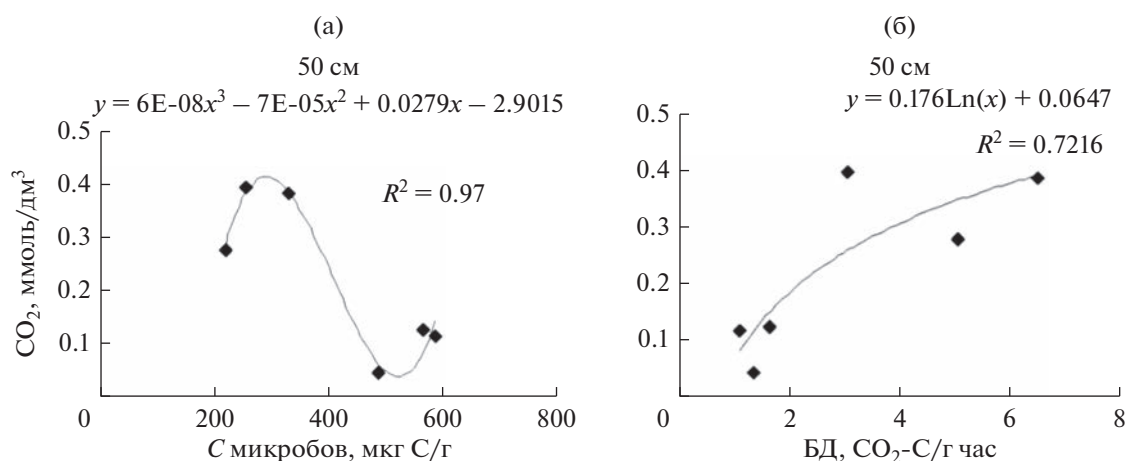


Рис. 3. Зависимость концентрации CO₂ от (а) активности микробной биомассы и (б) активности базального дыхания (БД) в слое 0–50 см торфяной залежи за вегетационный период.

150–200 см. При этом концентрации CO₂ в июле увеличивались до 2.0–2.6 ммоль/дм³, что значительно выше по сравнению с аналогичным по погодным условиям 2012 г. Динамика концентрации CO₂ в сентябре также имела свои особенности. Она менялась, в отличие от мая и июля, дважды: в слое 100–150 см и 200–250 см. Проведенный анализ выявил пульсирующий вид динамики концентрации CO₂ в ТЗ. Аналогичная закономерность отмечалась и в другие годы.

Известно, что ТЗ является сложным объектом по изменчивости свойств. Неравномерное распределение CO₂ по глубине, вероятнее всего, можно объяснить разным строением ТЗ не только на типовом, но и на видовом уровне (см. табл. 1). Так, в придонном слое (250–300 см) преобладает папоротник – 35%, в слое 200–250 см на папоротник приходится только 5%, а преобладающим растением является осока – 35%. Переходный тип торфа в ТЗ представлен сосной – 25% и сфагнумом разного вида – 35%, верховой торф на 90% состоит из сфагнума. Торфяная залежь по составу растений существенно варьирует, и ботанический состав каждого слоя вносит коррективы в формирование ее структуры, определяя динамику газового состава. Заметим, что основу торфа составляют высокомолекулярные продукты распада и растительные остатки твердых высокополимеров целлюлозной природы. Часть растений образует структуры переплетения. Индивидуальные вещества органической и минеральной составляющих создают в торфе надмолекулярные комплексы. В результате в ТЗ образуются структуры разной компактности, проницаемые и трудно проницаемые для молекул воды и ионов, что оказывает влияние на формирование в ТЗ индивидуального газового состава.

Подводя итог, отметим, что разные погодные условия отдельных месяцев теплого периода оказывают влияние на динамику CO₂ в ТЗ. Можно также констатировать, что определяющим фактором является ботанический состав торфов, слагающих ТЗ, физико-механические свойства ТЗ и активность микробиологических процессов. Так, в процессе корреляционного анализа в слое 0–50 см ТЗ выявлена зависимость концентрации CO₂ от содержания микробной биомассы, которая аппроксимировалась параболой третьего порядка (коэффициент детерминации R^2 выше 0.97 при $F = 22.89 > F_{\text{таб}} 19.16$), а также от интенсивности базального (микробного) дыхания. Эта зависимость представлена логарифмическим уравнением регрессии с коэффициентом детерминации $R^2 0.72$, $F = 10.36 > F_{\text{таб}} 6.26$ (рис. 3), что свидетельствует о сложности происходящих процессов в ТЗ и необходимости их изучения. Пока мы только можем констатировать, что эта связь нелинейного порядка.

Отмечаемая выше закономерность в динамике концентрации CO₂ в ТЗ прослеживается и на графиках по CH₄ (рис. 4). Изменение концентрации CH₄ так же, как и в случае с CO₂, происходило на границе смены типа ТЗ – 100–150 см и 150–200 см. Поверхностные слои ТЗ характеризовались, как правило, отсутствием CH₄, что отмечается и другими исследователями (Nilsson, Bohlin, 1993; Neyer et al., 2002; Joosten et al., 2016).

Далее рассмотрим динамику CH₄ в ТЗ за 2 относительно сухих летних периода (рис. 4). В 2006 г. наибольшие значения концентраций CH₄ наблюдались в нижнем слое ТЗ. В 2012 г. концентрация CH₄ в ТЗ была примерно в 1.5 раза меньше по сравнению с 2006 г., но, начиная с глубины 100–150 см и до подстилающих пород, происходило

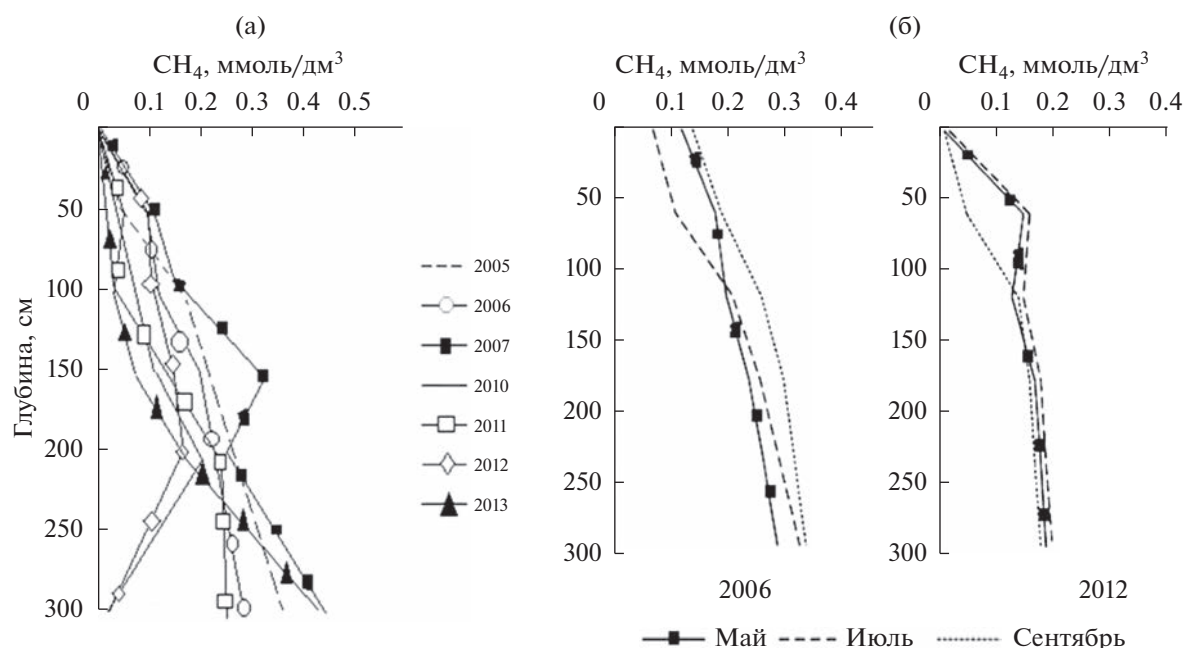


Рис. 4. Динамика концентрации CH_4 в торфяной залежи (а) по годам в среднем за теплый период; (б) в сухие годы, mmol/dm^3 .

незначительное синхронное увеличение концентрации CH_4 за рассматриваемые месяцы теплого периода. Возможно, погодные условия на концентрацию CH_4 в ТЗ также не оказывают решающего влияния, что отмечалось и в динамике CO_2 в ТЗ. Сложность процессов, происходящих в ТЗ болот разного генезиса и разной стратиграфии, далеко не всегда подтверждает выстраиваемые исследователями гипотезы. Например, предполагается образование CO_2 в поверхностных аэробных слоях ТЗ, но в наших исследованиях в разные годы CO_2 обнаруживался и в анаэробной части ТЗ. Или образование CH_4 считается облигатно анаэробным процессом, но он присутствовал в отдельных случаях и в поверхностном аэробном слое ТЗ, что наблюдалось и другими авторами (Romanowicz et al., 1995; Eilrich, 2002). Это привлекло внимание и объединило результаты наблюдений парниковых газов по всей глубине ТЗ. В результате подтвердилась линейная зависимость между концентрациями CH_4 и CO_2 по всей ТЗ ($R^2 = 0.69$), в то время как аналогичные зависимости, построенные между слоями по тем же наблюдениям, показывали прямую зависимость до глубины 150 см, ниже — обратную между концентрациями CH_4 и CO_2 в верхних и нижних слоях ТЗ. Это можно объяснить сдвижкой (запаздыванием) по времени образования парниковых газов на более низких глубинах под воздействием, прежде всего, температуры и сопутствующих процессов.

Также отметим тот факт, что на глубине 250–300 см в ТЗ отмечалась высокая положительная

корреляционная связь между CH_4 и температурой до глубины 60 см, а также с УБВ ($-0.5/-0.8$). И если корреляция между CH_4 и температурой вполне объясняется влиянием температуры на активность метаногенов, то проявление связи между УБВ у поверхности с активностью метаногенов на такой глубине пока трудно понять, что предполагает дальнейшие исследования.

Эмиссия парниковых газов. В качестве интегральных параметров, характеризующих функциональное состояние процессов в ТЗ, рассмотрим эмиссию парниковых газов за годы исследований. Экстремальные значения удельных потоков CO_2 в ТЗ олиготрофного болота водосбора реки Ключ изменялись от -22.2 до 157.8 $\text{mg C}/(\text{m}^2 \text{ ч})$ (табл. 2). Средние значения были ближе к экстремальному максимуму, за исключением 2011 г., в который весной происходило поглощение CO_2 , а по среднему значению удельные потоки приближались к экстремальному нижнему пределу.

Высокие показатели удельных потоков CO_2 отмечались в разные по тепло- и влагообеспеченности годы 2005–2007 гг. В мае наблюдалась активизация эмиссии CO_2 , и это особенно было заметно в 2006 г. Высокие значения удельных потоков CO_2 регистрировались и в сентябре. В середине теплого периода наступала стабилизация активности эмиссии независимо от ГТК месяца, что совпадает с результатами работ других авторов (Головацкая, 2021).

Таблица 2. Удельные потоки CO₂, (числитель) и CH₄ (знаменатель), мг С/(м² ч)

ГТК/Год	Месяц					CO ₂	CH ₄
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	экстремумы среднее	экстремумы среднее
1.6/2004	38.9/4.2	53.5/2.4	68.1/1.2	95.2/2.7	32.9/5.3	32.9–95.2 57.7 ± 11.2	1.2–5.3 3.1 ± 0.7
1.8/2005	99.0/3.5	51.3/3.4	77.0/2.2	95.3/4.1	110.0/4.1	51.3–110.0 86.5 ± 10.3	2.2–4.1 3.5 ± 0.4
0.9/2006	157.8/3.0	100/2.5	49.6/2.1	113.3/2.2	146.0/3.3	49.6–157.8 113.4 ± 19.1	2.1–3.3 2.6 ± 0.2
1.3/2007	99.0/3.5	88.0*/2.8*	77.0/2.2	93.5*/3.1*	110.0/4.1	77.0–110.0 95.3 ± 9.7	2.2–4.1 3.3 ± 0.6
2.1/2011	–22.2/–3.0	42.7/1.9	31.2/2.1	—	16.3/1.1	–22.2–42.7 17 ± 14.1	–3.0–2.1 0.5 ± 0.1
0.8/2012	47.4/1.6	—	14.6/3.4	—	10.1/1.3	10.1–47.4 24.0 ± 11.8	1.3–3.4 2.1 ± 0.7
1.2/2013	3.9/1.3	—	29.3/2.8	—	31.7/2.1	3.9–31.7 21.6 ± 8.9	1.3–2.8 2.1 ± 0.4

Примечание. “—” — не определяли, “±” — доверительный интервал, * — величина эмиссии получена расчетным путем.

Экстремальные пределы значений удельных потоков CH₄ за сезон колебались от /–3.0/ до 5.3 мг С/(м² ч). В мае влажного 2011 г. происходило поглощение метана и отмечались низкие значения эмиссии CH₄. Предполагается, что в условиях высокой влагообеспеченности процесс метаногенеза должен быть активнее, однако это не проявилось в исследованных ТЗ. В целом динамика эмиссии CH₄ на олиготрофном болоте характеризовалась равномерным распределением во все теплые периоды с небольшим снижением в июле, в отличие от четко выраженного сезонного хода эмиссии CH₄, отмечаемого исследователями (Kankaala et al., 2007; Bohn et al., 2007; Дюкарев и др., 2020). Так, в работе Е.Э. Веретенниковой и Е.А. Дюкарева (2019) показано, что сезонная динамика удельных потоков метана характеризуется июльским максимумом.

Есть основания полагать, что невысокие значения эмиссии метана на исследуемой территории определяются постоянно переувлажненным ее состоянием за период исследований с гидротермическими коэффициентами, преобладающие близкими к среднегодовым значениям. Экстремально влажные и экстремально сухие годы бывают здесь крайне редко, и сложно предположить реакцию образования эмиссионных потоков парниковых газов в условиях, например, повышения температуры в атмосфере. Нельзя не отметить тот факт, что в ТЗ формируется самостоятельная газовая фаза, обусловленная кинетическими особенностями биохимических процессов.

Скорость биогенной газогенерации обычно выше, чем интенсивность потенциальной диффузии в жидкой среде, поэтому создаются условия локального превышения порога растворимости газов и их скопления в виде самостоятельной физической фазы. Поэтому образующиеся внутри ТЗ парниковые газы могут достаточно интенсивно распространяться в ней в различных направлениях, не выходя в атмосферу, что способствует их временной аккумуляции в составе сплошной воздушной фазы, а также в растворенном и адсорбированном виде (Смагин, 2007).

Потоки углерода за теплый период. За все теплые периоды лет исследований потоки CO₂ не превышали 110 г С/(м² год), а минимальное его значение было равно 18 г С/(м² год). Самые высокие значения потоков CO₂ отмечены в 2004–2006 гг., разные по тепло- и влагообеспеченности (соответственно 58, 88, 110, 97 г С/(м² год)). И невысокие значения потоков CO₂, которые не превышали 20 г С/(м² год), были в 2011–2013 гг.

Экстремальные величины потока CH₄ за весь период исследований колебались в пределах 0.8–3.7 г С/(м² год). Более высокие значения потоков CH₄ за теплый период наблюдались в среднегодовые годы (2004, 2005, 2007, соответственно 3.2, 3.7, 3.4 г С/(м² год). Во влажный 2011 г. было выделено только 0.8 г С/(м² год), а в относительно сухие 2012 и 2013 гг. — по 2.0 г С/(м² год), в то время

Таблица 3. Удельные потоки CO_2 на мелиорируемом болоте, $\text{мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$

Год, ГТК	Месяц					Поток углерода за V–IX, $\text{г C}/(\text{м}^2 \text{ год})$
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	
2001, 1.3	29.3 ± 4.6	25.3 ± 5.9	62.7 ± 8.9	216.7 ± 21.6	36.8 ± 9.0	73.4
2003, 0.8	137.5 ± 25.5	90.4 ± 12.6	84.3 ± 4.8	86.1 ± 13.3	57.4 ± 7.6	89.7
2004, 1.6	41.2 ± 8.4	68.2 ± 8.7	84.7 ± 12.5	71.5 ± 11.8	55.0 ± 8.4	62.6
2005, 1.8	145.2 ± 18.9	154.0 ± 31.1	64.9 ± 11.2	93.5 ± 11.2	45.0 ± 6.9	98.8

как для особо обводненных участков этой территории некоторые авторы указывают годовые значения потоков CH_4 в пределах $10\text{--}20 \text{ г C}/(\text{м}^2 \text{ год})$, из них на зимние периоды приходится не более 3% от общей годовой эмиссии (Nadeshina et al., 2011; Шнырев, 2016).

“5 участок Васюганского болота”, освоенный под лесомелиорацию. На мелиорируемом объекте приведем исследования эмиссии CO_2 с 2001 по 2005 гг. как интегрального параметра процессов в ТЗ. Влажность поверхностного слоя $0\text{--}30 \text{ см}$ колебалась от 0.8 до 0.95 полной влагоемкости. По тепловлагообеспеченности особо выделялся 2003 г., когда ГТК был равен 0.8, УБВ опустились ниже обычного — до $-60/ \text{ см}$ и влажность уменьшилась по сравнению с естественным олиготрофным болотом до границы 80% полной влагоемкости.

Эмиссия CO_2 . Значения удельного потока CO_2 на участке с лесомелиорацией варьировали в пределах $25.3\text{--}216.7 \text{ мг C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$ (табл. 3), что значительно выше, чем на болоте водосбора реки Ключ (от $-22.2/$ до $157.8 \text{ мг C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$). Если сравнить удельные потоки за среднегодовое время, например 2004 г., то с мая по сентябрь на болоте водосбора они были равны 38.9, 53.5, 68.1, 95.2, $32.9 \text{ мг C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$, что меньше в 1.2 раза по сравнению с мелиорируемым болотом. Например, удельный поток CO_2 во влажный 2005 г. был существенно выше по сравнению с болотом на водосборе, особенно выделялись высокими значениями (145.2 и $154.0 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) май и июнь, которые были выше соответственно в 1.4 и 3.0 раза. В целом в этот год эффект осушения на величину удельного потока CO_2 , проявлялся в наибольшей степени (в 1.2–2.4 раза был выше) по сравнению с естественным болотом на водосборе. Но и в относительно сухой 2003 г. удельные потоки CO_2 в среднем оставались высокими за теплый период.

Отсюда можно сделать вывод, что на объекте лесомелиорации активность эмиссии CO_2 была выше по сравнению с олиготрофным болотом на водоразделе реки Ключ.

Потоки углерода за теплый период. На объекте лесомелиорации величина потока CO_2 за летние

периоды 2004 и 2005 гг. была равна 62.6 и 98.8 или в среднем — $80.7 \text{ г C}/(\text{м}^2 \text{ год})$, что выше лишь в 1.16 раз по сравнению с естественным болотом на водоразделе (табл. 3). Таким образом, в отдельные месяцы на мелиорируемом болоте активность эмиссии CO_2 была выше по сравнению с болотом на водоразделе реки Ключ.

Углеродный баланс на олиготрофном болоте. В этой статье приведем также обобщенные результаты из ранее выполненных нами исследований (Inisheva, Golovatskaya, 2002; Инишева, 2020). Изучение первичной продуктивности (NPP), которая рассчитывалась как сумма надземной и подземной продукции (Титлянова, 1988; Головацкая 2009), эмиссии парниковых газов и выноса углерода болотными водами показало, что общий расход углерода в олиготрофном болоте малого водосбора реки Ключ ($169.8 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$) уступает уровню фотосинтетической нетто-аккумуляции ($230.4 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$ (средние значения за весь период наблюдений)). Большая часть потерь углерода обусловлена потоком CO_2 (в среднем $69 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$ или около 30% от NPP) и CH_4 , доля которого значительно меньше (в среднем $2.2 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$ или 0.9% NPP). Определенный экспериментально вынос углерода болотными водами, содержащими растворенный углерод, ГК и ФК, составляет 3.0% NPP ($6.9 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$). Итого ($230.4 - 69.0 - 2.2 - 6.9 = 152.3 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$), получаем — $152.3 \text{ г C}/\text{м}^2 \text{ год}$. Известно, что положительный баланс углерода свидетельствует об интенсивно протекающем процессе болотообразования, нулевой — о сбалансированности системы, отрицательный — о разрушении болота. В нашем случае можно сделать вывод о преобладании процесса аккумуляции углерода в ТЗ и прогрессирующем в настоящее время торфообразовательном процессе на олиготрофном болоте малого водосбора реки Ключ.

На объекте лесомелиорации “5 участок Васюганского болота” чистая первичная продукция (NPP) изменялась в пределах от 123 до 675 и в среднем значении была равна $260 \text{ г C}/(\text{м}^2 \text{ год})$. Потоки углерода из ТЗ в виде CO_2 достигали в среднем значении $80.7 \text{ г C}/(\text{м}^2 \text{ год})$, значение потока CH_4 использовали из данных естественного олиготрофно-

го болота — 2.2 г С/(м² год), потери углерода с болотными водами не превышали 2.8% NPP, составляя в сумме 7.3 г С/(м² год). Отсюда следует, что в углеродном балансе в ТЗ мелиорируемого болота преобладает аккумуляция углерода (260.0 — 80.7 — 2.2 — 7.3 = 140.2 г С/(м² год) и, соответственно, на исследуемом мелиорируемом олиготрофном болоте в современный период также отмечается прогрессирующее заболачивание. Таким образом, в условиях южнотаежной зоны Западной Сибири проведение лесомелиорации на олиготрофном болоте 60 лет назад в настоящее время показывает незначительное ее влияние на гидрологический и углеродный режим мелиорируемой территории, который близок к естественному состоянию, что свидетельствует о повторном заболачивании этой территории в условиях отсутствия эксплуатации осушительной системы. Например, к 1980 г. в Томской области были выполнены работы по осушительным мелиорациям открытыми каналами на площади 15 тыс. га. В настоящее время они практически все переувлажнены.

В последние годы отмечается четкая тенденция усиления трансгрессии болот на леса, например, на северо-западе России (Кузьмин, 1993). Современное заболачивание в большой степени обусловлено и разрушением созданных ранее лесосоосушительных систем. Согласно В.К. Константинову (2000), лесосоосушительные системы на северо-западе России были построены в этом регионе на площади более 4 млн га, однако вторичному заболачиванию к настоящему времени подверглось не менее 1 млн га.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в торфяной залежи олиготрофного генезиса имеет место пространственная (горизонтальная), внутризалежная и временная вариабельность концентрации CO₂ и CH₄. Разные погодные условия, выраженные в ГТК за теплый период, не являются определяющим показателем для динамики парниковых газов. Надо полагать, что значительная роль в его динамике принадлежит сочетанию погодных условий отдельных месяцев, ботаническому составу, который стимулирует биохимические процессы, физико-механическим свойствам торфяной залежи и другим факторам, что подтверждается, например, статистическим расчетом корреляционных связей между эмиссией парниковых газов, температурой и микробиологическими параметрами. Полученные знания свидетельствуют о сложности происходящих процессов и необходимости дальнейшего изучения факторов, влияющих на углеродный баланс в болотах.

В торфяной залежи олиготрофного болота на малом заболоченном водосборе реки Ключ за

многолетний период определены концентрации парниковых газов: экстремальные концентрации CO₂ составили 0.002–3.64 ммоль/дм³, CH₄ — 0.003–2.03 ммоль/дм³; удельные потоки изменялись по CO₂ в пределах от /–22.2/ до 157.8 мг С/(м² ч), по CH₄ были равны в экстремальных величинах /–3.0/ – 5.3 мг С/(м² ч), суммарные потоки углерода за теплый период по CO₂ составили 20–110 г С/(м² год), по CH₄ — 0.8–3.7 г С/(м² год). Расчет углеродного баланса показал наличие прогрессирующего заболачивания олиготрофного болота на современный период.

На олиготрофном болоте, на объекте мелиорации “5 участок Васюганского болота”, удельные потоки CO₂ характеризовались значениями от 25.3 до 216.7 мг С/(м² ч) и суммарными потоками за теплый период — от 62.6 до 98.8, при среднем значении 80.7 г С/(м² год).

Расчет углеродного баланса подтвердил тот факт, что в настоящее время на мелиорируемом олиготрофном болоте в условиях отсутствия эксплуатации осушительной системы отмечается повторное заболачивание, приближающее его к естественному состоянию.

Вместе с тем, учитывая огромные площади болот на Западно-Сибирской равнине и агрессивный характер процесса заболачивания, положительным приемом на ее территории, было бы проведение умеренной и выборочной лесомелиорации. Это решило бы две задачи региона: социальную — улучшение условий жизни населения, экологическую — снижение скорости заболачивания и комплексное депонирование органического углерода на территории Западной Сибири, а также регион в перспективе мог бы быть крупным заготовительным районом страны, что планировали ученые в 80–90 е годы (Гольдин, 1976; Ефремов, 1987).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И., Тимофеева М.В. Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1328–1340.
- Будыко М.И. Изменения климата. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 280 с.
- Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. Эмиссия метана с поверхности верховых болот Западной Сибири // Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу. Томск: Аграф – Пресс, 2019. С. 162–163.
- Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Валяева Н.А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // Глобальные изменения природной среды и климата. М.: Изд-во РАН, 1999. С. 124–145.

- Головацкая Е.А. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири // Журн. Сибирского федерального университета. Биология. 2009. Т. 2. № 1. С. 38–53.
- Головацкая Е.А. Биогеохимические циклы углерода в болотных экосистемах // Материалы 19-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 431.
- Гольдин Д.И. Развитие лесосоушительных работ в Томской области // Теория и практика лесного болотоведения и гидрореселиорации. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР. 1976. С. 113–119.
- Дюкарев Е.А., Сабреков А.З., Глазов М.В., Киселев М.В., Филиппов И.В., Лапшина Е.Д. Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными экосистемами Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа // Избранные труды Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 2020. С. 177–180.
- Ефремов С.П. Пионерные древостои осушенных болот. Новосибирск: СО РАН, 1987. 248 с.
- Инишева Л.И. Закономерности функционирования болотных экосистем в условиях воздействия природных и антропогенных факторов. Томск: ТГПУ, 2020. 482 с.
- Инструкция по проведению лесоустройства в лесном фонде России. Ч. 1. М.: Изд-во ВНИИЦлесресурс ФС ЛХ России, 1995. 174 с.
- Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
- Коженкова З.П., Рутковская Н.В. Климат Томской области и его формирование // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1974. Т. 6. С. 3–36.
- Константинов В.К. Гидрореселиоративная энциклопедия. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 275 с.
- Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Смирнов В.Э., Данилова М.А., Тебенькова Д.Н., Браславская Т.Ю., Кузнецов В.А., Ткаченко Ю.Н., Геникова Н.В. Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России // Почвоведение. 2020. № 8. С. 959–969.
- Кузьмин Г.Ф. Болота и их использование // Сборник научных трудов НИИ торфяной промышленности. СПб, 1993. 140 с.
- Махов Г.А., Бажин Н.М., Ефремова Т.Т. Эмиссия метана из болот междуречья рек Оби и Томи // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. № 2. С. 619–622.
- Методические указания по расчетам стока с осушенных и осушенных болот // М-во природ. ресурсов и экологии РФ; Федер. Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Санкт-Петербург: Петербургский модный базар, 2011. 150 с.
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 384 с.
- Наумов А.В. К вопросу об эмиссии углекислого газа и метана из болотных почв южного Васюганья // Сибирский экологический журн. 1994. № 3. С. 269–274.
- Наумов А.В. Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири // Сибирский экологический журн. 2002. № 3. С. 313–318.
- Смагин А.В. Абиотическое поглощение газов органическими почвами // Почвоведение. 2007. № 12. С. 1482–1488.
- Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 358 с.
- Титлянова А.А. Продуктивность травяных экосистем // Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: Наука, 1988. С. 109–127.
- Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. А.А. Сирина и Т.Ю. Минаевой. М.: ГЕОС, 2001. 190 с.
- Шарков И.Н. Абсорбционный метод определения эмиссии CO₂ из почв // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия: ГНУ ВНИПТИОУ, 2005. С. 401–407.
- Шнырев Н.А. Режимные наблюдения и оценка газообмена на границе почвы и атмосферы (на примере потоков метана стационара среднетаежной зоны Западной Сибири “Мухрино”): автореф. дис. ... кандидата биологических наук: 06.01.03. М., 2016. 26 с.
- Bohn T.J., Lettenmaier D.P., Sathulur K., Bowling L.C., Podest E., McDonald K.C., Friborg T. Methane emissions from western Siberian wetlands: heterogeneity and sensitivity to climate change // Environmental Research Letters. 2007. V. 2. № 4.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045015>
- Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Beral C., Barthes B.G., Dupraz C., Durand C., Kouakoua E., Chenu C. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France // Agric. Ecosyst. Environ. 2017. V. 236. P. 243–255.
- Cardinael R., Umulisa V., Toudert A., Olivier A., Bockel L., Bernoux M. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. № 12. P. 124020.
- De Stefano A., Jacobson M.G. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis // Agroforestry Systems. 2018. V. 92. № 2. P. 285–299.
- Eilrich B. Formation and transport of CH₄ and CO₂ in deep peatlands: Presentee a la Faculte des Sciences de l'Universite de Neuchatel (Suisse) pour l'obtention du grade de Docteurs es Sciences. 2002. P. 168.
- Heyer J., Berger U., Kuzin I.L., Yakovlev O.N. Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period // Tellus B. 2002. V. 54. Issue 3. P. 231–249.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2002.01280.x>
- Inisheva L.I., Golovatskaya E.A. Elements of carbon balance in oligotrophic bogs // Russian J. Ecology. 2002. V. 33. № 4. P. 242–248.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation // Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Cambridge University Press. 2016. P. 66–79.
- Kankaala P., Taipale S., Jones R.I., Nykanen H. Oxidation, efflux, and isotopic fractionation of methane during autumnal turnover in a polyhumic, boreal lake // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. № 2.

Leroy F., Gogo S., Guimbaud C., Bernard-Jannin L., Hu Z., Laggoun-Defarge F. Vegetation composition controls temperature sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions and DOC concentration in peatland // *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. V. 107. P. 164–167.

Nadeshina E.D., Molkentin E.K., Kiselev A.A., Semioshina A.A., Shkolnic I.M. Investigation of parameterization effect on the methane flux estimation from the regional climate model of the main geophysical observatory for the territory of Russia // *Russia Meteorology and Hydrology*. 2011. 36. № 6. P. 371–382.

Naumov A.V., Smolentseva E.N. Estimation of carbon dioxide exchange of cascade geochemically conjugated steppe ecosystems in salinity condition. // *Steppe ecosystems: biological diversity, management and restoration*. Chapter 7. Nova Science Publishers. N.Y. 2013. P. 153–163.

Nilsson M., Bohlin E. Methane and Carbon Dioxide Concentrations in Bogs and Fens – with Special Reference to

the Effects of the Botanical Composition of the Peat // *J. Ecology*. 1993. V. 81. № 4. P. 615–625.

Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Yu., Karaban R.T. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020. V. 25. № 4. P. 661.

Romanowicz E.A., Siegel D.I., Chanton J.P., Glaser P.H. Temporal variations in dissolved methane deep in the Lake Agassiz Peatlands, Minnesota // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. № 9. P. 197–212.

Steinmann Ph., Shoty W. Sampling anoxic pore water in peatlands using “peepers” for in situ-filtration // *Fresenius J. Analytical Chemistry*. 1996. V. 354. P. 709–713.

Wiesmeier M., Mayer S., Paul C., Helming K., Don A., Franko U., Steffens M., Kögel-Knabner I. CO₂ certificates for carbon sequestration in soils: methods, management practices and limitations // *BonaRes Series*. 2020. № 4. P. 1–23. <https://doi.org/10.20387/BonaRes-NE0G-CE98>

Carbon Dioxide and Methane Distribution in Peat Deposits of an Oligotrophic Forest Swamp in Western Siberia and Their Emission

L. I. Inisheva^{1, *}, M. A. Sergeeva¹, A. V. Golovchenko², and B. V. Babikov³

¹*Tomsk State Pedagogical University, Kiyevskaya st. 60, Tomsk, 634061 Russia*

²*Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

³*Saint-Petersburg Forestry Universit, Institutskiy ln., 5, Saint-Petersburg, 194021 Russia*

*E-mail: inisheva@mail.ru

Swamps and wetlands of forested areas, as well as the non-forest swamps are jointly involved in the global carbon cycle. They play an important role in depositing the greenhouse gases. This article analyses the long-term dynamics of the greenhouse gases (CO₂ and CH₄) concentration in a peat deposit and their emission in a natural and reclaimed oligotrophic bog in the southern taiga zone of Western Siberia. It was found that a significant role in the CO₂ and CH₄ concentration dynamics in the peat deposits belongs to the weather conditions of each month of the warm period, the botanical composition and the activity of biochemical processes, as well as the structure and physical and mechanical properties of a peat deposit. Also identified were the intra-deposit, spatial and temporal dynamics of the greenhouse gases concentrations' indicators. It has been proven that there are multicomponent dependences of CO₂ and CH₄ concentrations on the parameters of external and intra-deposit conditions. The concentrations' parameters in the oligotrophic bog's peat deposit from the swampy catch basin of the Klyuch river were determined as follows: extreme concentrations of CO₂ were 0.002–3.64 mmol/dm³, extreme concentrations of CH₄ were 0.003–2.03 mmol/dm³; the CO₂ normalised fluxes varied from –22.2/ to 157.8 mg C/(m² · h), the CH₄ normalised fluxes' extreme values were equal –3.0/–5.3 mg C/(m² · h), the CO₂ fluxes for the warm period were 20–110 g C/(m² · year), the CH₄ fluxes for the warm period were 0.8–3.7 g C/(m² · year). At the forest reclamation site, a slight increase in the CO₂ normalised fluxes activity was revealed compared to a natural swamp, while the greenhouse gases' concentrations in the peat deposit were found to be comparable in both cases. It was shown that in the absence of an operating drainage system, the process of re-bogging occurs. Due to the vast areas of the West Siberian Plain's swamps and the aggressive nature of the bogging process, moderate and selective forest reclamation is suggested for its taiga zone.

Keywords: Western Siberia, oligotrophic swamp, peat deposit, forest reclamation, monitoring, greenhouse gases, bogging.

REFERENCES

Bobrik A.A., Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Makarov M.I., Timofeeva M.V. Spatial distribution of the components of carbon cycle in soils of forest ecosystems of the northern, middle, and southern taiga of Western

Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 11, pp. 1549–1560.

Bohn T.J., Lettenmaier D.P., Sathulur K., Bowling L.C., Podest E., McDonald K.C., Friborg T., Methane emissions from western Siberian wetlands: heterogeneity and sensitivity to climate change, *Environmental Research Letters*, 2007,

Vol. 2, No. 4.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045015>

Budyko M.I., *Izmeneniya klimata* (Climate change), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 280 p.

Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Beral C., Barthes B.G., Dupraz C., Durand C., Kouakoua E., Chenu C., Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2017, Vol. 236, pp. 243–255.

Cardinael R., Umulisa V., Toudert A., Olivier A., Bockel L., Bernoux M., Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems, *Environ. Res. Lett.*, 2018, Vol. 13, No. 12, pp. 124020.

De Stefano A., Jacobson M.G., Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis, *Agroforestry Systems*, 2018, Vol. 92, No. 2, pp. 285–299.

Dyukarev E.A., Sabrekov A.Z., Glagolev M.V., Kiselev M.V., Filippov I.V., Lapshina E.D., Otsenka emissii i pogloshcheniya parnikovykh gazov bolotnymi ekosistemami Neft'yuganskogo raiona Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga (Estimation of emission and absorption of greenhouse gases by wetland ecosystems of the Neft'yugansky district of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug), In: *Izbrannyye trudy Mezhdunarodnoi konferentsii i shkoly molodykh uchennykh po izmereniyam, modelirovaniyu i informatsionnym sistemam dlya izucheniya okruzhayushchei sredy* (Selected abstract of International conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information System), Tomsk, 2020, pp. 177–180.

Efremov S.P., *Pionernyye drevostoi osushennykh bolot* (Pioneer stands of drained swamps), Novosibirsk: SO RAN, 1987, 248 p.

Eilrich B., *Formation and transport of CH₄ and CO₂ in deep peatlands*: Presentee a la Faculte des Sciences de l'Universite de Neuchatel (Suisse) pour l'obtention du grade de Docteurs es Sciences, 2002, 168 p.

Gol'din D.I., Razvitiye lesoosushitel'nykh rabot v Tomskoi oblasti (Development of forest drainage works in the Tomsk region), In: *Teoriya i praktika lesnogo bolotovedeniya i gidrolesomeliatsii* (Theory and practice of forest swamp science and hydroforest reclamation), Krasnoyarsk: Institut lesa i drevesiny im. V.N. Sukacheva SO AN SSSR, 1976, pp. 113–119.

Golovatskaya E.A., Biogeokhimicheskie tsikly ugleroda v bolotnykh ekosistemakh (Biogeochemical cycles of carbon in swamp ecosystems), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Modern problems of remote sensing of the Earth from space), Proc. of 19 International Conf., Moscow: IKI RAN, pp. 431.

Golovatskaya E.A., Biologicheskaya produktivnost' oligotrofnyykh i evtrofnyykh bolot yuzhnootaeynoi podzony Zapadnoi Sibiri (Biological productivity of oligotrophic and eutrophic mires in the southern taiga of Western Siberia), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2009, Vol. 2, No. 1, pp. 38–53.

Heyer J., Berger U., Kuzin I.L., Yakovlev O.N., Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period, *Tellus B*, 2002, Vol. 54, Issue 3, pp. 231–249.

<https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2002.01280.x>

Inisheva L.I., Golovatskaya E.A., Elements of carbon balance in oligotrophic bogs, *Russian J. Ecology*, 2002, Vol. 33, No. 4, pp. 242–248.

Inisheva L.I., *Zakonomernosti funktsionirovaniya bolotnykh ekosistem v usloviyakh vozdeystviya prirodnnykh i antropogennykh faktorov* (Special features of mire ecosystems functioning under the influence of natural and anthropogenic factors), Tomsk: TGPU, 2020, 482 p.

Instruktsiya po provedeniyu lesoustroistva v lesnom fonde Rossii (Instructions for conducting forest management in the forest fund of Russia), Moscow: Izd-vo VNIITslesresurs FS LKh Rossii, 1995, Part 1, 174 p.

Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P., The role of peatlands in climate regulation, In: *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*, Cambridge University Press, 2016, pp. 66–79.

Kankaala P., Taipale S., Jones R.I., Nykanen H., Oxidation, efflux, and isotopic fractionation of methane during autumnal turnover in a polyhumic, boreal lake, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, No. 2.

Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitsarskii M.L., Factors of spatiotemporal variability of CO₂ fluxes from soils of southern taiga spruce forests of Valdai, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 743–751.

Konstantinov V.K., *Gidrolesomeliativnaya entsiklopediya* (Agroforestry reclamation encyclopedia), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000, 275 p.

Kozhenkova Z.P., Rutkovskaya N.V., Klimat Tomskoi oblasti i ego formirovanie (The climate of the Tomsk region and its formation), In: *Voprosy geografii Sibiri* (Issues of the geography of Siberia), Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 1974, Vol. 6, pp. 3–36.

Kuz'min G.F., Bolota i ikh ispol'zovanie (Wetlands and their use), In: *Sbornik nauchnykh trudov NII torfyanoi promyshlennosti* (Collection of scientific papers of the Research Institute of the peat industry), Saint Petersburg, 1993, pp. 140.

Kuznetsova A.I., Lukina N.V., Gornov A.V., Gornova M.V., Tikhonova E.V., Smirnov V.E., Danilova M.A., Teben'kova D.N., Braslavskaya T.Yu., Kuznetsov V.A., Tkachenko Yu.N., Genikova N.V., Carbon stock in sandy soils of pine forests in the West of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 8, pp. 1056–1065.

Leroy F., Gogo S., Guimbaud C., Bernard-Jannin L., Hu Z., Laggoun-Defarge F., Vegetation composition controls temperature sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions and DOC concentration in peatland, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, Vol. 107, pp. 164–167.

Makhov G.A., Bazhin N.M., Efremova T.T., Emissiya metana iz bolot mezhdurech'ya rek Obi i Tomi (Emission of methane from swamps between the rivers Ob and Tom), *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, 1999, No. 2, pp. 619–622.

Metodicheskie ukazaniya po raschetam stoka s neosushennykh i osushennykh bolot (Guidelines for calculating runoff from non-drained and drained swamps), Saint Petersburg: Peterburgskii modnyi bazar, 2011, 150 p.

Nadeshina E.D., Molkentin E.K., Kiselev A.A., Semioshina A.A., Shkolnic I.M., Investigation of parameterization effect on the methane flux estimation from the regional climate model of the main geophysical observatory for the ter-

- ritory of Russia, *Russia Meteorology and Hydrology*, 2011, 36, No. 6, pp. 371–382.
- Nastavleniya gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam*, (Instructions for hydrometeorological stations and posts), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, Vol. 6, 384 p.
- Naumov A.V., K voprosu ob emissii uglekislogo gaza i metana iz bolotnykh pochv yuzhnogo Vasyugan'ya (On the Issue of Carbon Dioxide and Methane Emissions from Bog Soils in the Southern Vasyugan Region), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1994, No. 3, pp. 269–274.
- Naumov A.V., Smolentseva E.N., Estimation of carbon dioxide exchange of cascade geochemically conjugated steppe ecosystems in salinity condition, In: *Steppe ecosystems: biological diversity, management and restoration*. Chapter 7, Nova Science Publishers, N.Y., 2013, pp. 153–163.
- Naumov A.V., Uglekislyi gaz i metan v pochvakh i atmosfere bolotnykh ekosistem Zapadnoi Sibiri (Carbon Dioxide and Methane in Soils and Atmosphere of Wet Ecosystems of Western Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2002, No. 3, pp. 313–318.
- Nilsson M., Bohlin E., Methane and Carbon Dioxide Concentrations in Bogs and Fens – with Special Reference to the Effects of the Botanical Composition of the Peat, *J. Ecology*, 1993, Vol. 81, No. 4, pp. 615–625.
- Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Yu., Karaban R.T., Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation, In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, Vol. 25, No. 4, pp. 661–687.
- Romanowicz E.A., Siegel D.I., Chanton J.P., Glaser P.H., Temporal variations in dissolved methane deep in the Lake Agassiz Peatlands, Minnesota, *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, No. 9, pp. 197–212.
- Sharkov I.N., Absorbtsionnyi metod opredeleniya emissii CO₂ (The absorption method of determination of CO₂ emission), In: *Metody issledovaniy organicheskogo veshchestva pochvy* (Methods for the study of soil organic matter), Moscow: Rossel'khozakademiya, GNU VNIPTIOU, 2005, pp. 401–408.
- Shnyrev N.A., *Rezhimnye nablyudeniya i otsenka gazoobmena na granitse pochvy i atmosfery (na primere potokov metana statsionara srednetaezhnoi zony Zapadnoi Sibiri "Mukhrino")*. Avtoref. diss. kand. biol. nauk (Regime Observations and Evaluation of Gas Exchange at the Soil-Atmosphere Boundary (by the Example of Methane Fluxes at the Mukhrino Station in the Middle Taiga Zone of Western Siberia)), Moscow, 2016, 26 p.
- Smagin A.V., Abiotic uptake of gases by organic soils, *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40, No. 12, pp. 1326–1331.
- Steinmann Ph., Shotyk W., Sampling anoxic pore water in peatlands using “peepers” for in situ-filtration, *Fresenius J. Analytical Chemistry*, 1996, Vol. 354, pp. 709–713.
- Tekhnicheskii analiz torfa* (Peat technical analysis), Moscow: Nedra, 1992, 358 p.
- Titlyanova A.A., Produktivnost' travyanykh ekosistem (Productivity of grass ecosystems), In: *Biologicheskaya produktivnost' travyanykh ekosistem. Geograficheskie zakonomernosti i ekologicheskie osobennosti* (Biological productivity of grass ecosystems. Geographic patterns and ecological features), Novosibirsk: Nauka, 1988, pp. 109–127.
- Torfyanye bolota Rossii: k analizu otraslevoi informatsii* (Peatlands of Russia: supplementary information to the sectoral analysis), Moscow: GEOS, 2001, 190 p.
- Veretennikova E.E., Dyukarev E.A., Emissiya metana s poverkhnosti verkhovykh bolot Zapadnoi Sibiri (Methane emission from the surface of high bogs in Western Siberia), *Trinadtsatoe Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu* (The Thirteenth Siberian Conference and the School of Young Scientists on Climate and Environmental Monitoring), Abstracts of the Russian Conf., Tomsk: Agraf – Press, pp. 162–163.
- Vomperskii S.E., Tsyganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A., Zabolochennost' territorii Rossii kak faktor svyazyvaniya atmosfernogo ugleroda (Bogginess of the territory of Russia – the factor of atmospheric carbon fixation), In: *Krugovorot ugleroda na territorii Rossii* (Carbon cycle on the territory of Russia), Moscow: Minnauki Rossii, 1999, pp. 124–144.
- Wiesmeier M., Mayer S., Paul C., Helming K., Don A., Franko U., Steffens M., Kögel-Knabner I., CO₂ certificates for carbon sequestration in soils: methods, management practices and limitations, *BonaRes Series*, 2020, No. 4, pp. 1–23.
- <https://doi.org/10.20387/BonaRes-NE0G-CE98>

УДК 630*114.351(470.343)

ОСОБЕННОСТИ ПОДСТИЛОК В ПОЙМЕННЫХ ЛЕСАХ ЗАПОВЕДНИКА “БОЛЬШАЯ КОКШАГА”

© 2023 г. А. В. Исаев^{а, *}, Ю. П. Демаков^{а, б}

^аГосударственный природный заповедник “Большая Кокшага”,
ул. Воинов-Интернационалистов, д. 26, Йошкар-Ола, 424038 Россия

^бПоволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000 Россия

*E-mail: avsacha@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

После доработки 29.11.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Актуальность исследований, проведенных в пойменных экотопах заповедника “Большая Кокшага” (Россия, Республика Марий Эл), обусловлена необходимостью познания закономерностей формирования свойств лесных подстилок, являющихся чутким интегральным индикатором состояния биогеоценозов. В работе, проведенной на 23 пробных площадях, расположенных в разных частях поймы, оценена, кроме основных физико-химических показателей, масса подстилки, ее фракционный состав и сезонная динамика, а также запасы углерода в ней. Установлено, что масса подстилки на объектах исследования снижалась за вегетационный период от 20 до 33% ее величины в конце мая. Основная потеря ее массы отмечалась в первой половине лета. Вариабельность физико-химических параметров подстилки, особенно ее кислотности, степени насыщенности основаниями, содержания обменного кальция, а также подвижных соединений фосфора и калия, обусловлена в основном особенностями экотопов, а их сезонные изменения оказались статистически незначимыми. Определено, что наибольшие различия между экотопами отмечаются по массе подстилки и запасам в ней углерода. Содержание подвижного калия и обменного кальция наиболее велико в подстилке биотопов центральной части поймы, а золы и подвижного фосфора – прирусловой зоны. Менее всего различаются между собой экотопы по кислотности подстилок и степени насыщенности основаниями. Показано, что масса и запас углерода в подстилке в пойменных лесах значительно ниже, чем в приводораздельных насаждениях, что связано с ее частичным выносом во время половодья, наиболее сильно выраженным в прирусловых экотопах. У подстилок в пойменных экотопах, по сравнению с приводораздельными, значительно ниже также значения кислотности, зольности, суммы обменных оснований и содержание подвижного калия. Они превосходят подстилки сосняков лишайниковых и мшистых лишь по содержанию подвижного фосфора.

Ключевые слова: заповедник “Большая Кокшага”, пойменные биогеоценозы, подстилка, параметры, вариабельность, причины.

DOI: 10.31857/S0024114823010072, **EDN:** NJNZVS

Лесные подстилки, являющиеся продуктом жизнедеятельности и чутким интегральным индикатором состояния биогеоценозов, относятся к их специфической мезострате, выполняющей важные экологические функции, поэтому не случайно почвоведы уделяют очень много внимания их изучению. Несмотря на то, что к настоящему времени накоплен довольно обширный материал по их составу и особенностям формирования в различных биогеоценозах (Мелехов, 1957; Молчанов, 1960; Кошелев, 1961; Шакиров, 1964; Смирнов, 1967; Смольянинов, 1969; Габеев, 1972; Карпачевский, 1973, 1981; Дылис и др., 1975; Сапожников, 1984, 1987; Дылис, 1985; Попова, Горбачев, 1988; Богатырёв, Щенина, 1989; Богаты-

рёв, 1990, 1996; Сабиров, 1996; Ушакова, 1999; 2000; Аткина, Аткин, 2000; Рыжкова, 2003; Богатырёв и др., 2004, 2019; Пуряев, Газизуллин, 2011; Демаков и др., 2013, 2015, 2017), многие вопросы остаются пока слабо освещенными и дискуссионными. Особенно недостаточно изучены подстилки в пойменных лесах, почвенный покров которых характеризуется значительной вариабельностью (Виленский, 1955; Добровольский, 1968; Фаткуллин, 1968; Максимов, 1974; Миркин, 1974; Шаталов и др., 1984; Браславская, 2004; Исаев, 2008), обусловленной комплексным воздействием большого числа биогеоценотических и гидрологических факторов. Подстилка является также одним из звеньев содержания органическо-

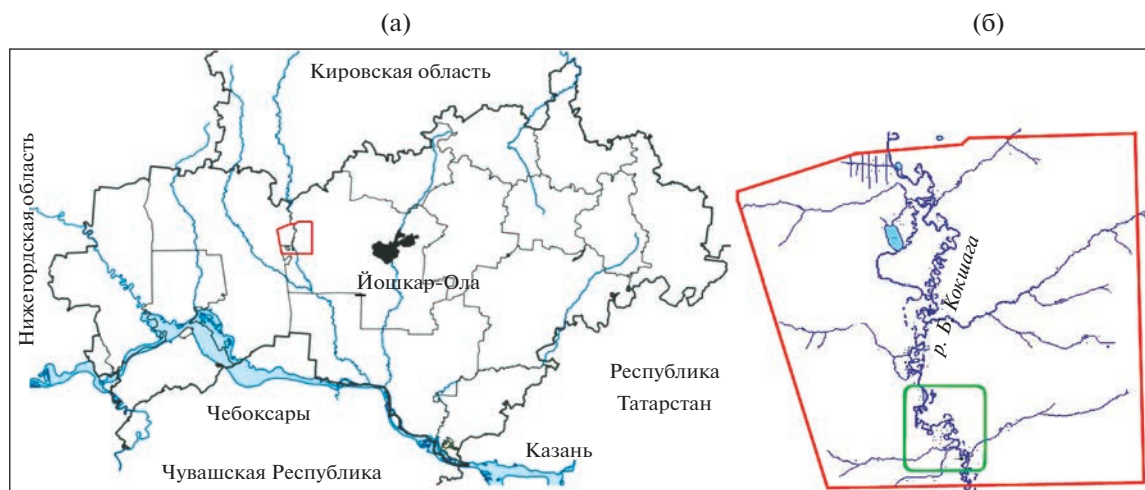


Рис. 1. Расположение заповедника “Большая Кокшага” на территории Республики Марий Эл (а) с указанием мест отбора проб почвы (б), выделенных зеленым квадратом.

го вещества в лесных экосистемах и потому обязательно должна учитываться при моделировании и прогнозе в них потоков углерода. Целью работы было выявление особенностей формирования лесных подстилок в пойменных экотопах заповедника “Большая Кокшага”. Она предусматривала решение следующих задач: 1) определить значения физико-химических показателей лесных подстилок в экотопах на разном удалении от русла реки и на участках поймы с различными типами русловых процессов; 2) изучить фракционный состав подстилки и сезонную динамику ее свойств; 3) оценить углерододепонирующую роль лесных подстилок в пойменных экотопах. Полученные данные можно использовать при ведении экологического мониторинга лесов и оценке их углерододепонирующих функций.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследования явились лесные подстилки, сформировавшиеся в пойме среднего течения реки Большая Кокшага в пределах территории одноименного заповедника (рис. 1), который расположен в умеренном климатическом поясе атлантико-континентальной области центрального агроклиматического района Республики Марий Эл (Агроклиматические ресурсы ..., 1972). В тектоническом отношении он находится на восточной окраине Русской платформы в пределах Волго-Уральской антеклизы и Чебоксарского прогиба (Васильева, 1979). На территории заповедника, лесистость которой составляет 96%, преобладают аккумулятивные формы рельефа, представленные речными долинами и зандровыми равнинами. В пойменных лесах доминируют дубово-липовые фитоценозы с примесью вяза, осины, березы и ольхи черной (Исаев, 2008).

Почвенный покров пойм представлен аллювиальными (Fluvisols) дерновыми, луговыми поверхностно-оглееными, перегнойно-глеевыми и иловато-торфяными почвами (Классификация и диагностика ..., 1977).

Работы проведены в экотопах с различными типами русловых процессов, где на двух трансектах заложено 23 пробных площади (ПП), на каждой из которых проведено описание растительности и проведены замеры мощности подстилки. Ее образцы для проведения лабораторного анализа брали, как это предусмотрено соответствующими методиками (Смирнов, 1958; Карпачевский, 1977), с помощью шаблона размером 20 × 20 см в 5-кратной повторности способом конверта. Затем в лаборатории их тщательно перемешивали между собой и формировали сводный образец, который высушивали до воздушно-сухого состояния. Подстилку разделяли на четыре основные фракции (листва/хвоя, ветки, кора и прочее), дополнительно на трех ПП изучали сезонную динамику ее параметров, отбирая для этого на каждой из них 15 образцов три раза за вегетационный период: в конце мая, после половодья, в середине июля и в сентябре, перед массовым листопадом.

Анализ стандартных физико-химических параметров образцов подстилок, классификация которых дана согласно рекомендациям Л.Г. Богатырева (1990), проводили по общепринятым методикам (Аринушкина, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1985) в лаборатории Центра коллективного пользования Поволжского государственного технологического университета. Полученный цифровой материал обработан на ПК с использованием программы Statistika-6.0 общепринятыми методами математической статистики.

Таблица 1. Влияние особенностей экотопов на мощность лесной подстилки

Номер ПП	Тип руслового процесса	Часть поймы	Расстояние от русла, м	Тип почвы*	Уровень грунтовых вод, см	Состав древостоя	Мощность подстилки, см	
1	Побочневый	Прирусловая	5	ЛПО	100	Луг	1.0	
2			17	ЛПО	180	8Д2Лп + В, Ос	1.8	
3		Центральная	30	ЛПО	45	Луг	3.5	
4			50	ДС	230	8Д2Лп + Б, В	0.8	
5	Меандриро- вание	Притеррасная	115	ЛПО	130	9Д1Лп, ед. Б	1.9	
21		Прирусловая	7	ДС	>200	Ивняк	0.0	
22			10	ДС	>200	Луг	0.0	
23			25	ДС	>200	Ивняк с крушиной	1.0	
24			70	ДС	120	Луг	0.7	
25			85	ДС	>200	7Лп3Д, ед. В	1.4	
27		Центральная	140	ДС	>200	7Д3В, ед. Лп	1.8	
6			120	ДО	260	7Е2Д1Лп + Б, П	2.0	
7			200	ЛПО	>230	6Д4Лп, ед. Е, В, Б	1.6	
8			290	ЛПО	180	9Лп1Ос, ед. Д, В	1.6	
29			320	ЛПО	>200	7Д3Лп, ед. В	2.1	
33			570	ЛПО	190	Луг	1.0	
34			620	ПГ	90	9Ол1В + Д	2.5	
35			650	ЛПО	90	7Д2Лп1В + Ол	4.0	
39			Притеррасная	850	ЛОП	120	3Д3Лп3Е1Ос + П	3.5
40				1000	ЛОП	128	5Ос3Лп1Е1Д, ед. Б	3.0
43				1160	ЛОП	105	6Б3Е1Ос, ед. Лп	4.0
44				1340	ПГ	60	7Б2Ол1В, ед. Д	2.3
45				1400	ЛПО	105	6Е4Б	4.0

* Примечание. ДС — дерновая слоистая, ДО — дерново-оподзоленная, ПГ — перегнойно-глеевая ЛПО — луговая поверхностно-оглеенная, ЛОП — луговая оподзоленная поверхностно-оглеенная.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние геоморфологических факторов на особенности формирования лесной подстилки. Исследования показали, что тип руслового процесса оказывает значительное влияние на формирование лесной подстилки только в прирусловой части поймы, а в центральной и притеррасной ее частях оно не проявляется. На небольшом удалении от русла реки, где фитоценозы представлены преимущественно злаками и зарослями кустарниковых ив, подстилка практически отсутствует, но образуется маломощный органоминеральный горизонт из свежего аллювия и остатков трав (табл. 1). Подстилка в этой части поймы наблюдается только под пологом дубово-липовых древостоев и состоит из одного горизонта, представленного прошлогодним опадом, четко отграниченного от слоя гумуса. Классифицировать такую подстилку можно как деструктивную, средне- и

сильносопряженную, примитивную, очень маломощную, листовенную.

В центральной части поймы свойства подстилки во многом определяются растительностью и почвенно-грунтовыми условиями, которые здесь довольно неоднородны. Наименьшая ее мощность отмечается на хорошо дренированных участках, занятых дерновыми слоистыми почвам легкого гранулометрического состава (ПП 4). В луговых сообществах формируется деструктивная, сильносопряженная, примитивная, очень маломощная, травяная подстилка, а под пологом дубово-липовых древостоев на луговых поверхностно-оглеенных почвах тяжелого гранулометрического состава — ферментативно-гумифицированная, сильносопряженная, примитивная, очень маломощная, листовенная. На болотных иловато-глеевых почвах с близким залеганием УГВ (90 см) под такими же древостоями образуется перегнойная, слабосо-

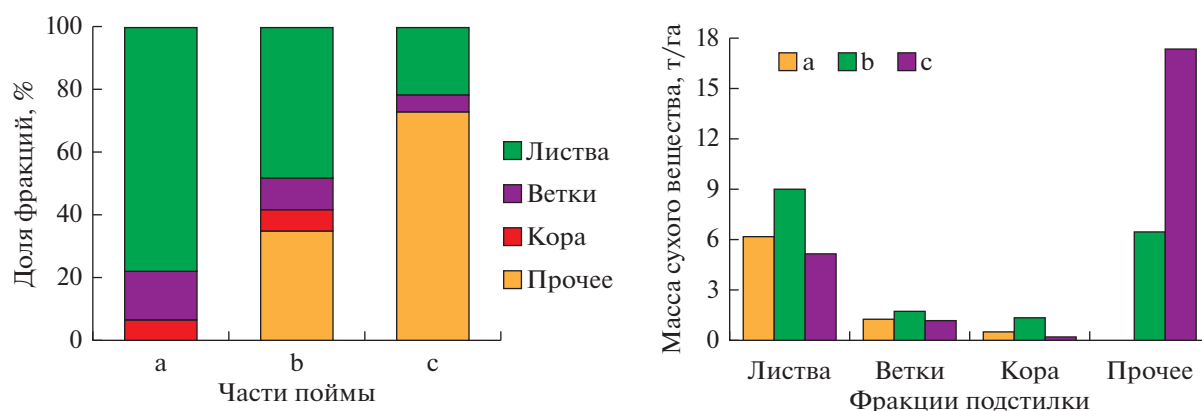


Рис. 2. Фракционная структура и масса лесных подстилок, сформировавшихся в различных частях поймы реки: а – прирусловой, б – центральной, с – притеррасной.

пряженная, субпримитивная, очень маломощная, листовенная лесная подстилка мощностью до 4 см с отчетливо выделяющимися двумя горизонтами: прошлогодним опадом мощностью 1 см, хорошо сохранившим морфоструктуру, и последующим слоем из перегнивших остатков, перемешанных с минеральной частью почвы, в котором встречаются в основном крупные ветви и кора деревьев. Переход подстилки в нижележащий гумусовый горизонт плавный.

В притеррасной части поймы образуется перегнойная, среднесопряженная, субпримитивная, маломощная, хвойно-лиственная подстилка с двумя горизонтами: деструктивным из прошлогоднего опада мощностью от 0.5 до 1.0 см и последующим перегнойным мощностью 2.5–3.5 см, представленным хорошо разложившимися остатками органики, перемешанными с минеральной частью почвы, который обильно пронизан корнями растений, что говорит об интенсивном вовлечении химических элементов в биологический круговорот. Собственно, гумусовый горизонт выделить в большинстве случаев невозможно, поскольку подстилка постепенно переходит в органоминеральный горизонт мелкокомковатой структуры, который подстилается переходным оподзоленным горизонтом. В некоторых экотопах этой части поймы формируется однослойная подстилка ферментативно-гумифицированного типа мощностью всего 1.9 см.

Фракционный состав и масса лесных подстилок каждого биотопа сугубо специфичен и зависит в основном от состава древостоя. В подстилках прирусловой и центральной частей поймы доминирует активная фракция (листва, мелкие ветви $d < 0.5$ см, семена растений), доля которой изменяется от 63 до 94% (рис. 2). В притеррасной же части поймы преобладает фракция трухи, т.е. органики, потерявшей свою первоначальную структуру и залегающей в нижнем гумифицированном гори-

зонте лесной подстилки. Масса листвы в опаде наиболее велика в биотопах центральной части поймы. Масса неактивной фракции, включающей крупные ветки, шишки, кору, наивысших значений достигает также в этих биотопах, где в составе древостоя часто встречается сухостой и значительная доля хвойных пород. Масса же трухи максимальных значений достигает в притеррасной части поймы, где темпы эрозионно-аккумулятивных процессов очень низкие.

Сезонная динамика параметров лесной подстилки. За вегетационный период масса лесных подстилок в пойменных биогеоценозах снижается в экотопах от 20 до 33% ее величины в конце мая. Основная потеря массы отмечается в первой половине лета (рис. 3), что связано с более высокой деятельностью грибов и мезофауны, а также растительности, выделяющей в этот период максимальное количество экзометаболитов, способствующих разложению опада. Вариабельность же физико-химических параметров подстилки, особенно ее кислотности, степени насыщенности основаниями, содержания обменного кальция, а также подвижных соединений фосфора и калия, обусловлена в основном особенностями экотопов, а сезонные их изменения статистически незначимы (табл. 2). Так, к примеру, зольность подстилки в ельнике черемухово-липовом (ПП 6) и липняке крапиво-страусниковом (ПП 8) изменялась за сезон очень слабо (на 2.5–3.5%), а в дубняке же липово-крапивном (ПП 7) – в 2.4 раза, достигнув максимума в середине лета. Максимум величины гидролитической кислотности в ельнике черемухово-липовом отмечался в середине лета, в дубняке липово-крапивном – в конце сезона, а в липняке крапиво-страусниковом – в его начале. Наиболее кислой реакцией обладает подстилка в ельнике черемухово-липовом, а наименее кислой – в липняке крапиво-страусниковом.

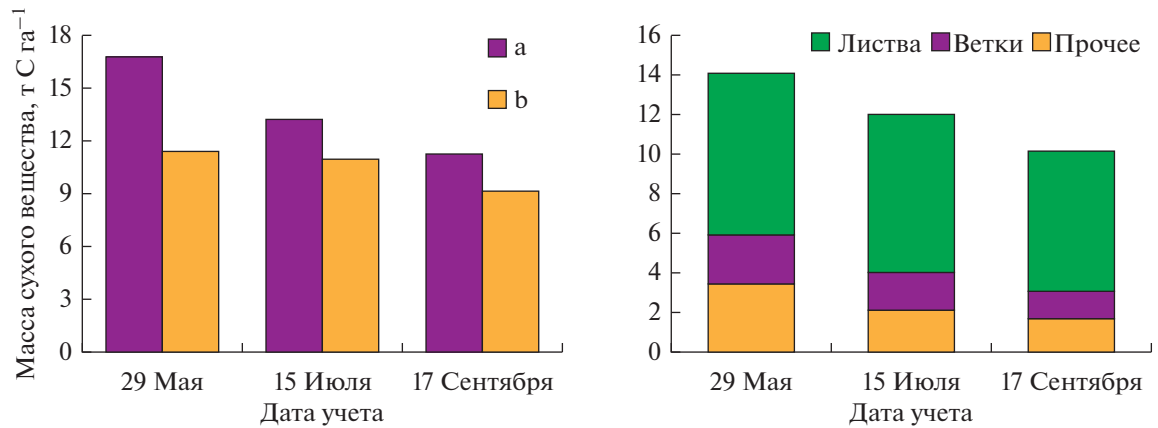


Рис. 3. Сезонная динамика массы подстилок и ее фракций в лесных биогеоценозах: а – ельнике черемухово-липовом, б – дубняке липово-крапивном.

Пределы изменчивости физико-химических параметров лесных подстилок. Все параметры подстилки в разрезе экотопов имеют, как было установлено, очень большую изменчивость (табл. 3). Особенно велика вариабельность содержания в ней подвижных соединений фосфора, калия, кальция и магния. Меньше же всего варьируют значения актуальной и обменной кислотности, а также плотности подстилки.

По мере удаления от русла реки мощность и запас подстилки, а также содержание в ней углерода увеличиваются, а ее зольность, наоборот, уменьшается, что связано как со снижением напряженности эрозионно-аккумулятивных процессов, так и с улучшением развития фитоценозов. Эти зависимости с очень высокой точностью

($p < 0.001$) описывают следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 0.021X^{0.693} + 0.95; \quad R^2 = 0.895;$$
$$Y_2 = 0.524X^{0.567} + 2.94; \quad R^2 = 0.871;$$
$$Y_3 = 0.217X^{0.550} + 0.24; \quad R^2 = 0.888;$$

$$Y_4 = 38.4\exp(-21.18 \times 10^{-3}X) + 17.4; \quad R^2 = 0.774;$$

в которых Y_1 – мощность подстилки, см; Y_2 – запас подстилки, т С га⁻¹; Y_3 – запас чистого углерода в подстилке, т С га⁻¹; Y_4 – зольность, %; X – расстояние от русла, м; R^2 – коэффициент детерминации уравнения.

Физико-химические параметры подстилки в каждой части поймы существенно различаются между собой (рис. 4). Наибольшие отличия отме-

Таблица 2. Сезонная динамика физико-химических параметров подстилок в пойменных биотопах

Дата отбора образцов	Зольность, %	рНвод	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сумма	Нг	V	P ₂ O ₅	K ₂ O
			мг-экв. на 100 г					мг на 100 г	
Ельник черемухово-липовый (ПП 6)									
29.05	23.3	5.90	4.12	1.25	5.37	23.9	18.4	13.28	1.58
15.07	24.7	6.07	4.37	2.00	6.37	26.2	19.6	14.92	1.74
17.09	26.8	6.04	4.12	1.38	5.50	23.1	19.2	8.37	2.06
Дубняк липово-крапивный (ПП 7)									
29.05	11.0	6.19	4.87	2.25	7.12	20.0	26.2	3.80	8.50
15.07	26.5	6.27	5.50	2.50	8.00	19.3	29.4	8.37	3.98
17.09	21.3	6.37	5.75	2.38	8.13	21.6	27.4	2.40	5.70
Липняк крапиво-страусниковый (ПП 8)									
29.05	14.9	6.20	7.00	4.25	11.25	37.5	23.1	6.40	10.80
15.07	17.4	6.51	6.62	1.25	7.87	20.0	28.2	4.60	9.00
17.09	16.8	6.68	6.25	0.00	6.25	17.7	26.1	5.60	10.20

Примечание. Нг – гидролитическая кислотность, мг-экв. на 100 г подстилки; V – степень насыщенности основаниями, %.

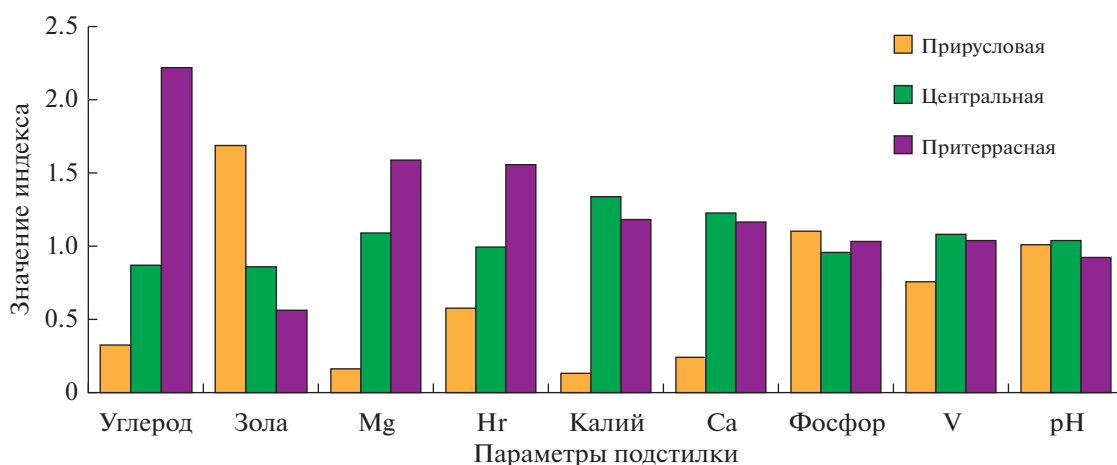


Рис. 4. Значения индексов параметров лесных подстилок в разных частях поймы относительно их средней величины (пояснения аббревиатур параметров дано в табл. 2 и тексте статьи).

чаются по запасам подстилки и содержанию в ней углерода, а также по ее зольности. Содержание подвижного калия и обменного кальция наиболее велико в подстилке биотопов центральной части поймы, а золы и подвижного фосфора — прирусловой зоны. Менее всего различаются между собой экотопы по кислотности подстилок и степени насыщенности основаниями.

Масса подстилок в пойменных лесах, а соответственно, и запас в них углерода, как показал

анализ, значительно ниже, чем на водоразделах, особенно в ельниках мертвopoкpовных (Богатырев, Щенина, 1989; Пурьев, Газизуллин, 2011; Демаков и др., 2017; Богатырев и др., 2019), что связано с частичным ее выносом во время половодья, наиболее сильно выраженным в прирусловых экотопах. Актуальная и обменная кислотность подстилок в пойме реки Большая Кокшага практически такая же, как в защитных лесных насаждениях Татарии (Пурьев, Газизуллин, 2011), но значитель-

Таблица 3. Пределы изменчивости значений основных параметров подстилок в пойменных экотопах

Анализируемый параметр	Значения статистических показателей, $N = 20$				
	$M \pm m$	min	max	S	CV
Мощность подстилки, см	2.14 ± 0.28	0.70	4.00	1.16	53.9
Плотность подстилки, кг м^{-3}	67.2 ± 3.68	40.0	100.0	14.7	21.9
Запас подстилки, т га^{-1}	14.5 ± 2.36	3.23	37.3	10.5	72.9
Зольность подстилки, %	28.3 ± 3.21	10.5	68.0	14.4	50.8
Запас углерода в подстилке, т С га^{-1}	4.66 ± 0.87	0.66	13.7	3.88	83.3
Значение pH водной вытяжки	6.10 ± 0.07	5.45	6.70	0.32	5.2
Значение pH солевой вытяжки	5.63 ± 0.10	4.75	6.30	0.44	7.8
Гидролитическая кислотность	29.9 ± 3.70	13.1	73.0	16.5	55.2
Содержание обменного Ca^{2+}	17.2 ± 5.78	2.6	83.2	25.2	146.8
Содержание обменного Mg^{2+}	7.91 ± 3.05	0.10	40.0	13.3	168.2
Сумма обменных оснований	25.1 ± 8.74	4.29	123.2	38.1	152.0
Степень насыщенности основаниями, %	32.5 ± 4.75	14.2	82.2	20.7	63.8
Содержание P_2O_5 , мг на 100 г	22.2 ± 5.59	2.6	92.1	25.0	112.4
Содержание K_2O , мг на 100 г	25.0 ± 11.2	1.4	203.5	50.2	201.1

Примечание. N — объем выборки; M , min, max — среднее арифметическое, минимальное и максимальное значения показателя в выборке, S — среднеквадратическое отклонение значений, m — ошибка среднего, CV — коэффициент вариации.

но ниже, чем в приводораздельных сосняках и ельниках. Значительно ниже у подстилок в пойменных лесах также значения их зольности, гидролитической кислотности, суммы обменных оснований, степени насыщенности ими и содержания подвижного калия. Лишь по содержанию подвижного фосфора они превосходят подстилки сосняков лишайниковых и мшистых.

Расчеты показали, что зольность подстилки обратно пропорциональна ее мощности, причиной чего является перемешивание между собой растительных остатков и минеральной компоненты паводковых наносов (наилка), масса которых наиболее велика в прирусловой части поймы. Эту зависимость с высокой точностью ($p < 0.01$) описывает уравнение регрессии:

$$Y = 33.27 \exp(-62.79 \times 10^{-2} X) + 12.8; \quad R^2 = 0.653;$$

в котором Y — зольность воздушно-сухой подстилки, %; X — мощность подстилки, см. Подобное явление отмечено нами также в сосняках лишайниковых и мшистых (Демаков и др., 2013), где причиной является присутствие в органо-минеральном горизонте песчинок, выбиваемых каплями дождя из почвы: чем меньше мощность напочвенного покрова в этих биотопах, тем больше в нем оказывается песчинок и выше его зольность.

ВЫВОДЫ

1. Фракционный состав подстилки, состоящей в основном из активной фракции, в каждом биотопе сугубо специфичен и зависит в основном от состава древостоя и растений напочвенного покрова. Масса в опаде листвы и неактивной фракции наиболее велика в биотопах центральной части поймы, присутствие же трухи, т.е. органики, потерявшей первоначальную морфоструктуру, наиболее велико в притеррасной части.

2. Масса подстилки в пойменных биогеоценозах снижается за вегетационный период на 20–33% ее величины в конце мая. Основная потеря массы отмечается в первой половине лета. Вариативность физико-химических параметров подстилки, особенно ее кислотности, степени насыщенности основаниями, содержания обменного кальция, а также подвижных соединений фосфора и калия, обусловлена в основном особенностями биотопов, а сезонные их изменения статистически незначимы.

3. Значения всех параметров подстилки в пойменных биогеоценозах имеют очень большую изменчивость. Особенно велика вариативность содержания в ней подвижных соединений фосфора, калия, кальция и магния, меньше же всего изменяются значения актуальной и обменной кислотности, а также плотности подстилки.

4. Мощность и запас подстилки, а также содержание в ней углерода, по мере удаления от

русла реки, увеличиваются. Зольность же подстилки, наоборот, уменьшается, что связано как со снижением напряженности эрозионно-аккумулятивных процессов, так и с улучшением развития фитоценозов. Эти зависимости с очень высокой точностью описывают соответствующие уравнения регрессии. Содержание подвижного калия и обменного кальция наиболее велико в подстилке биотопов центральной части поймы, а показателя зольности и подвижного фосфора — прирусловой зоны. По кислотности подстилок и степени насыщенности их основаниями экотопы разных частей поймы менее всего различаются между собой.

5. Масса подстилки в пойменных лесах, а соответственно, и запас углерода в ней, значительно ниже, чем указано исследователями для приводораздельных насаждений, что связано с частичным ее выносом во время половодья, наиболее сильно выраженным в прирусловых биотопах. Значительно ниже также актуальная и обменная кислотность подстилок пойменных экотопов, показатели их зольности, гидролитической кислотности, суммы обменных оснований, степени насыщенности ими и содержания подвижного калия. По содержанию подвижного фосфора они превосходят подстилки сосняков лишайниковых и мшистых приводораздельных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматические ресурсы Марийской АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 107 с.
- Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 490 с.
- Аткина Л.И., Аткин А.С. Особенности накопления подстилок в лесных сообществах // Почвоведение. 2000. № 8. С. 1004–1008.
- Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
- Богатырёв Л.Г. Образование подстилок — один из важнейших процессов в лесных экосистемах // Почвоведение. 1996. № 4. С. 501–511.
- Богатырёв Л.Г., Демаков Ю.П., Исаев А.В., Шарафутдинов Р.Н., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И. Структурно-функциональная организация подстилок в борах Марийского Заволжья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 3–9.
- Богатырёв Л.Г., Дёмин И.И., Матышак Г.В., Сапожникова В.А. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок // Лесоведение. 2004. № 4. С. 17–30.
- Богатырёв Л.Г., Щенина Т.Г. Лесные подстилки южной тайги Костромской области // Структура и динамика экосистем южнотаежного Заволжья. М.: Ин-т эволюционной морфологии и экологии животных им. А.Н. Северцова, 1989. С. 41–64.

- Браславская Т.Ю.* Структура и динамика растительного покрова в поймах рек лесного пояса // Восточно-европейские леса. М.: Наука, 2004. С. 384–473.
- Вадюнина А.Д., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1985. 416 с.
- Васильева Д.П.* Ландшафтная география Марийской АССР. Йошкар-Ола: Марийское книжное издательство, 1979. 136 с.
- Виленский Д.Г.* Почвы Окской поймы. М.: МГУ, 1955. 70 с.
- Габеев В.Н.* Формирование лесной подстилки и содержание в ней зольных элементов в сосновых лесах Западной Сибири // Лесоводственные исследования в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1972. С. 99–120.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В., Таланцев В.И.* Содержание органики и зольных элементов в напочвенном покрове и почве сосняков лишайниково-мшистых // Научные труды государственного природного заповедника “Большая Кокшага”. Йошкар-Ола. 2013. № 6. С. 56–76.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В., Таланцев В.И.* Вариабельность содержания зольных элементов в напочвенном покрове и верхнем слое почвы сосняка лишайникового // Научные труды государственного природного заповедника “Большая Кокшага”. Йошкар-Ола. 2015. № 7. С. 29–40.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В., Шарафутдинов Р.Н.* Роль лесной подстилки в борах Марийского Заволжья и вариабельность ее параметров // Научные труды государственного природного заповедника “Большая Кокшага”. Вып. 8. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. С. 15–43.
- Добровольский Г.В.* Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: МГУ, 1968. 268 с.
- Дылис Н.В.* Лесная подстилка в биогеоценоотическом освещении // Лесоведение. 1985. № 5. С. 3–7.
- Дылис Н.В., Носова Л.М., Сперанская Е.С.* Особенности накопления и разложения опада в хвойных лесах Подмосковья // Лесоведение. 1975. № 6. С. 10–18.
- Исаев А.В.* Формирование почвенного и растительного покрова в поймах речных долин Марийского Полесья (на примере территории заповедника “Большая Кокшага”). Йошкар-Ола: Марийский гос. техн. ун-т, 2008. 240 с.
- Карпачевский Л.О.* Некоторые особенности разложения лесного опада // Проблемы лесного почвоведения. М.: Наука, 1973. С. 51–65.
- Карпачевский Л.О.* Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: МГУ, 1977. 312 с.
- Карпачевский Л.О.* Лес и лесные почвы. М.: Лесная пром-сть, 1981. 264 с.
- Классификация и диагностика почв СССР / Сост. В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова и др. М.: Колос, 1977. 224 с.
- Кошельков С.П.* О формировании и подразделении подстилок в хвойных южнотаёжных лесах // Почвоведение. 1961. № 10. С. 19–29.
- Максимов А.А.* Структура и динамика биоценозов речных долин. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1974. 260 с.
- Мелехов И.С.* Об отложении лесной подстилки в зависимости от типа леса // Тр. Архангельского лесотехн. ин-та. Архангельск, 1957. Т. 17. С. 124–137.
- Миркин Б.М.* Закономерности развития растительности речных пойм. М.: Наука, 1974. 174 с.
- Молчанов А.А.* Гидрологическая роль леса. М.: АН СССР. 1960. 487 с.
- Попова Э.П., Горбачев В.Н.* Особенности формирования и свойства подстилок лесных биогеоценозов Среднего Приангарья // Почвоведение. 1988. № 1. С. 109–116.
- Пураев А.С., Газизуллин А.Х.* Защитные лесные насаждения Республики Татарстан и почвенно-экологические условия их произрастания. Казань: Казанский гос. аграрный ун-т, 2011. 176 с.
- Рыжкова Г.А.* Структура и динамика опада лесных фитоценозов Центрально-Черноземного заповедника: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Воронеж, 2003. 24 с.
- Сабиров А.Т.* Характеристика подстилки лесных биогеоценозов Среднего Поволжья // Лесное хозяйство Поволжья. Саратов: Саратовская государственная сельскохозяйственная академия, 1996. № 2. С. 111–115.
- Сапожников А.П.* Лесная подстилка — номенклатура, классификация и индексация // Почвоведение. 1984. № 5. С. 96–105.
- Сапожников А.П.* Об использовании признаков лесной подстилки в оценке гумусного состояния почв // Почвоведение. 1987. № 9. С. 26–31.
- Смирнов В.В.* Сезонный опад в лесных биогеоценозах // Лесоведение. 1967. № 6. С. 62–75.
- Смирнов В.Н.* Методика проведения полевых почвенных исследований в лесу для лесохозяйственных целей. Йошкар-Ола: Марийское гос. изд-во, 1958. 55 с.
- Смолянинов И.И.* Биологический круговорот веществ и повышение продуктивности лесов. М.: Лесная пром-сть, 1969. 192 с.
- Ушакова Г.И.* Особенности формирования и трансформации подстилки в лесных биогеоценозах Хибин // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1463–1469.
- Ушакова Г.И.* Влияние экологических условий на скорость и характер разложения лесной подстилки // Почвоведение. 2000. № 8. С. 1009–1015.
- Фаткуллин А.Ш.* Почвы пойм малых рек Татарии. Казань: КГУ, 1968. 204 с.
- Шакиров К.Ш.* Изучение размеров поступления, химического состава и свойств опада в различных насаждениях в целях рационального использования плодородия лесных почв // Взаимоотношения леса с почвой. Казань: КГУ, 1964. С. 83–118.
- Шаталов В.Г., Трещевский И.В., Якимов И.В.* Пойменные леса. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 160 с.

Forest Litter Features in Floodplain Forest of the “Bolshaya Kokshaga” Reserve

A. V. Isaev^{1, *} and Yu. P. Demakov^{1, 2}

¹*Bolshaya Kokshaga natural reserve, Voinov-Internatsionalistov st., 26, Yoshkar-Ola, 424038 Russia*

²*Volga State University Of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, 424000 Russia*

*E-mail: avsacha@yandex.ru

The studies, carried out in the floodplain ecotopes of the Bolshaya Kokshaga reserve (Russia, the Republic of Mari El) are relevant due to the need to understand the patterns of formation of the forest litter properties, which are a sensitive integral indicator of the biogeocenoses conditions. The work has been carried out on 20 test plots located in different parts of the floodplain in areas with a point bar type of river bed evolution, and, in addition to the main physicochemical parameters, the weight of the litter, its fractional composition and seasonal dynamics, as well as carbon reserves in it, were estimated. It was established that the weight of the litter on the studies sites decreased during the growing season from 20 to 33% of its value at the end of May. The main loss of its mass was observed in the first half of summer. The variability of the litter's physicochemical parameters, especially its acidity, the degree of base saturation, the exchangeable calcium content, as well as the content of mobile phosphorus and potassium compounds, was found to be tied mainly to the features of the ecotopes, and their seasonal changes turned out to be statistically insignificant. It was determined that the greatest differences between the ecotopes were in the litter mass and the carbon stock in it. The mobile potassium and exchangeable calcium content were the highest in the litter of biotopes from the central part of the floodplain, and the content of ash and mobile phosphorus was the highest in the near-river zone. The ecotopes differed least of all in terms of the litter acidity and the degree of base saturation. It was shown that the carbon mass and stock in the litter of floodplain forests were significantly lower than in watershed stands, which was explained by its partial removal during floods, having the strongest effect in near-river ecotopes. The litter from the floodplain ecotopes, compared to the watershed ecotopes, also had significantly lower values of acidity, ash content, the sum of exchangeable bases, and the mobile potassium content. They surpassed the litter of lichen and mossy pine forests only in the mobile phosphorus content.

Keywords: “Bolshaya Kokshaga” reserve, floodplain biogeocenoses, forest litter, parameters, variability, causes.

REFERENCES

- Agroklimaticheskie resursy Mariiskoi ASSR*, (Agro-climatic resources of the Mari ASSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 107 p.
- Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Handbook on chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 490 p.
- Atkina L.I., Atkin A.S., Osobennosti nakopleniya podstilok v lesnykh soobshchestvakh (Peculiarities of litter accumulation in forest communities), *Pochvovedenie*, 2000, No. 8, pp. 1004–1008.
- Bogatyrev L.G., Demakov Y.P., Isaev A.V., Sharafutdinov R.N., Benediktova A.I., Zemskov F.I., Strukturno-funktsional'naya organizatsiya podstilok v borakh Mariiskogo Zavolzh'ya (Structural and functional organization of litter in the forests of the Mari Zavolzh'ye), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2019, No. 1, pp. 3–9.
- Bogatyrev L.G., Demin I.I., Matyshak G.V., Sapozhnikova V.A., O nekotorykh teoreticheskikh aspektakh issledovaniya lesnykh podstilok (On some theoretical aspects of studying forest litters), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 17–30.
- Bogatyrev L.G., O klassifikatsii lesnykh podstilok (On forest litters classification), *Pochvovedenie*, 1990, No. 3, pp. 118–127.
- Bogatyrev L.G., Obrazovanie podstilok – odin iz vazhneyshikh protsessov v lesnykh ekosistemakh (Litter formation is one of the most important processes in forest ecosystems), *Pochvovedenie*, 1996, No. 4, pp. 501–511.
- Bogatyrev L.G., Shchenina T.G., Lesnye podstilki yuzhnoi taigi Kostromskoi oblasti (Forest litters of the southern taiga of the Kostroma region), In: *Struktura i dinamika ekosistem yuzhnotaevzhnogo Zavolzh'ya* (Structure and dynamics of ecosystems of the southern taiga Zavolzh'ye), Moscow: In-t evolyutsionnoi morfologii i ekologii zhivotnykh im. A.N. Severtsova, 1989, pp. 41–64.
- Braslavskaya T.Y., Struktura i dinamika rastitel'nogo pokrova v poimakh rek lesnogo poyasa (Structure and dynamics of vegetation cover in the floodplains of rivers in the forest belt), In: *Vostochno-evropeiskie lesa* (Eastern European forests), Moscow: Nauka, 2004, pp. 384–473.
- Demakov Y.P., Isaev A.V., Sharafutdinov R.N., Rol' lesnoi podstilki v borakh Mariiskogo Zavolzh'ya i variabel'nost' ee parametrov (Forest cover role in pine forests of mari Trans-Volga region and variability of soil cover parameters), *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika “Bol'shaya Kokshaga”*, 2017, No. 8, pp. 15–43.
- Demakov Y.P., Isaev A.V., Talantsev V.I., Soderzhanie organiki i zol'nykh elementov v napochvennom pokrove i pochve sosnyakov lishainikovo-mshistykh (The content of organics and ash constituents in the ground cover and soil of lichen pine and mossy forests), *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika “Bol'shaya Kokshaga”*, 2013, No. 6, pp. 56–76.

- Demakov Y.P., Isaev A.V., Talantsev V.I., Variabel'nost' sodержaniya zol'nykh elementov v napochvennom pokrove i verkhnem sloe pochvy sosnyaka lishainikovo (Variability of ash constituents content in the soil cover and topsoil (lichen pine forest)), *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Bol'shaya Kokshaga"*, 2015, No. 7, pp. 29–40.
- Dobrovol'skii G.V., *Pochvy rechnykh poim tsentra Russkoi ravniny* (Soils of river floodplains in the center of the Russian Plain), Moscow: MGU, 1968, 268 p.
- Dylis N.V., Lesnaya podstilka v biogeotsenoticheskom osveshchenii (Forest litter in biogeocenotic clarification), *Lesovedenie*, 1985, No. 5, pp. 3–7.
- Dylis N.V., Nosova L.M., Speranskaya E.S., Osobennosti nakopleniya i razlozheniya opada v khvoinykh lesakh Podmoskov'ya (Features of the accumulation and decomposition of litter in the coniferous forests of the Moscow region), *Lesovedenie*, 1975, No. 6, pp. 10–18.
- Fatkullin A.S., *Pochvy poim malykh rek Tatarii* (Soils of floodplains of small rivers of Tataria), Kazan: KGU, 1968, 204 p.
- Gabeev V.N., Formirovanie lesnoi podstilki i sodержanie v nei zol'nykh elementov v sosnovykh lesakh Zapadnoi Sibiri (Formation of the forest litter and the content of ash elements in it in the pine forests of Western Siberia), In: *Lesovodstvennye issledovaniya v Zapadnoi Sibiri* (Forestry research in Western Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1972, pp. 99–120.
- Isaev A.V., *Formirovanie pochvennogo i rastitel'nogo pokrova v poimakh rechnykh dolin Mariiskogo Poles'ya (na primere territorii zapovednika "Bol'shaya Kokshaga")* (Formation of soil and vegetation cover in the floodplains of the river valleys of the Mari Polesie (on the example of the territory of the reserve "Bolshaya Kokshaga")), Yoshkar-Ola: Mariiskii gos. tekhn. un-t, 2008, 240 p.
- Karpachevskii L.O., *Les i lesnye pochvy* (Forest and forest soils), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1981, 261 p.
- Karpachevskii L.O., Nekotorye osobennosti razlozheniya lesnogo opada (Some features of the decomposition of forest litter), In: *Problemy lesnogo pochvovedeniya* (Issues of forest soil science), Moscow: Nauka, 1973, pp. 51–65.
- Karpachevskii L.O., *Pestrota pochvennogo pokrova v lesnom biogeotsenoze* (Diversity of soil cover in forest biogeocoenosis), Moscow: Izd-vo MGU, 1977, 312 p.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of the soils of USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
- Koshel'kov S.P., O formirovanii i podrazdelenii podstilok v khvoinykh yuzhnataezhnykh lesakh (On the formation and subdivision of litter in coniferous southern taiga forests), *Pochvovedenie*, 1961, No. 10, pp. 19–29.
- Maksimov A.A., *Struktura i dinamika biotsenozov rechnykh dolin* (Structure and dynamics of river valley biocenoses), Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение, 1974, 260 p.
- Melekhov I.S., Ob otlozhenii lesnoi podstilki v zavisimosti ot tipa lesa (On the deposition of forest litter depending on the forest type), *Tr. Arkhangel'skogo lesotekhn. in-ta*, 1957, Vol. 17, pp. 124–137.
- Mirkin B.M., *Zakonomernosti razvitiya rastitel'nosti rechnykh poim* (Patterns of development of vegetation of river floodplains), Moscow: Nauka, 1974, 174 p.
- Molchanov A.A., *Gidrologicheskaya rol' lesa* (Hydrological contribution of forest), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1960, 487 p.
- Popova E.P., Gorbachev V.N., Osobennosti formirovaniya i svoystva podstilok lesnykh biogeotsenozov Srednego Priangar'ya (Peculiarities of Formation and Properties of Litters of Forest Biogeocenoses in the Middle Angara Region), *Pochvovedenie*, 1988, No. 1, pp. 109–116.
- Puryaev A.S., Gazizullin A.K., *Zashchitnye lesnye nasazhdeniya Respubliki Tatarstan i pochvenno-ekologicheskie usloviya ikh proizrastaniya* (Protective forest plantations of the Republic of Tatarstan and soil and ecological conditions of their growth), Kazan: Kazanskii gos. agrarnyi un-t, 2011, 176 p.
- Ryzhkova G.A., *Struktura i dinamika opada lesnykh fitotsenozov Tsentral'no-Chernozemnogo zapovednika. Avtoreferat diss. kand. biol. nauk* (The structure and dynamics of the litter of forest phytocenoses of the Central Chernozem Reserve. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Voronezh, 2003, 24 p.
- Sabirov A.T., Kharakteristika podstilki lesnykh biogeotsenozov Srednego Povolzh'ya (Characteristics of the litter of forest biogeocenoses of the Middle Volga region), In: *Lesnoe khozyaistvo Povolzh'ya* (Forestry of the Volga region), Saratov: Saratovskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya, 1996, Issue 2, pp. 111–115.
- Sapozhnikov A.P., Lesnaya podstilka – nomenklatura, klassifikatsiya i indeksatsiya (Forest litter – nomenclature, classification and indexing), *Pochvovedenie*, 1984, No. 5, pp. 96–105.
- Sapozhnikov A.P., Ob ispol'zovanii priznakov lesnoi podstilki v otsenke gumusnogo sostoyaniya pochv (On the use of signs of forest litter in the assessment of the humus state of soils), *Pochvovedenie*, 1987, No. 9, pp. 26–31.
- Shakirov K.S., Izuchenie razmerov postupleniya, khimicheskogo sostava i svoystv opada v razlichnykh nasazhdeniyakh v tselyakh ratsional'nogo ispol'zovaniya plodorodiya lesnykh pochv (The study of the amount of input, chemical composition and properties of litter in various plantations in order to rationally use the fertility of forest soils), In: *Vzaimootnosheniya lesa s pochvoi* (Relationships between forest and soil), Kazan: KGU, 1964, pp. 83–118.
- Shatalov V.G., Treshchevskii I.V., Yakimov I.V., *Poimennyye lesa* (Floodplain forests), Moscow: Lesn. prom-st', 1984, 160 p.
- Smirnov V.N., *Metodika provedeniya polevykh pochvennykh issledovaniy v lesu dlya lesokhozyaistvennykh tselei* (Methodology for conducting field soil research in the forest for forestry purposes), Yoshkar-Ola: Mariiskoe gos. izd-vo, 1958, 55 p.
- Smirnov V.V., Sezonnyi opad v lesnykh biogeotsenozakh (Seasonal litter in forest biogeocenoses), *Lesovedenie*, 1967, No. 6, pp. 62–75.
- Smol'yaninov I.I., *Biologicheskii krugovorot veshchestv i povyshenie produktivnosti lesov* (Biological cycling and in-

creasing forest productivity), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1969, 192 p.

Smol'yaninov I.I., *Biologicheskii krugovorot veshchestv i povysheenie produktivnosti lesov* (Biological cycling and increasing forest productivity), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1969, 192 p.

Ushakova G.I., *Osobennosti formirovaniya i transformatsii podstilki v lesnykh biogeotsenozakh Khibin* (Features of the formation and transformation of the litter in forest biogeocenoses of the Khibiny), *Pochvovedenie*, 1999, No. 12, pp. 1463–1469.

Ushakova G.I., *Vliyaniye ekologicheskikh uslovii na skorost' i kharakter razlozheniya lesnoi podstilki* (Influ-

ence of ecological conditions on the rate and character of forest litter decomposition), *Pochvovedenie*, 2000, No. 8, pp. 1009–1015.

Vadyunina A.D., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochv* (Methods for studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1985, 416 p.

Vasil'eva D.P., *Landshaftnaya geografiya Mariiskoi ASSR* (Landscape geography of the Mari ASSR), Yoshkar-Ola: Mariiskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1979, 136 p.

Vilenskii D.G., *Pochvy Okskoi poimy* (Soils of the Oka floodplain), Moscow: MGU, 1955, 70 p.

УДК 631.421

ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ В СТЕПЯХ ХАКАСИИ

© 2023 г. О. А. Сорокина*

ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, пр-т Мира, 90, Красноярск, 660049 Россия

*E-mail: geos0412@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Искусственное лесоразведение особенно актуально для сухостепных районов, где леса выполняют комплексную почвозащитную, климатообразующую, лечебно-оздоровительную и эстетическую функции. Поэтому в 1975–1978 гг. в Ширинской сухой степи республики Хакасия на базе Института леса им. Сукачева были созданы экспериментальные искусственные поливидовые насаждения древесных и кустарниковых видов. Исследования проводились в десяти биодендрогруппах (БДГ) Ширинской степи. Для сравнения взят участок целинного естественного степного фитоценоза, находящийся в непосредственной близости. Целью данных исследований стало изучение влияния древесной и кустарниковой растительности на изменение эдафических условий, сукцессию напочвенного покрова и изменение режима функционирования почв. Максимальное положительное влияние на функциональную активность биогенных показателей оказывают БДГ с эдификаторными хвойными видами, под кронами которых развиваются соподчиненные, хорошо облиственные кустарники. Искусственные лесные насаждения способствуют образованию подстилки и увеличению доли микромицетов в почве. Установлена корреляционная зависимость между абиотическими факторами, особенно освещенностью, и нарастанием наземной травянистой фитомассы. Изменение эколого-фитоценологических факторов способствует увеличению биологического разнообразия за счет оптимизации запасов и структуры фитомассы, появлению новых видов травянистой растительности. В условиях сухой степи формируются экологически устойчивые искусственные лесные биоценозы.

Ключевые слова: биодендрогруппы, искусственные насаждения, абиотические факторы, температура почвы, температура воздуха, освещенность, фитомасса, микромицеты, микробная масса, корреляционная зависимость, биологическое разнообразие.

DOI: 10.31857/S0024114823010096, EDN: NJZTWE

Важнейшее значение в борьбе с деградацией и опустыниванием земель имеет восстановление древесной и кустарниковой растительности различных видов в тех условиях, которые отвечают их требованиям. В то же время огромная экологическая роль связана с поиском путей адаптации различных видов древесных и кустарниковых растений к почвенным условиям, не отвечающим или недостаточно отвечающим их требованиям (Высоцкий, 1983). Критериями здесь выступают выживаемость и долговечность кустарниковых и древесных видов растений, а также трансформация плодородия почв под ними в сравнении с безлесными участками целинной степи либо распаханными деградированными массивами пашни. При этом разные виды растений могут оказывать специфическое воздействие на почвообразовательные процессы и свойства почв. Это воздей-

ствие, как правило, является почвоулучшающим. Кроме того, большое значение имеет эстетическая и общеэкологическая роль искусственных насаждений в оздоровлении окружающей среды.

Южная часть сельскохозяйственной зоны Красноярского края, республика Хакасия, степные пространства республики Тыва подвержены проявлениям деградации земель и опустыниванию за счет сухости климата и антропогенных нагрузок (Кулик, 2007; Савостьянов, 2007, 2010; Чебокаков, 2019). В этой зоне необходимо проведение мероприятий по восстановлению лесов, интродукции древесных пород, искусственному лесоразведению (Савин, 2001; Попова, 2005; Лобанов, 2007). В то же время огромная экологическая роль связана с поисками путей адаптации видов древесных растений к почвенным условиям, не отвечающим их требованиям или недостаточно отве-

чающих этим требованиям. Поэтому сухостепные зоны республики Хакасия нуждаются в разработке биоэкологических основ и технологий, которые могут быть использованы для создания устойчивых защитных, эстетических, климатообразующих и лечебно-оздоровительных лесных насаждений на основе местных и интродуцированных растений. С этой целью в 1975–1978 гг. на территории Ширинской опытно-экспериментальной базы Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН по специальной технологии были осуществлены поливидовые посадки искусственных лесных насаждений, организованных в биодендрогруппы (Сорокин и др., 1998).

В настоящее время продолжаются комплексные исследования по изучению устойчивости долголетних лесных насаждений различного видового состава, а также по оценке агроэкологической роли их воздействия на экологические абиотические факторы и изменение комплекса свойств почв в Ширинской сухой степи. В процессе исследований разрабатываются биоэкологические технологии, при помощи которых возможно создавать устойчивые лечебно-оздоровительные и защитные насаждения в условиях нестабильных степных экосистем, используя не только местные, но и интродуцированные виды древесной и кустарниковой растительности. Универсальным индикаторным показателем трансформации условий почвообразования при этом является биологическая активность почв (Сорокин, 2009; Сорокина, 2013).

Цель исследований заключается в оценке эколого-фитоценотического воздействия биодендрогрупп искусственных древесных и кустарниковых насаждений на изменение биологической активности почв, формирование биологического разнообразия и продуктивности надземной травянистой фитомассы в сравнении с участком естественного степного фитоценоза.

Для реализации цели под биодендрогруппами провели определение и учет экологических факторов (температуры приземного слоя воздуха, температуры верхнего слоя почвы, освещенности), показателей биологической активности почв (общей численности микроорганизмов, численности бактерий и микромицетов, углерода микробной биомассы), а также запасов, структуры надземной травянистой фитомассы и подстилки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в биодендрогруппах (БДГ), состоящих из древесных и кустарниковых растений, представленных в различных комбинациях, где эдификационную функцию выполняет древесный вид, которому соподчиняются кустарниковые виды. Были выбраны десять биодендрогрупп различного видового состава.

1. Вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), яблоня сибирская (*Malus baccata* (L.) Borkh.), барбарис (*Berberis vulgaris* L.), смородина двуликая (*Ribes diacantha* Pall.).
2. Вяз приземистый, сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L.), клен (*Acer platanoides* L.), боярышник (*Crataegus*), крушина (жостер) (*Rhamnus cathartica* L.).
3. Осина (*Populus tremula* L.), барбарис, шиповник (*Rosaceae*), яблоня сибирская, сирень обыкновенная.
4. Осина, сирень обыкновенная, шиповник, таволга (спирея) (*Spiraea salicifolia* L.).
5. Осина, вяз приземистый, облепиха (*Hippophae rhamnoides* L.), жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.).
6. Черемуха виргинская (*Prunus virginiana* L.), яблоня сибирская, жимолость татарская.
7. Береза повислая (*Betula pendula*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), сирень обыкновенная, карагана (акация) (*Caragana arborescens* Lam.), шиповник.
8. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), черемуха виргинская, клен (*Acer platanoides* L.), ива остролистая (*Salix acutifolia*), таволга (спирея).
9. Лиственница сибирская (*Larix sibirica*), боярышник, сирень венгерская (*Syringa josikaea*).
10. Тополь (*Populus alba*), яблоня сибирская, жимолость татарская.
11. Контрольный участок естественного фитоценоза Ширинской сухой степи, расположенный в непосредственной близости.

Почвы на объектах исследования относятся к черноземам аккумулятивно-карбонатным с укороченным гумусовым горизонтом, которые по прежней классификации были черноземами обыкновенными карбонатными.

Изучение абиотических факторов в БДГ проводилось ежемесячно в течение вегетационных периодов 2017–2019 гг. Температуру почвы в слое 0–10 см измеряли термометром Снекtemp 1 by HANNA (°C) в 10, 15 и 20 ч, температуру приземного слоя воздуха определяли наружными термометрами в это же время. На всех объектах исследования измеряли освещенность (Лк) с помощью фотоэкспонетра Ленинград-7 и цифрового фотоаппарата Olympus E-PL5.

Образцы почвы для определения численности микромицетов отбирали в августе. Измерение общей численности почвенных микроорганизмов (КОЕ, тыс. г⁻¹) осуществляли методом предельных разведений. Для учета бактериальной микрофлоры посевы проводили на среде МПА, для определения численности микромицетов — на среде Сабуро. Углерод микробной биомассы (мг/г почвы) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания. Учет запасов и структуры травянистой фитомассы и запасов формирующейся подстилки (т га⁻¹) на каждом объекте исследований проводили в августе по рамке 0.5 × 0.5 м. Повторность всех отборов и определений 5-кратная.

Провели корреляционно-регрессионный анализ для определения статистической зависимости

Таблица 1. Температура приземного слоя воздуха в БДГ ($n = 5$)

№ БДГ	Виды растений	Температура приземного слоя воздуха, °С			
		2016 г.	2017 г.	2018 г.	средняя
1	Вяз приземистый, яблоня сибирская, барбарис, смородина двуиговая	20.1	19.6	20.5	20.1
2	Вяз приземистый, сирень обыкновенная, клён, боярышник, крушина	20.7	19.2	20.6	20.2
3	Осина, барбарис, шиповник, яблоня сибирская, сирень обыкновенная	20.2	19.3	21.0	20.2
4	Осина, сирень обыкновенная, шиповник, таволга (спирея)	20.1	19.4	20.6	20.0
5	Осина, вяз приземистый, облепиха, жимолость татарская	20.5	19.5	20.2	20.1
6	Черёмуха виргинская, яблоня сибирская, жимолость татарская	20.2	19.3	19.7	19.7
7	Береза повислая, рябина обыкновенная, сирень обыкновенная, карагана, шиповник	20.4	19.3	20.2	20.0
8	Сосна обыкновенная, черёмуха виргинская, клён, ива остролистная, спирея	21.0	19.7	21.3	20.7
9	Лиственница сибирская, боярышник, сирень венгерская	20.1	19.2	20.7	20.0
10	Тополь, яблоня сибирская, жимолость татарская	20.7	19.7	21.1	20.5
11	Участок естественного фитоценоза	24.1	21.7	23.4	23.1

сти между свойствами почвы, запасами фитомассы и некоторыми экологическими факторами в программе Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как в естественных, так и в искусственных лесных экосистемах на изменение экологических и эдафических факторов существенно влияет видовой состав и возраст древесной растительности. Сила этого влияния зависит от развития корневой системы, облиственности и ширины кроны, от количества и качества опада. Наиболее сильное влияние на почвенные процессы оказывают эдификаторные древесные виды растений, которые играют ведущую роль в изменении микроклимата, численности и видового состава микрофлоры и общей динамики питательных элементов в почве.

Важнейшее значение в функционировании искусственных лесных насаждений в степной зоне оказывают такие абиотические факторы среды, как температура приземного слоя воздуха, температура почвы, освещенность, а также влажность почвы.

Эколого-фитоценотическое воздействие БДГ через температуру приземного слоя воздуха и почвы непосредственно влияет на функциональную активность почвенных микроорганизмов. На контрольном целинном участке степного фитоценоза температура воздуха на 9–13°C выше, чем под искусственными лесными насаждениями (табл. 1).

Наиболее существенные отличия отмечаются в дневные часы (15 ч) летних месяцев.

Воздух закономерно меньше прогревается в тех искусственных насаждениях, где больше кустарниковых видов с развитой и густой кроной, например, жимолости татарской в биодендрогруппах 5, 6 и 9 (19.2–26.7°C). В вечерние часы температура воздуха в приземном слое разных объектов существенно снижается и выравнивается. Такой перепад температуры связан с резкой континентальностью климата степной зоны Хакасии.

Температура верхнего слоя почвы характеризуется не такой выраженной контрастностью, как температура воздуха приземного слоя (табл. 2). Меньше прогревается почва под БДГ 5, 6, 9 и 10 (17.8–19.2°C), в которые входят жимолость татарская, сирень и другие виды, затеняющие поверхность почвы. На участке степного фитоценоза температура почвы в это же время составляет 23.1–25.7°C. Плотность древостоя, густота и раскидистость крон древесных и кустарниковых растений напрямую влияют на освещенность в биодендрогруппах. Количество падающего света на участке естественного фитоценоза в несколько раз превышает этот показатель под искусственными насаждениями.

В БДГ № 8 эдификаторным видом является сосна обыкновенная, крона которой более разрежена и ажурна, чем кроны других эдификаторных видов. Здесь зафиксировано наибольшее количество света по сравнению с иными БДГ (табл. 3). Освещенность под БДГ № 9 наименьшая за счет

Таблица 2. Температура почвы в слое 0–10 см ($n = 5$)

№ БДГ	Температура почвы в течение суток, °С			
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	средняя за период исследования
1	18.4	16.9	18.7	18.8
2	18.2	16.0	18.7	18.6
3	17.6	16.7	17.8	18.0
4	17.4	17.1	17.1	18.0
5	17.4	17.3	17.0	17.7
6	17.3	16.6	17.1	17.9
7	17.4	16.7	17.8	18.0
8	17.8	17.2	18.4	18.6
9	17.5	16.5	17.5	17.9
10	17.5	16.8	18.2	18.0
11	22.1	19.7	22.0	22.6

Таблица 3. Освещенность в БДГ ($n = 5$)

№ БДГ	Освещенность, Лк		
	2017 г.	2018 г.	средняя за период исследования
1	7687	5219	6453
2	9576	11158	10367
3	7480	6532	7006
4	8394	6362	7378
5	4437	5131	4784
6	4039	2246	3142
7	3977	4216	4097
8	15456	20075	17766
9	2876	1712	2294
10	8752	8618	8685
11	16562	37795	27179

соподчиненных видов, хорошо облиственных, образующих плотные заросли, сильно затеняющих почву.

В почвах под лесными насаждениями установлено снижение доли бактерий по отношению к микроскопическим грибам (табл. 4).

Наибольшая численность микромицетов зафиксирована в БДГ № 8 и № 9 с хвойными видами, формирующими максимальные запасы подстилки и подкисляющими почву продуктами разложения опада. В почве контрольного участка запасы микробной биомассы заметно меньше, чем в почвах под насаждениями. Под воздействием изменившихся экологических факторов: влажности, температуры почвы, освещенности — изменился структурный состав травянистого покрова под насаждениями за счет появления и увеличения

доли представителей лесного разнотравья. В среднем за три года наибольшее количество разнотравного компонента в травянистом покрове зафиксировано в БДГ № 1, № 3, № 5, № 6. Максимальные запасы микробной биомассы характерны для данных биодендрогрупп с высокой долей кустарниковых видов с хорошей облиственностью и присутствием разнотравного компонента в составе травянистой растительности под кронами.

Количество травянистой фитомассы является одним из показателей продуктивности экосистемы и ее экологической устойчивости. Запасы напочвенного травянистого покрова, его видовое разнообразие, а также образование подстилки — это основные показатели биологической продуктивности и стабильности функционирования экосистемы. В среднем запасы надземной травя-

Таблица 4. Показатели биологической активности почв в слое 0–20 см ($n = 5$)

№ БДГ	Численность (КОЕ, тыс г ⁻¹) в слое 0–20 см		Глубина, см	Запасы микробной биомассы в почве, мг/г почвы			
	бактерий	микромикетов		2016 г.	2017 г.	2018 г.	среднее за период исследования
1	154000	100000	0–20	3.36	3.53	3.38	3.42
			20–40	3.26	3.30	3.08	3.21
2	178000	60000	0–20	3.26	3.19	2.79	3.08
			20–40	2.87	3.08	1.29	2.41
3	124000	20000	0–20	3.61	3.88	3.31	3.60
			20–40	3.21	3.12	3.08	3.14
4	154000	20000	0–20	3.21	3.42	3.03	3.22
			20–40	3.01	3.06	2.79	2.95
5	78000	20000	0–20	3.23	3.55	3.55	3.44
			20–40	3.17	3.39	3.22	3.26
6	196000	20000	0–20	3.31	3.41	3.40	3.37
			20–40	3.30	3.38	3.26	3.31
7	74000	80000	0–20	2.97	3.49	3.1	3.19
			20–40	2.96	2.64	2.91	2.84
8	46000	120000	0–20	3.20	3.29	3.07	3.19
			20–40	3.05	2.99	3.05	3.03
9	72000	100000	0–20	3.15	3.47	3.19	3.27
			20–40	3.11	3.07	2.90	3.03
10	72000	60000	0–20	3.00	3.28	3.05	3.11
			20–40	2.70	3.14	2.70	2.85
11	316000	40000	0–20	2.29	2.49	2.91	2.56
			20–40	1.98	2.22	2.60	2.27

нистой фитомассы под БДГ колеблются от 0.7 до 2.4 т га⁻¹. Самые высокие запасы зафиксированы в биодендрогруппах № 4, № 9 и № 10 с хорошо развитым напочвенным покровом. В них входят кустарниковые виды: сирень, шиповник, спирея, жимолость татарская, создающие оптимальные условия увлажнения и температуры для нарастания и сохранения вегетативной массы травянистых растений.

Формирование подстилки и ее состояние являются основными показателями скорости метаболизма в лесном биоценозе, значительно влияющими на газообмен, проницаемость осадков, образование грибной микрофлоры и обладающими высокой влагоудерживающей способностью. На запасы и структуру подстилки значительно воздействуют экологические факторы, качество и количество опада.

Средние запасы подстилки, формирующейся под БДГ, составляют от 1.2 до 10 т га⁻¹. На всех объектах исследования, кроме БДГ № 1, где edificatorную функцию выполняет вяз, и контрольного участка, отмечено образование подстилки разной мощности и степени разложения. Максимальные запасы подстилки (10.0 т га⁻¹) сформировались в БДГ № 8 под хвойной растительностью (*Pinus sylvestris*), что вполне закономерно.

Установлена слабая корреляционная зависимость между запасами травянистой фитомассы в биодендрогруппах и содержанием в почве влаги, а также нитратного азота. Теснее связь между этими факторами обнаружена при определении почвенных показателей в середине июля, что свидетельствует о более существенной их роли в формировании продуктивности растений в период наиболее активной вегетации.

Более тесные корреляционные связи зафиксированы между запасами травянистой фитомассы и абиотическими факторами.

Так как температура приземного слоя воздуха в сильной степени зависит от освещенности, то достаточно сильная зависимость установлена между запасами травянистой фитомассы и температурой приземного слоя воздуха (рис. 1). В меньшей степени запасы травянистой фитомассы зависят от температуры почвы, однако эта связь достаточно тесная (рис. 2).

Наиболее тесная достоверная корреляционная зависимость была установлена между запасами фитомассы и освещенностью в биодендрогруппах (рис. 3).

Увеличение биологического разнообразия, связанного с изменением абиотических и биотических экологических факторов под воздействием искусственных лесных насаждений, свидетельствует

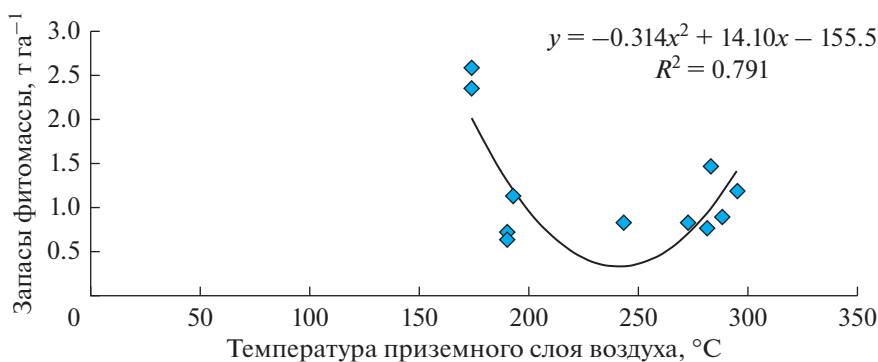


Рис. 1. Зависимость запасов фитомассы от температуры приземного слоя воздуха.

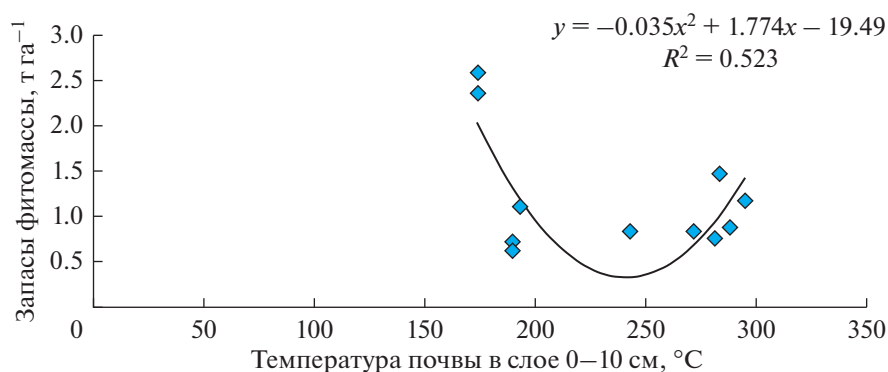


Рис. 2. Зависимость запасов фитомассы от температуры почвы в слое 0–10 см.

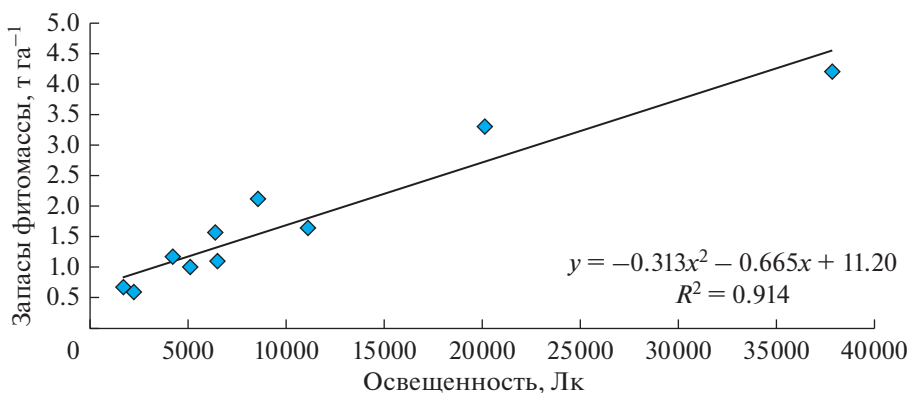


Рис. 3. Зависимость запасов фитомассы от освещенности.

об устойчивости и стабильности формирующихся биоценозов. На участке естественного фитоценоза в травостое преобладает злаковый компонент. Под искусственными насаждениями появились новые виды растительности: представители бобовых (донник (*Melilotus*), клевер краснеющий (*Trifolium rubens* L.)), разнотравье, характерное для лесных фитоценозов (герань лесная (*Geranium sylvaticum* L.), василисник (*Thalictrum*)). Свидетельством трансформации почв под искусственными насаждениями и показателем приобретения ими

“лесных признаков” может служить появление шляпочных грибов.

Древесные виды растений с раскидистой, хорошо облиственной кроной создают оптимальные условия увлажнения и температуры почвы для формирования высоких запасов надземной травянистой фитомассы, увеличивающей видовое разнообразие, существенно повышающих устойчивость искусственных биоценозов и оптимизирующих остальные функции экосистемы. Наличие хвойных видов в составе биодендрогрупп способствует формированию наибольших

запасов подстилки, увеличению численности грибной микрофлоры, образованию мощного грибного мицелия и появлению растительных травянистых видов лесной флоры, нехарактерных для данных условий.

Древесная и кустарниковая растительность биодендрогрупп искусственных лесных насаждений оказывает существенное влияние на формирование эдафических и экологических факторов в условиях сухой степи.

Искусственные лесные насаждения благоприятно воздействуют на структуру и плотность сложения почвы. За счет улучшения условий увлажнения и поступления опада древесной и кустарниковой растительности увеличивается аккумуляция основных питательных элементов и накопление органического вещества в почве. Растения в составе биодендрогрупп способствуют оструктурированию почвы, при этом наибольшее оструктурирующее воздействие оказывают древесные растения.

Наличие эдификаторных хвойных видов древесной растительности в составе биодендрогрупп способствует снижению щелочности почвы, формированию больших запасов подстилки, за счет чего увеличивается численность грибной микрофлоры. Кустарниковые виды растений способствуют аккумуляции подвижных форм питательных элементов в верхнем слое почвы (0–20 см).

Искусственные насаждения в сильной мере влияют на экологические факторы (освещенность, температуру приземного воздуха и почвы), что говорит об изменении микроклимата. Это особенно ощутимо на объектах с густо разросшейся соподчиненной кустарниковой растительностью и с раскидистой, хорошо облиственной кроной, где максимальное влияние на нарастание наземной травянистой фитомассы оказывает освещенность. Наличие хвойных пород в составе биодендрогрупп способствует формированию наибольших запасов подстилки. Древесные породы, наиболее затеняющие почву (осина, черемуха Маака), содействуют удержанию влаги в верхнем слое почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие биодендрогрупп искусственных поливидовых лесных насаждений на почву зависит от наличия эдификаторных видов растений, межвидовых взаимоотношений, развития корневой системы и ризосферы, сказывающихся на биологической активности, круговороте биогенных элементов и изменении свойств почв Ширинской степи.

Сформировавшийся под искусственными лесными насаждениями микроклимат способствует изменению запасов и структуры травянистого покрова, в составе которого не только увеличился раз-

нотравный компонент, но и появились нехарактерные для зоны исследования представители лесной флоры и шляпочные грибы. Под искусственными насаждениями складываются наиболее благоприятный температурный режим и увлажнение для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, о чем свидетельствует наличие грибного мицелия.

Изменение абиотических и биотических факторов и условий под влиянием искусственных лесных насаждений способствует увеличению биологического разнообразия, повышению продуктивности надземной травянистой фитомассы и свидетельствует о формировании устойчивых биоценозов в условиях сухой степи Ширинского района республики Хакасия. Дальнейший мониторинг состояния почв этих уникальных модельных антропогенных экосистем является приоритетной задачей для создания устойчивого ландшафтно-системного обустройства данной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Высоцкий Г.Н. Защитное лесоразведение. Избранные труды. Киев: Наукова думка, 1983. 208 с
- Кулик К.Н. Опустынивание земель и защитное лесоразведение в Российской Федерации // Опустынивание земель и борьба с ним: матер. Межд. научн. конф. 16–19 мая 2006 г. Абакан, 2007. С. 25–29.
- Лобанов А.И. Роль защитных лесных насаждений Ширинской степи (Хакасии) в предотвращении опустынивания // Опустынивание земель и борьба с ним: матер. Межд. научн. конф. 16–19 мая 2006 г. Абакан, 2007. С. 87–94.
- Попова О.С. Древесные растения лесных защитных зеленых насаждений. Красноярск, 2005. 158 с.
- Савин Е.Н. Выращивание лесных полос в степях Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 102 с.
- Савостьянов В.К. Опустынивание на юге Средней Сибири: современное состояние, борьба с ним, использование опустыненных земель, ближайшие задачи // Опустынивание земель и борьба с ним: матер. Межд. научн. конф. 16–19 мая 2006 г. Абакан, 2007. С. 50–57.
- Савостьянов В.К. О деградации почв в регионах Средней Сибири за последние 30–35 лет // Совершенствование ведения сельскохозяйственного производства на опустыненных землях аридной зоны // РАСХН, Сиб. отд., НИИ аграрных проблем Хакасии, Тувинский НИИСХ, НИИ растениеводства и земледелия Монголии. Абакан, 2010. С. 89–95.
- Сорокин Н.Д., Молоков В.А., Москалев А.К. О повышении приживаемости культур лиственницы в степных районах Хакасии // Лесное хозяйство. 1998. № 6. С. 38–40.
- Сорокин Н.Д. Микробиологическая диагностика лесорастительного состояния почв Средней Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 211 с.
- Сорокина О.А., Куулар Ч.И., Фомина Н.В., Сорокин Н.Д. Биогенные показатели почв под искусственными лесными посадками в прибрежной зоне озера Шира // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 5. С. 60–68.
- Чебокаков Е.Я. Совершенствование почвозащитного степного земледелия Хакасии. Абакан, 2019. 276 с.

Artificial Forest Stands' Impact on Soils' Biological Activity in Khakassian Steppes

O. A. Sorokina*

Krasnoyarsk State Agrarian University, Mira ave., 90, Krasnoyarsk, 660049 Russia

*E-mail: geos0412@mail.ru

Artificial afforestation is especially important for dry steppe regions, where forests perform complex soil-protective, climate-forming, health-improving and aesthetic functions. Therefore, in 1975–1978 in the Shirinskaya dry steppe of the Republic of Khakassia on the premises of the Sukachev's Institute of Forestry, several experimental artificial multispecific plantations of tree and shrub species were created. The studies were carried out in ten biodendrogroups (BDG) of the Shirinskaya steppe. For comparison, a site of a virgin natural steppe phytocenosis, located in close proximity, was taken. The purpose of these studies was to study the influence of tree and shrub vegetation on the edaphic conditions change, the ground cover succession, and the change in the soil functioning regime. The maximum positive effect on the biogenic indicators functional activity is exerted by BDG with edificatory coniferous species, under the crowns of which subordinate shrubs with a sufficient amount of leaves develop. Artificial forest plantations contribute to the formation of litter and an increase in the micromycetes' proportion. A correlation was established between abiotic factors, especially illumination, and the growth of terrestrial herbaceous phytomass. Changes in ecological and phytocenotic factors contribute to an increase in biological diversity by optimizing the phytomass reserves and structure, and the emergence of new herbaceous vegetation types. Thus, ecologically stable artificial forest biocenoses can form under the dry steppe conditions.

Keywords: *biodendrogroups, artificial forest stands, abiotic factors, soil temperature, air temperature, luminance, phytomass, micromycetes, microorganisms' biomass, correlation, biodiversity.*

REFERENCES

- Chebochakov E.Y., *Sovershenstvovanie pochvozashchitnogo stepnogo zemledeliya Khakasii* (Improvement of soil-protective steppe agriculture in Khakassia), Abakan: FGBNU "Nauchno-issledovatel'skii institut agrarnykh problem Khakasii", 2019, 276 p.
- Kulik K.N., *Opustynivanie zemel' i zashchitnoe lesorazvedenie v Rossiiskoi Federatsii* (Desertification of lands and protective afforestation in the Russian Federation), *Opustynivanie zemel' i bor'ba s nim* (Desertification of lands and the fight against it), Abakan, Proc. of International Sci. Conf., May 16–19, 2006, Abakan, 2007, pp. 25–29.
- Lobanov A.I., *Rol' zashchitnykh lesnykh nasazhdenii Shirinskoi stepi (Khakasii) v predotvrashchenii opustynivaniya* (The role of protective forest plantations of the Shirinskaya steppe (Khakassia) in the prevention of desertification), *Opustynivanie zemel' i bor'ba s nim* (Desertification of lands and the fight against it), Abakan, Proc. of International sci. Conf., May 16–19, 2006, Abakan, 2007, pp. 87–94.
- Popova O.S., *Drevesnye rasteniya lesnykh zashchitnykh zelenykh nasazhdenii* (Woody plants of forest protective green planting), Krasnoyarsk: Krasnoyar. gos. agrar. un-t., 2005, 158 p.
- Savin E.N., *Vyrashchivanie lesnykh polos v stepyakh Sibiri* (Growing forest belts in the steppes of Siberia), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2001, 102 p.
- Savost'yanov V.K., *O degradatsii pochv v regionakh Srednei Sibiri za poslednie 30–35 let* (On soil degradation in the regions of Central Siberia over the past 30–35 years), In: *Sovershenstvovanie vedeniya sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva na opustynennykh zemlyakh aridnoi zony* (Improvement of agricultural production on the desert lands of the arid zone), Abakan: RASKhN, Sib. otd., NII agrarnykh problem Khakasii, Tuvinskii NIISKh, NII rastenievodstva i zemledeliya Mongolii, 2010, pp. 89–95.
- Savost'yanov V.K., *Opustynivanie na yuge Srednei Sibiri: sovremennoe sostoyanie, bor'ba s nim, ispol'zovanie opustynennykh zemel', blizhaishie zadachi* (Desertification in the south of Central Siberia: the current state, the fight against it, the use of deserted lands, the immediate tasks), *Opustynivanie zemel' i bor'ba s nim* (Desertification of lands and the fight against it), Abakan, Proc. of International sci. Conf., May 16–19, 2006, Abakan, 2007, pp. 50–57.
- Sorokin N.D., *Mikrobiologicheskaya diagnostika lesorastitel'nogo sostoyaniya pochv Srednei Sibiri* (Microbiological diagnostics of the soil of forest sites in the Central Siberia), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009, 211 p.
- Sorokin N.D., Molokov V.A., Moskalev A.K., *O povyshenii prizhivaemosti kul'tur listvennitsy v stepnykh raionakh Khakasii* (On increasing the survival rate of larch crops in the steppe regions of Khakassia), *Lesnoe khozyaistvo*, 1998, No. 6, pp. 38–40.
- Sorokina O.A., Kuular C.I., Fomina N.V., Sorokin N.D., *Biogennye pokazateli pochv pod iskusstvennymi lesnymi posadkami v pribrezhnoi zone ozera Shira* (Soil biogenic indices under artificial forest plantations in the Lake Shira coastal zone), *Vestn. KrasGAU*, 2013, No. 5, pp. 60–68.
- Vysotskii G.N., *Zashchitnoe lesorazvedenie* (Protective silviculture), Kiev: Naukova dumka, 1983, 208 p.

УДК 595.782+582.623

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛЕВОЙ МОЛИ-ПЕСТРЯНКИ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ КОРМОВОГО РАСТЕНИЯ В г. ИЖЕВСКЕ

© 2023 г. И. В. Ермолаев^а, *, Н. Г. Зыкина^б

^аБотанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, Екатеринбург, 620130 Россия

^бУдмуртский государственный университет, ул. Университетская, д. 1, Ижевск, 426034 Россия

*E-mail: ermolaev-i@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2021 г.

После доработки 23.12.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Оценили влияние высоких плотностей заселения тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populi-foliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae)) в хроническом очаге минера на радиальный прирост его кормового растения — тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Работу провели в 2018 г. в г. Ижевске. Показано достоверное негативное влияние высоких плотностей минера на продуктивность дерева-хозяина. Результаты исследования позволяют отнести *Ph. populi-foliella* к группе экономически значимых филлофагов тополя и свидетельствуют о необходимости ведения мониторинга состоянием ее популяций.

Ключевые слова: тополевая моль-пестрянка, *Phyllonorycter populi-foliella*, радиальный прирост.

DOI: 10.31857/S0024114823010059, **EDN:** NGKPXU

Формирование устойчивых полифункциональных городских насаждений представляет значительный практический и теоретический интерес. Одним из важных направлений этой работы является исследование взаимодействий в системе “растение — фитофаг”. В своей основе насекомые-фитофаги зеленых насаждений городов являются типичными представителями лесных экосистем, имеющие трофические связи с определенными группами пород (Кривошеина, 1992). Классическим примером такого фитофага является тополевая моль-пестрянка.

Тополевая моль-пестрянка *Phyllonorycter populi-foliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae) — аборигенный евроазиатский вид. Минер широко распространен в Европе, на Урале, в Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, а также в Западной, Средней, Южной и Восточной Азии. В 2017–2018 гг. вид был обнаружен в Индии (в области Ладакх (Ladakh)) (Shashank et al., 2021).

Ph. populi-foliella является узким олигофагом, способным проходить развитие на видах рода *Populus* (Ермолаев и др., 2020). При этом устойчивость тополей по отношению к минеру снижается в ряду: белые тополя *Populus* (тополь белый (*P. alba* L.)), тополь дрожащий (*P. tremula* L.)) — дельтовидные тополя *Aigeiros* (тополь черный (*P. nigra* L.)), тополь дельтовидный (*P. deltoides*)) — бальзамические тополя *Tacamahaca* (такие как тополь бальза-

мический, тополь корейский (*P. koreana*), тополь лавролистный (*P. laurifolia*), тополь Максимовича (*P. maximowiczii*), тополь душистый (*P. suaveolens*)) (Ермолаев и др., 2020).

Несмотря на эвритопность, *Ph. populi-foliella* часто образует хронические очаги в городах. Продолжительность существования таких очагов может составлять до десяти и более лет. Например, в Москве проблемы с минером существовали как минимум на протяжении 30–40 лет XX в (Ермолаев, 2019). Одна из самых длительных вспышек здесь продолжалась 16 лет (1974–1989 гг.), при этом в 1979–1985 гг. моль имела коэффициент размножения, близкий к единице (Белова, 1994). Экологические механизмы существования хронических очагов *Ph. populi-foliella* в городах были рассмотрены нами ранее (Ермолаев, 2019).

Цель представленной работы — оценить влияние высоких плотностей *Ph. populi-foliella* в хроническом очаге минера на радиальный прирост дерева-хозяина в г. Ижевске.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Влияние различных плотностей заселения тополевой моли-пестрянки на радиальный прирост тополя бальзамического оценили на примере г. Ижевска. В мае 2018 г. выбрали 10 пробных площадей в центре города (на месте существования очага 2000–2010 гг.) (рис. 1) и 10 пробных площа-

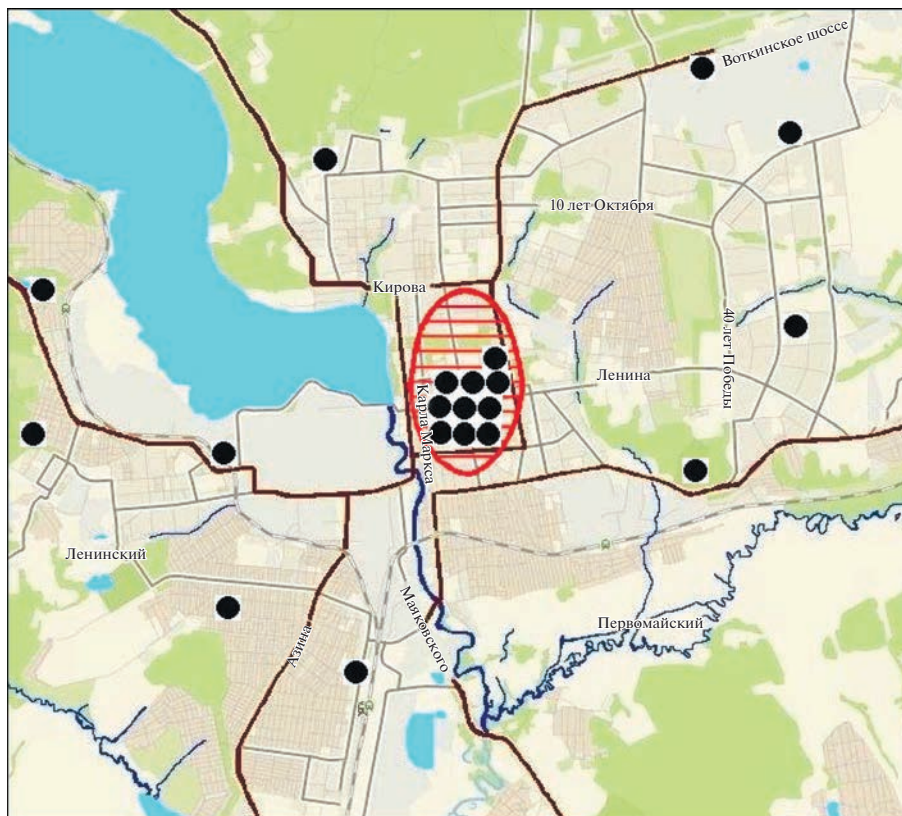


Рис. 1. Хронический очаг тополевой моли-пестрянки *Ph. populifolella* в Ижевске (2000–2010 гг.).

дей на его периферии. На каждой пробной площади было отобрано по 10 деревьев без следов формирования кроны. Высоту дерева определяли с помощью электронного клинометра Haglöf EC II, диаметр на высоте 1.3 м — мерной вилкой Mantax Blue (800 мм) Haglöf. Высота деревьев в центре города — 22.7 ± 0.5 м, диаметр на уровне груди — 55.7 ± 1.7 см ($n = 100$). Высота деревьев на периферии города — 24.5 ± 0.4 м, диаметр на уровне груди — 58.0 ± 1.2 см ($n = 100$). В соответствии с существующей методикой (Шиятов и др., 2000), в июне 2018 г. с северной экспозиции каждого модельного дерева на высоте 1.3 м буровом Haglöf были взяты керны. Керны были приклеены на подложку и тщательно отшлифованы. Ширина годовичных колец была измерена микрометром под оптикой.

В июле 2018 г. с каждой пробной площади методом конверта были отобраны образцы почв. Агрохимический анализ почв проведен в почвенной экологии Удмуртского государственного университета Н.Г. Зыкиной. Определяли следующие агрохимические показатели: содержание органического вещества (гумуса) по И.В. Тюрину в модификации В.Н. Семакова (ГОСТ 26213-91); обменную кислотность (рН) в растворе KCl — потенциометрически (ГОСТ 26483-91); гидролитическую кислотность (Н, ммоль/100 г почвы) — потенциометриче-

ски, по Каппену (ГОСТ 26212-91); сумму поглощенных оснований (S, ммоль/100 г почвы) — по Каппену-Гильковицу (ГОСТ 27821-88). Расчет степени насыщенности основаниями (V, %) проводили по сумме поглощенных оснований и гидротитической кислотности; содержание подвижных форм фосфора и калия (мг/кг почвы) — по Кирсанову (ГОСТ 26207-91). Для более точного определения значений агрохимических показателей (гумус, P_2O_5 , K_2O) каждый образец анализировали в двух повторностях с последующим вычислением среднего арифметического значения.

Во всех случаях рассчитывали среднеарифметическое значение и его ошибку. Статистическую обработку материала проводили стандартными методами (Ивантер, Коросов, 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Хронический очаг *Ph. populifolella* в г. Ижевске функционировал на площади около 363 га в течение 2000–2010 гг. (Ермолаев, Трубицын, 2008; Ермолаев и др., 2011) и был связан с историческим центром города (рис. 1). Вследствие экстремально жаркого лета 2010 г. плотность заселения минером тополей упала до нуля (Ermolaev et al., 2016). Ранее функционирование очагов *Ph. populi-*

Таблица 1. Характеристика почв центра и периферии г. Ижевска

Характеристика	Центр	Периферия
Обменная кислотность (pH_{KCl})	7.2 ± 0.1 A	6.9 ± 0.1 A
Содержание подвижных форм фосфора, мг/кг почвы	845.7 ± 158.7 B	254.0 ± 34.3 B
Содержание подвижных форм калия, мг/кг почвы	234.3 ± 23.0 C	160.7 ± 20.0 C
Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г почвы	0.33 ± 0.03 D	0.48 ± 0.06 D
Сумма поглощенных оснований, ммоль/100 г почвы	37.1 ± 1.1	29.8 ± 3.6
Содержание гумуса, %	4.1 ± 0.4	4.0 ± 0.7

Примечание. Достоверные различия ($P < 0.05$) отмечены одинаковыми буквами. Во всех случаях $n = 10$.

folella в центральной части города было показано на примере Минска (Чумаков, Лозинская, 2015), Москвы (Сулханов, 1992), Екатеринбурга (Данилова, 1981), Кемерово (Еремеева, 2008). Именно в центре города создается уникальное сочетание эффектов теплового загрязнения, значительной концентрации кормовых растений и снижения эффективности энтомофагов *Ph. populifolella* (Ермолаев, 2019).

Дефолиация тополя *Ph. populifolella* является раннелетней, частичной и ежегодной. Развитие гусеницы происходит преимущественно в минах с нижней стороны листа. Несмотря на то, что плотность заселения дерева минером в центре города может составлять 20–30 мин на лист, общее сокращение ассимиляционной поверхности листа редко составляет 100%. Обычно растение теряет чуть более 70 (Чумаков, Лозинская, 2015) – 90% (Григорьев и др., 2005). Содержание хлорофилла в листьях, поврежденных чешуекрылым-минером, снижается прямо пропорционально численности мин. Последнее было выявлено на примере взаимодействия яблони и моли-малютки (*Stigmella malella* Stt. (Холченков, 1976)). При этом особое влияние на физиологию растения-хозяина оказывает расположение мины на листе (сверху или снизу). Это убедительно показано на примере *Phyllocnistis populiella* Chambers (Gracillariidae) (Wagner et al., 2008). Этот минер может образовывать длинные змеевидные эпидермальные (под кутикулой без повреждения паренхимы) мины как с верхней, так и с нижней стороны листа тополя. Достоверно негативный эффект на фотосинтез листа оказывают только мины с нижней стороны. По всей вероятности, это связано с нарушением работы клеток устьиц (Welter, 1989), находящихся на этой стороне листа тополя. Последнее обстоятельство влияет на транспирацию и, следовательно, на водный обмен и фотосинтез листа (Кузнецов, Дмитриева, 2005).

Повреждение тополя гусеницами *Ph. populifoliella* может индуцировать преждевременное опадение листьев дерева. Листья, сильно поврежденные гусеницами *Ph. populifoliella*, усыхают, скру-

чиваются и со второй половины июля в массе опадают. Количество опавших листьев положительно и достоверно связано с плотностью заселения дерева-хозяина (Турова, 1998).

Формирование городской почвы обусловлено интенсивным накоплением антропогенных отложений (культурного слоя) особого состава и строения (Александровский, Александровская, 2005). Почвы центра г. Ижевска (в отличие от периферии города) являются щелочными, имеют достоверно большее содержание подвижных форм фосфора и калия, а также катионов (табл. 1). Все показанные изменения в почве, вероятно, носят общий характер для городов и связаны с процессами загрязнения почв (например, строительными материалами, органическими веществами (прежде всего древесиной), техногенными элементами, костными остатками животных) (Александровский и др., 2015).

Историческое изменение почвенных условий в центре города, по всей вероятности, может оказывать положительное влияние на радиальный прирост тополя. В результате в годы отсутствия *Ph. populifoliella* эти деревья дают достоверно ($P < 0.05$) больший радиальный прирост по сравнению с деревьями с периферии города (рис. 2). В годы существования очага минера (в нашем случае 2000–2010 гг.) радиальные приросты этих двух групп деревьев были сопоставимы. Наши данные дополняют материалы, полученные ранее в Санкт-Петербурге (Буй Динь Дык и др., 2021). Авторы показали негативное влияние высоких плотностей заселения *Ph. populifoliella* в 1991–1998 гг. на радиальный прирост тополя белого и берлинского (*P. × berolinensis*) (Буй Динь Дык и др., 2021)).

Хроническое повреждение тополя *Ph. populifoliella* может снижать резистентность дерева к патогенам. Так, вспышка массового размножения 1992–1999 гг. минера в г. Санкт-Петербурге привела к ослаблению растений и развитию на них цитоспороза. В результате в 2000–2005 гг. произошла массовая гибель тополей в пригородах города (Селиховский и др., 2012, 2018).

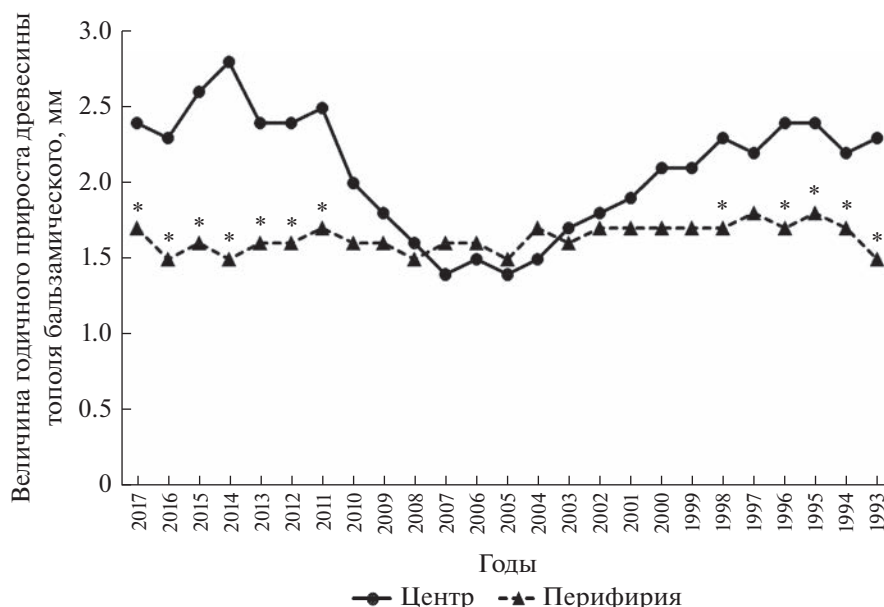


Рис. 2. Динамика прироста по диаметру тополя бальзамического в центре и периферии г. Ижевска (в каждом случае $n = 100$). Достоверные различия ($P < 0.05$) отмечены звездочками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хроническая дефолиация тополей *Ph. populifoliella* оказывает достоверное и негативное влияние на радиальный прирост кормового растения. Результаты исследования позволяют отнести минера к группе экономически значимых филлофагов тополя и свидетельствуют о необходимости ведения мониторинга состоянием ее городских популяций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.Ю. Синеву, С.В. Барышниковой (Зоологический институт РАН) и А.В. Селиховкину (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет) за поддержку работы на разных этапах ее реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
- Александровский А.Л., Александровская Е.И., Долгих А.В., Замотаев И.В., Курбатова А.Н. Почвы и культурные слои древних городов юга Европейской России // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1291–1301.
- Белова Н.К. Вредители городских зеленых насаждений // Защита растений. 1994. № 8. С. 37–38.
- Буй Динь Дык, Леонтьев Л.Л., Барышникова С.В., Селиховкин А.В. Последствия массового размножения тополевой нижнесторонней моли-пестрянки и других минирующих микрохешуекрылых в Санкт-Петербурге // Лесоведение. 2021. № 4. С. 372–378.
- Григорьев Ю.С., Пахарькова Н.В., Г.А. Сорокина Г.А. Сезонные изменения фотосинтетической активности древесных растений в условиях загрязнения воздушной среды // Природная и антропогенная динамика наземных экосистем. Материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающегося исследователя лесов Сибири А.С. Рожкова (1925–2005 гг.) (Иркутск, 11–15 октября 2005 г.). Иркутск: ИрГТУ, 2005. С. 517–520.
- Данилова А.П. Распространение тополевой моли в зеленых насаждениях Свердловска // Фауна Урала и Европейского Севера. Свердловск: УрГУ, 1981. № 9. С. 122–128.
- Еремеева Н.И. Факторы регуляции состояния городских популяций тополевой моли *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Lepidoptera, Gracillariidae) // Известия Санкт-Петербургской лесохозяйственной академии. 2008. № 182. С. 104–112.
- Ермолаев И.В. Экологические механизмы непериодической популяционной волны на примере тополевой моли-пестрянки — *Phyllonorycter populifoliella* (Lepidoptera, Gracillariidae) // Журн. общей биологии. 2019. Т. 80. № 6. С. 451–476.
- Ермолаев И.В., Трубицын А.В. Опыт картографирования очагов тополевой моли-пестрянки в г. Ижевске // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. СПб.: СПбГЛТА, 2008. № 185. С. 61–65.
- Ермолаев И.В., Сунцова Н.Ю., Трубицын А.В. Трофические предпочтения тополевой моли-пестрянки // Защита и карантин растений. 2011. № 8. С. 50.
- Ермолаев И.В., Рублева Е.А., Рысин С.Л., Коженкова А.А., Ермолаева М.В. Трофическая специализация тополевой моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae) // Энтомологическое обозрение. 2020. Т. 99. № 2. С. 271–288.

- Ивантер Э.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: ПетрГУ, 2011. 302 с.
- Кривошеина Н.П. Современные представления о насекомых — дендробионтах городских экосистем // Дендробионтные насекомые зеленых насаждений г. Москвы. М.: Наука, 1992. С. 5–51.
- Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2005. 736 с.
- Селиховкин А.В., Денисова Н.В., Тимофеева Ю.А. Динамика плотности популяций минирующих микрочешуекрылых в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. № 200. С. 148–159.
- Селиховкин А.В., Барышникова С.В., Денисова Н.В., Тимофеева Ю.А. Видовой состав и динамика плотности популяций доминирующих чешуекрылых-дендрофагов (Lepidoptera) в Санкт-Петербурге и его окрестностях // Энтомологическое обозрение. 2018. Т. 97. № 4. С. 617–639.
- Сулханов А.В. Экология городских популяций тополевой моли *Lithocolletis populifoliella* Tr. // Дендробионтные насекомые зеленых насаждений г. Москвы. М.: Наука, 1992. С. 70–97.
- Турова Ю.Н. Опадение листьев тополя — существенный фактор смертности минёра *Lithocolletis populifoliella* Tr. // Энтомологические исследования в Сибири. Красноярск: КФ РЭО. 1998. С. 70–73.
- Холченков В.А. Минирующие моли — вредители плодовых культур Крыма (фауна, биология, меры борьбы): Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.09. Харьков: Харьковский сельскохозяйственный институт, 1976. 20 с.
- Чумаков Л.С., Лозинская О.В. Экологическая оценка поражения насаждений тополя тополевой минирующей молью (*Lithocolletis populifoliella* Tr.) в городе Минске // Экологический вестник. 2015. № 1. С. 94–101.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
- Ermolaev I.V., Yefremova Z.A., Trubitsyn A.V. Parasitoids of *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) on *Populus balsamifera* L. (Salicaceae) in western European Russia (Lepidoptera: Gracillariidae) // SHILAP Revista de lepidopterologia. 2016. V. 44. P. 303–312.
- Shashank P.R., Singh N., Harshana A., Sinha T., Kirichenko N. First report of the poplar leaf miner, *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke) (Lepidoptera: Gracillariidae) from India // Zootaxa. 2021. V. 4915. № 3. P. 435–450.
- Wagner D., DeFoliart L., Doak P., Schneiderheinze J. Impact of epidermal leaf mining by the aspen leaf miner (*Phyllocnistis populiella*) on the grow, physiology, and leaf longevity of quaking aspen // Oecologia. 2008. V. 157. № 2. P. 259–267.
- Welter S.C. Arthropod impact and plant gas exchange // Insect-plant Interactions. CRC Press, Boca Raton, 1989. V. 1. P. 135–150.

The Influence of a Poplar Leaf Miner on the Radial Growth of the Fodder Plant in Izhevsk City

I. V. Ermolaev^{1, *} and N. G. Zykina²

¹Institute Botanic Garden, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620130 Russia

²Udmurt State University, Izhevsk, 426034 Russia

*E-mail: ermolaev-i@yandex.ru

The assessment was conducted regarding the influence of high population density of the *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) leaf miner (Lepidoptera, Gracillariidae) in sustained outbreaks on radial growth of poplar (*Populus balsamifera* L.). The study was carried out in 2018 in Izhevsk town. A significant negative affect of the miner's high densities on the host tree's productivity has been shown. The results of the research allow us to consider *Ph. populifoliella* an economically significant poplar phyllophages and indicate the need to monitor the state of its populations.

Keywords: poplar leaf miner, *Phyllonorycter populifoliella*, radial growth.

REFERENCES

- Aleksandrovskii A.L., Aleksandrovskaya E.I., Dolgikh A.V., Zamotaev I.V., Kurbatova A.N., Soils and cultural layers of ancient cities in the south of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 11, pp. 1171–1181.
- Aleksandrovskii A.L., Aleksandrovskaya E.I., *Evolutsiya pochv i geograficheskaya sreda* (Soil evolution and geographic environment), Moscow: Nauka, 2005, 223 p.
- Belova N.K., Vrediteli gorodskikh zelenykh nasazhdenii (Pests of urban green spaces), *Zashchita rastenii*, 1994, No. 8, pp. 37–38.
- Bui D.D., Leont'ev L.L., Baryshnikova S.V., Selikhovkin A.V., Posledstviya massovogo razmnozheniya topolevoi nizhnestoronnei moli-pestryanki i drugih miniruyushchikh mikrocheshuekrylykh v Sankt-Peterburge (Consequences of the mass reproduction of the Poplar Moth *Phyllonorycter populifoliella* and other mining moths in St. Petersburg), *Lesovedenie*, 2021, No. 4, pp. 372–378.
- Chumakov L.S., Lozinskaya O.V., *Ekologicheskaya otsenka porazheniya nasazhdenii topolya topolevoi miniruyushchei mol'yu* (*Lithocolletis populifoliella* Tr.) v gorode Minске (Ecological evaluation of poplar plantings' affection by

- Lithocolletis populifoliella Tr. in Minsk), *Ekologicheskii vestnik Uzbekistana*, 2015, No. 1, pp. 94–101.
- Danilova A.P., Rasprostranenie topolevoi moli v zelenykh nasazhdeniyakh Sverdlovsk (Distribution of the poplar moth in the green spaces of Sverdlovsk), In: *Fauna Urala i Evropeiskogo Severa* (Fauna of the Urals and the European North), Sverdlovsk: UrGU, 1981, No. 9, pp. 122–128.
- Eremeeva N.I., Faktory regulyatsii sostoyaniya gorodskikh populyatsii topolevoi moli *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Lepidoptera, Gracillariidae) (Factors of regulation of city populations *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Lepidoptera, Gracillariidae)), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesokhozyaystvennoi akademii*, 2008, No. 182, pp. 104–112.
- Ermolaev I.V., Ekologicheskie mekhanizmy neperiodicheskoi populyatsionnoi volny na primere topolevoi moli-pestryanki *Phyllonorycter populifoliella* (Lepidoptera, Gracillariidae) (Ecological mechanisms of nonperiodical population wave: a case study of the poplar leafminer – *Phyllonorycter populifoliella* (Lepidoptera, Gracillariidae)), *Zhurnal obshchei biologii*, 2019, Vol. 10, No. 5, pp. 451–476.
- Ermolaev I.V., Rubleva E.A., Rysin S.L., Kozhenkova A.A., Ermolaeva M.V., Troficheskaya spetsializatsiya topolevoi moli-pestryanki *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae) (Trophic specialization of the poplar leafminer *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae)), *Entomologicheskoe obozrenie*, 2020, Vol. 99, No. 2, pp. 271–288.
- Ermolaev I.V., Suntsova N.Y., Trubitsyn A.V., Troficheskie predpochteniya topolevoi moli-pestryanki (Nutritional preferences of *Lithocolletis populiella*), *Zashchita i karantin rastenii*, 2011, No. 8, pp. 50.
- Ermolaev I.V., Trubitsyn A.V., Opyt kartografirovaniya ochagov topolevoi moli-pestryanki v g. Izhevsk (The experience of mapping of the poplar leafblotch miner outbreaks in Izhevsk), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2008, No. 185, pp. 61–65.
- Ermolaev I.V., Yefremova Z.A., Trubitsyn A.V., Parasitoids of *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) on *Populus balsamifera* L. (Salicaceae) in western European Russia (Lepidoptera: Gracillariidae), *SHILAP Revista de lepidopterologia*, 2016, Vol. 44, pp. 303–312.
- Grigor'ev Y.S., Pakhar'kova N.V., Sorokina G.A., Sezonnye izmeneniya fotosinteticheskoi aktivnosti drevesnykh rastenii v usloviyakh zagryazneniya vozdukhnoi sredy (Seasonal changes in the photosynthetic activity of woody plants under air pollution), *Prirodnaya i antropogennaya dinamika nazemnykh ekosistem* (Natural and anthropogenic dynamics of terrestrial ecosystems), Irkutsk, Proc. of All-Russian Conf., October 11–15, 2005, Irkutsk: IrGTU, 2005, pp. 517–520.
- Ivanter E.V., Korosov A.V., *Vvedenie v kolichestvennyuyu biologiyu* (Introduction to Quantitative Biology), Petrozavodsk: PetrGU, 2011, 302 p.
- Kholchenkov V.A., *Miniruyushchie moli – vrediteli plodovykh kul'tur Kryma (fauna, biologiya, mery bor'by)*. Avtoref. diss. kand. biol. nauk. (Mining moths – pests of fruit crops of the Crimea (fauna, biology, control measures). Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Kharkiv: Khar'kovskii sel'skokhozyaistvennyi institut, 1976, 20 p.
- Krivosheina N.P., Sovremennye predstavleniya o nasekomykh – dendrobiontakh gorodskikh ekosistem (Modern introduction about insects – dendrobionts of urban ecosystems), In: *Dendrobiontnye nasekomye zelenykh nasazhdenii g. Moskvy* (Dendrobiont insects of green spaces in Moscow), Moscow: Nauka, 1992, pp. 5–51.
- Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A., *Fiziologiya rastenii* (Plant physiology), Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 736 p.
- Selikhovkin A.V., Baryshnikova S.V., Denisova N.V., Timofeeva Y.A., Vidovoi sostav i dinamika plotnosti populyatsii dominiruyushchikh cheshuekrylykh-dendrofagov v Sankt-Peterburge i ego okrestnostyakh (Species composition and population dynamics of dominant dendrophagous moths (Lepidoptera) in St. Petersburg and its environs), *Entomologicheskoe obozrenie*, 2018, Vol. 97, No. 4, pp. 617–639.
- Selikhovkin A.V., Denisova N.V., Timofeeva Y.A., Dinamika plotnosti populyatsii miniruyushchikh mikrocheshuekrylykh v Sankt-Peterburge (Population dynamics of mining Microlepidoptera in Saint-Petersburg), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2012, No. 200, pp. 148–159.
- Shashank P.R., Singh N., Harshana A., Sinha T., Kirichenko N., First report of the poplar leaf miner, *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke) (Lepidoptera: Gracillariidae) from India, *Zootaxa*, 2021, Vol. 4915, No. 3, pp. 435–450.
- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., *Metody dendrokronologii. Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesnokol'tsevoi informatsii* (Methods of dendrochronology. Fundamental of dendrochronology. Collection of data from tree-rings), Krasnoyarsk: Izd-vo KrasGU, 2000, Vol. 1, 81 p.
- Sulkhanov A.V., Ekologiya gorodskikh populyatsii topolevoi moli *Lithocolletis populifoliella* Tr. (Lithocolletis populifoliella Tr urban populations ecology.), In: *Dendrobiontnye nasekomye zelenykh nasazhdenii g. Moskvy* (Dendrobiont insects of green spaces in Moscow), Moscow: Nauka, 1992, pp. 70–97.
- Turova Y.N., Opadenie list'ev topolya – sushchestvennyi faktor smertnosti minera *Lithocolletis populifoliella* Tr. (Falling of poplar leaves is a significant factor in the mortality of the miner *Lithocolletis populifoliella* Tr.), In: *Entomologicheskie issledovaniya v Sibiri* (Entomological research in Siberia), Krasnoyarsk: KF REO, 1998, pp. 70–73.
- Wagner D., DeFoliart L., Doak P., Schneiderheinze J., Impact of epidermal leaf mining by the aspen leaf miner (*Phyllocnistis populiella*) on the grow, physiology, and leaf longevity of quaking aspen, *Oecologia*, 2008, Vol. 157, No. 2, pp. 259–267.
- Welter S.C., Arthropod impact and plant gas exchange, In: *Insect-plant Interactions*, CRC Press, Boca Raton, 1989, Vol. 1, pp. 135–150.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2022 ГОД

DOI: 10.31857/S0024114823010035, EDN: NGGVMK

Автор(ы), название	Номер	Стр.
Аганина Ю.Е. См. Тарханов С.Н. и др.	1	72–84
Алейников А.А. См. Букварева Е.Н. и др.	6	595–616
Антонов Г.И. См. Гродницкая И.Д. и др.	3	270–284
Ахметова Г.В. Пространственная неоднородность химического состава лесных подстилок сосновых насаждений средней тайги Восточной Фенноскандии	3	250–261
Бавшин И.М. См. Шопина О.В. и др.	5	478–493
Бакиров Н.Ж., Новицкий З.Б., Хамзаев А.Х. Методы создания лесных насаждений на высохшем дне Аральского моря	3	312–320
Барченков А.П. См. Скрипальщикова Л.Н. и др.	1	61–71
Бахмет О.Н., Медведева М.В. Разложение опада хвои в почвах лесных культур сосны Восточной Фенноскандии	3	239–249
Бахмет О.Н., Медведева М.В., Мошкина Е.В., Ткаченко Ю.Н., Мамай А.В., Новиков С.Г., Мошников С.А., Тимофеева В.В., Карпечко А.Ю. Пространственная вариабельность свойств подзолов в зависимости от растительных микрогруппировок в сосняке брусничном	1	47–60
Бахмет О.Н. См. Мошкина Е.В. и др.	4	351–363
Белонская Е.А., Кренке А.Н., Тишков А.А., Царевская Н.Г., Хмельщикова И.Г. Фрагментация и разнообразие лесов национального парка “Валдайский”	6	658–673
Беляева Н.Г., Морозова О.В., Черненко Т.В., Корзников К.А., Сулова Е.Г. Мелколиственные леса центра Русской равнины: экология и перспективы возобновления коренных сообществ	2	115–131
Беляева Н.Г. См. Черненко Т.В. и др.	6	617–630
Березин Г.В. См. Шорохова Е.В. и др.	6	643–657
Беспалова В.В. История изменений в экономической оценке лесных ресурсов для финансирования лесного хозяйства Российской Федерации	2	213–224
Бондарчук С.Н. См. Иванов А.В. и др.	2	132–143
Бочарников М.В., Виноградов А.А. Картографирование фитоценотического разнообразия горнотаежных лесов Северо-Восточного Забайкалья	5	461–477
Бочарников М.В. См. Огуреева Г.Н. и др.	6	687–702
Брянин С.В., Данилов А.В., Сулопарова Е.С., Иванов А.В. Пулы пирогенного углерода лесных почв Верхнего Приамурья	3	285–296
Брянин С.В. См. Иванов А.В. и др.	6	703–712
Букварева Е.Н., Алейников А.А., Климанова О.А., Титова Л.А., Свиридова Т.В., Щербаков А.В. Оценка и приоритизация территорий для сохранения биоразнообразия на примере центра Европейской части России	6	595–616
Быховец С.С. См. Зубкова Е.В. и др.	1	34–46
Ван П.С. См. Шарая Л.С., Ван П.С.	2	188–198
Виноградов А.А. См. Бочарников М.В., Виноградов А.А.	5	461–477
Виноградов А.А. См. Огуреева Г.Н. и др.	6	687–702

Автор(ы), название	Номер	Стр.
Высоцкий А.А., Исаков Ю.Н., Комарова О.В. Смолопродуктивность потомств сосны обыкновенной разных селекционных категорий	5	540–548
Герасимова М.И. См. Шопина О.В. и др.	5	478–493
Глухова Т.В. См. Стороженко В.Г., Глухова Т.В.	5	494–503
Глушко С.Г., Комарова Т.А., Прохоренко Н.Б. Формирование молодняков после рубок и пожаров в темнохвойных осоково-папоротниковых лесах южного Сихотэ-Алиня	2	144–156
Гончарова И.А. См. Скрипальщикова Л.Н. и др.	1	61–71
Грабовский В.И. См. Честных О.В. и др.	3	227–238
Гродницкая И.Д., Сенашова В.А., Антонов Г.И., Пашкеева Э.О. Микробиологическая индикация почв лесных посадок в Ширинской степи	3	270–284
Гулий С.А., Скачков Ю.Б., Рожина М.С. Анализ причин продолжающегося формирования многолетней мерзлоты под хвойными лесами в условиях глобального потепления	4	419–431
Данилин И.М. См. Усольцев В.А. и др.	5	451–460
Данилов А.В. См. Брянин С.В. и др.	3	285–296
Дарман Г.Ф. См. Иванов А.В. и др.	6	703–712
Енчилик П.Р., Семенков И.Н. Пространственная изменчивость элементного состава почв в катене Центрально-лесного заповедника	4	407–418
Епринцев С.А. См. Калаев В.Н. и др.	2	172–187
Замолодчиков Д.Г. См. Иванов А.В. и др.	2	132–143
Замолодчиков Д.Г. См. Честных О.В. и др.	3	227–238
Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Мостовая А.С. Влияние лесных посадок на эмиссию диоксида углерода из почвы в Поволжье и Подонье	4	339–350
Зенкова И.В., Штабровская И.М. Влияние гидротермических условий на подстилочных беспозвоночных вырубков и гарей Хибин	4	364–380
Зубкова Е.В., Фролов П.В., Быховец С.С., Надпорожская М.А., Фролова Г.Г. Мозаичность ценопопуляций черники и брусники, и динамика органического вещества почвы в сосняках южного Подмосковья	1	34–46
Ибе А.А. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Иванов А.В., Дарман Г.Ф., Соловьев И.Д., Смускина И.Н., Брянин С.В. Видовое разнообразие лиственников Амурской области и Якутии	6	703–712
Иванов А.В., Сало М.А., Бондарчук С.Н., Замолодчиков Д.Г., Могилева А.В., Кочкарина Н.А. Воздействие ветровала на структуру и фитомассу древостоев кедровников и березняков центрального Сихотэ-Алиня	2	132–143
Иванов А.В. См. Брянин С.В. и др.	3	285–296
Иванова Е.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э., Исаева Л.Г. Влияние воздушного промышленного загрязнения на химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на северном пределе распространения	2	157–171
Игнатова И.В. См. Калаев В.Н. и др.	2	172–187
Исаева Л.Г. См. Иванова Е.А. и др.	2	157–171
Исаков Ю.Н. См. Высоцкий А.А. и др.	5	540–548
Каганов В.В. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Каганов В.В. См. Замолодчиков Д.Г. и др.	4	339–350

Автор(ы), название	Номер	Стр.
Казеев К.Ш. См. Козунь Ю.С. и др.	3	262–269
Калаев В.Н., Игнатова И.В., Кулакова Н.Ю., Калаева Е.А., Епринцев С.А. Цитогенетический полиморфизм семенного потомства дуба черешчатого в условиях антропогенного загрязнения г. Москвы	2	172–187
Калаев В.Н. См. Корниенко В.О., Калаев В.Н.	3	321–334
Калаева Е.А. См. Калаев В.Н. и др.	2	172–187
Капица Е.А., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Лопес де Гереню В.О., Каганов В.В., Курганова И.Н., Кушневская Е.В., Шорохова Е.В. Крупные древесные остатки в муссонных тропических лесах Вьетнама	3	297–311
Капица Е.А. См. Шорохова Е.В. и др.	6	643–657
Каплина Н.Ф. Цикличность радиального прироста ствола и жизненное состояние дуба черешчатого в нагорной и пойменной дубравах южной лесостепи	1	21–33
Карпечко А.Ю. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Карпечко А.Ю. См. Мошкина Е.В. и др.	4	351–363
Климанова О.А. См. Букварева Е.Н. и др.	6	595–616
Клименко Н.И. См. Клименко О.Е. и др.	4	381–394
Клименко О.Е., Клименко Н.И., Плугатарь Ю.В. Влияние интродуцированных древесных растений на свойства черноземов сегрегационных Крыма	4	381–394
Климентьев А.И., Петрова Г.В., Нестеренко Ю.М., Поляков Д.Г. Динамика уровня грунтовых вод в ландшафтах национального парка “Бузулукский бор”	1	85–101
Козунь Ю.С., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние климата на ферментативную активность лесных почв Северного Кавказа	3	262–269
Колесников С.И. См. Козунь Ю.С. и др.	3	262–269
Колычева А.А., Чумаченко С.И., Тебенькова Д.Н. Потенциал заготовки лесных ягод при различных способах ведения лесного хозяйства на основе модельного прогноза	5	549–563
Комарова О.В. См. Высоцкий А.А. и др.	5	540–548
Комарова Т.А. См. Глушко С.Г. и др.	2	144–156
Корепин А.А. См. Шорохова Е.В. и др.	6	643–657
Корзников К.А. См. Беляева Н.Г. и др.	2	115–131
Корниенко В.О., Калаев В.Н. Влияние природно-климатических факторов на механическую устойчивость и аварийность деревьев березы повислой в г. Донецке	3	321–334
Коронатова Н.Г., Косых Н.П. Продуктивность древесного яруса на верховых болотах в таежной зоне Западной Сибири	4	432–448
Косых Н.П. См. Коронатова Н.Г., Косых Н.П.	4	432–448
Котлов И.П. См. Черненко Т.В. и др.	6	617–630
Кочкарина Н.А. См. Иванов А.В. и др.	2	132–143
Кренке А.Н. См. Белоновская Е.А. и др.	6	658–673
Кузнецов А.Н. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Кузнецова С.П. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Кулакова Н.Ю. См. Калаев В.Н. и др.	2	172–187
Курганова И.Н. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Кутявин И.Н. См. Манов А.В., Кутявин И.Н.	2	199–212
Кутявин И.Н., Манов А.В. Динамика размерной и возрастной структуры древостоев в коренных сосняках Северного Предуралья	5	504–519
Кушневская Е.В. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Лисотова Е.В. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Лопес де Гереню В.О. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Лукина Н.В. См. Иванова Е.А. и др.	2	157–171
Любечанский И.И. См. Нечаева Т.В. и др.	5	580–592

Автор(ы), название	Номер	Стр.
Мамай А.В. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Мамай А.В. См. Мошкина Е.В. и др.	4	351–363
Манов А.В., Кутявин И.Н. Пространственно-временная изменчивость климатического сигнала в радиальном приросте ели в бассейне реки Печоры	2	199–212
Манов А.В. См. Кутявин И.Н., Манов А.В.	5	504–519
Маслов А.А. Биологическое разнообразие коренных типов леса в заповедных лесных участках Московского региона	6	631–642
Матвеева А.Г. Опытнo-производственные рубки с сохранением подростa в пихтово-еловых лесах Хабаровского края	1	13–20
Медведева М.В. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Медведева М.В. См. Бахмет О.Н., Медведева М.В.	3	239–249
Медведева М.В. См. Мошкина Е.В. и др.	4	351–363
Могилева А.В. См. Иванов А.В. и др.	2	132–143
Морозова О.В. См. Беяева Н.Г. и др.	2	115–131
Морозова О.В. См. Черненкова Т.В. и др.	6	617–630
Мостовая А.С. См. Замолoдчиков Д.Г. и др.	4	339–350
Мошкина Е.В. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Мошкина Е.В., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Карпечко А.Ю., Мамай А.В. Пространственно-временная динамика биологической активности почв в фитогенном поле сосны обыкновенной в средней тайге Карелии	4	351–363
Мошников С.А. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Надпорожская М.А. См. Зубкова Е.В. и др.	1	34–46
Нестеренко Ю.М. См. Климентьев А.И. и др.	1	85–101
Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Худяев С.А., Любечанский И.И. Разложение опада березы повислой на фоне выщелачивания и засоления в лабораторном эксперименте	5	580–592
Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю., Синельникова Н.В., Скворцов К.И. Видовое и ценогическое разнообразие сообществ пойменных лесов на Северо-Востоке России	6	713–726
Нешатаева В.Ю. См. Нешатаев В.Ю. и др.	6	713–726
Новиков С.Г. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Новицкий З.Б. См. Бакиров Н.Ж. и др.	3	312–320
Огуреева Г.Н., Бочарников М.В., Виноградов А.А. Биоразнообразие и география горных бореальных лесов Северного Забайкалья	6	687–702
Осипов А.Ф. Влияние сплошной рубки на дыхание почвы среднетаежного сосняка черничного Республики Коми	4	395–406
Пашкеева В.О. См. Гродницкая И.Д. и др.	3	270–284
Петрова Г.В. См. Климентьев А.И. и др.	1	85–101
Пинаевская Е.А. См. Тарханов С.Н. и др.	1	72–84
Плугатарь Ю.В. См. Клименко О.Е. и др.	4	381–394
Поляков Д.Г. См. Климентьев А.И. и др.	1	85–101
Пономарева Т.В. См. Скрипальщикова Л.Н. и др.	1	61–71
Прохоренко Н.Б. См. Глушко С.Г. и др.	2	144–156
Репях М.В. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Рожина М.С. См. Гулый С.А. и др.	4	419–431

Автор(ы), название	Номер	Стр.
Романовский Михаил Георгиевич (1944–2021)	1	102–103
Садыкова Г.А. Структура ценопопуляции можжевельника многоплодного в Талгинском ущелье Предгорного Дагестана	5	520–529
Сало М.А. См. Иванов А.В. и др.	2	132–143
Свиридова Т.В. См. Букварева Е.Н. и др.	6	595–616
Семенищенков Ю.А. Флористическое разнообразие ксеро-мезофитных широколиственных лесов Юго-Запада России	6	674–686
Семенов И.Н. См. Енчилик П.Р., Семенов И.Н.	4	407–418
Семенов И.Н. См. Шопина О.В. и др.	5	478–493
Сенашова В.А. См. Гродницкая И.Д. и др.	3	270–284
Синельникова Н.В. См. Нешатаев В.Ю. и др.	6	713–726
Скачков Ю.Б. См. Гулый С.А. и др.	4	419–431
Скворцов К.И. См. Нешатаев В.Ю. и др.	6	713–726
Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П., Гончарова И.А., Пономарева Т.В., Шушпанов А.С., Татаринцев А.И. Современное экологическое состояние компонентов сосновых экосистем Красноярской лесостепи	1	61–71
Смирнов В.Э. См. Иванова Е.А. и др.	2	157–171
Смирнов Константин Алексеевич (1948–2022)	1	104–105
Смирнова Н.В. См. Нечаева Т.В. и др.	5	580–592
Смускина И.Н. См. Иванов А.В. и др.	6	703–712
Соловьев И.Д. См. Иванов А.В. и др.	6	703–712
Стороженко В.Г. Формирование возрастных структур коренных таежных ельников европейской России	1	3–12
Стороженко В.Г., Глухова Т.В. Структура и состояние древостоя на низинном черноольховом болоте в Тверской области	5	494–503
Ступакова О.М. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Сулова Е.Г. См. Беляева Н.Г. и др.	2	115–131
Сулова Е.Г. См. Черненко Т.В. и др.	6	617–630
Сулопарова Е.С. См. Брянин С.В. и др.	3	285–296
Сухих Т.В. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Адаптация и морфологическое состояние разных форм сосны в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги	1	72–84
Татаринцев А.И. См. Скрипальщикова Л.Н. и др.	1	61–71
Тебенкова Д.Н. См. Колычева А.А. и др.	5	549–563
Тимофеева В.В. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Титова Л.А. См. Букварева Е.Н. и др.	6	595–616
Тишков А.А. См. Белоновская Е.А. и др.	6	658–673
Ткаченко Ю.Н. См. Бахмет О.Н. и др.	1	47–60
Усова Е.А. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Усольцев В.А., Цепордей И.С., Данилин И.М. Модели фитомассы деревьев березы и осины для дистанционного зондирования в климатических градиентах Евразии	5	451–460
Фролов П.А. См. Зубкова Е.В. и др.	1	34–46

Автор(ы), название	Номер	Стр.
Фролова Г.Г. См. Зубкова Е.В. и др.	1	34–46
Хамзаев А.Х. См. Бакиров Н.Ж. и др.	3	312–320
Хмельщикова И.Г. См. Белоновская Е.А. и др.	6	658–673
Хохряков В.Р. См. Шопина О.В. и др.	5	478–493
Худяев С.А. См. Нечаева Т.В. и др.	5	580–592
Царевская Н.Г. См. Белоновская Е.А. и др.	6	658–673
Цепордей И.С. См. Усольцев В.А. и др.	5	451–460
Черненко Т.В. См. Беляева Н.Г. и др.	2	115–131
Черненко Т.В., Котлов И.П., Беляева Н.Г., Суслова Е.Г., Морозова О.В. Оценка и картографирование ценотического разнообразия лесов Московского региона	6	617–630
Честных О.В., Грабовский В.И., Замолотчиков Д.Г. Оценка запасов почвенного углерода лесных районов России с использованием баз данных почвенных характеристик	3	227–238
Чумаченко С.И. См. Колычева А.А. и др.	5	549–563
Шарая Л.С., Ван П.С. Закономерные изменения влажности почв в хвойных лесах заказника “Удыль” Нижнего Приамурья	2	188–198
Шеллер М.А. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Шилкина Е.А. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Шопина О.В., Герасимова М.И., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенов И.Н. Инвентаризация и картографирование почв национального парка “Смоленское Поозерье”	5	478–493
Шорохов А.А. См. Шорохова Е.В. и др.	6	643–657
Шорохова Е.В. См. Капица Е.А. и др.	3	297–311
Шорохова Е.В., Корепин А.А., Капица Е.А., Березин Г.В., Шорохов А.А., Шорохова М.А. Ценотическое разнообразие и долговременная динамика массива “Вепсский лес”	6	643–657
Шорохова М.А. См. Шорохова Е.В. и др.	6	643–657
Штабровская И.М. См. Зенкова И.В., Штабровская И.М.	4	364–380
Шуваев Д.Н., Ибе А.А., Щерба Ю.Е., Сухих Т.В., Шилкина Е.А., Шеллер М.А., Усова Е.А., Лисотова Е.В., Репях М.В., Ступакова О.М. Молекулярно-генетическая характеристика популяций сосны обыкновенной в Красноярском крае по панели 15 ядерных микросателлитных локусов	5	530–539
Шушпанов А.С. См. Скрипальщикова Л.Н. и др.	1	61–71
Щерба Ю.Е. См. Шуваев Д.Н. и др.	5	530–539
Щербаков А.В. См. Букварева Е.Н. и др.	6	595–616
Mownika S. See Ramya E.K. et al.	5	564–579
Ramya E.K., Sharmila S., Mownika S. Litter turnover and nutrients dynamic in a tropical moist deciduous forest of India	5	564–579
Sharmila S. See Ramya E.K. et al.	5	564–579
Алфавитный указатель за 2021 г.	1	106–112
Правила для авторов	6	727–728
IX Всероссийская научная конференция с международным участием “Лесные почвы и изменение климата” (Россия, онлайн-заседания, 21–24 сентября 2021 г.)	3	335–336