

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

ISSN 2311-1410

Сибирский лесной журнал

Номер 2
Март–Апрель 2022



ФГБУ «Сибирское отделение
Российской академии наук»
Новосибирск

FEDERAL RESEARCH CENTER KRASNOYARSK SCIENTIFIC CENTER
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH
V. N. SUKACHEV INSTITUTE OF FOREST
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH

SIBERIAN JOURNAL OF FOREST SCIENCE

Number 2 March–April 2022

Peer-reviewed Scientific Journal. Established January 2014

Founder: Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

Published bimonthly, 6 times per year
ISSN 2311-1410 (Print), ISSN 2312-2099 (Online)

Editor-in-Chief

Alexander A. Onuchin
onuchin@ksc.krasn.ru

Associate Editors-in-Chief

Igor M. Danilin, Tamara S. Sedel'nikova
danilin@ksc.krasn.ru, tss@ksc.krasn.ru

Managing Editor

Larisa N. Skripal'schikova
lara@ksc.krasn.ru

Associate Editors

Galina F. Antonova (RF), Natalia E. Antonova (RF), Stanislav P. Arefyev (RF), Sezgin Ayan (Turkey), Vladimir F. Baginskiy (Belarus), Eugene V. Banaev (RF), Yuri N. Baranchikov (RF), Kirsten Barrett (UK), Sergei A. Bartalev (RF), Sergei M. Bebiya (Abkhazia), Vera E. Benkova (RF), Kapitolina S. Bobkova (RF), Jiquan Chen (USA), Tumen N. Chimitdorziev (RF), Chimidnyam Dorjsuren (Mongolia), Chultem Dugarjav (Mongolia), Alexey A. Dymov (RF), Steve Eubanks (USA), Sergey N. Goroshkevich (RF), Irina D. Grodnitskaya (RF), Andrei N. Gromtsev (RF), Georg Guggenberger (Germany), Alexander P. Isaev (RF), Galina A. Ivanova (RF), Vladislav N. Kalaev (RF), Olga V. Kalugina (RF), Vyacheslav I. Kharuk (RF), Alexander V. Kirdyanov (RF), Natal'ya I. Kirichenko (RF), Grigoriy B. Kofman (RF), Alexander P. Kovalev (RF), Yuri N. Krasnoshchekov (RF), Konstantin V. Krutovsky (RF, Germany), Alexander M. Kryshen (RF), Konstantin N. Kulik (RF), Andrei N. Kupriyanov (RF), Qinglin Li (Canada), Sune Linder (Sweden), Sergei R. Loskutov (RF), Tatyana A. Moskalyuk (RF), Elena N. Muratova (RF), Sergei V. Osipov (RF), Igor N. Pavlov (RF), Heli Peltola (Finland), Viliam Pichler (Slovakia), Alexander V. Pimenov (RF), Anatoly S. Prokushkin (RF), Valery P. Putenikhin (RF), Olga A. Shapchenkova (RF), Dmitriy G. Schepaschenko (RF, Austria), Christiane Schmuilius (Germany), Olga V. Shergina (RF), Alexander S. Shishikin (RF), Svetlana D. Shlotgauer (RF), Anatoly Z. Shvidenko (RF, Austria), Vladimir A. Sokolov (RF), Vladislav G. Soukhovolsky (RF), Ge Sun (USA), Vyacheslav V. Tarakanov (RF), Alexander N. Tashev (Bulgaria), Elena E. Timoshok (RF), Josef Urban (Czechia), Vladimir V. Usenya (Belarus), Vladimir A. Usoltsev (RF), Eugene A. Vaganov (RF), Viktor I. Voronin (RF), Chuankuan Wang (China), Adam X. Wei (Canada), Vasily T. Yarmishko (RF)

Leading Editor

Tatyana A. Nikitina

Scientific Editor

Kseniya A. Kryukova

Technical Editor

Tatyana R. Pantyukhina

Address for journal office:

Russian Federation, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Editorial office for the Siberian Journal of Forest Science
Phones: +7 (391) 249-4639; +7 (391) 290-5516; E-mail: lara@ksc.krasn.ru
Web: sibjforsci.com; сибирскийлеснойжурнал.рф

Novosibirsk

Siberian Branch of the Russian Academy of Science

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ ЛЕСА ИМ. В. Н. СУКАЧЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

СИБИРСКИЙ ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ

№ 2 2022 Март – Апрель

Научный журнал. Издаётся с января 2014 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Периодичность – 6 номеров в год
ISSN 2311-1410 (печатное издание), ISSN 2312-2099 (сетевое издание)

Главный редактор
А. А. Онучин

Редакционная коллегия:

Г. Ф. Антонова (РФ), Н. Е. Антонова (РФ), С. П. Арефьев (РФ), С. Аян (Турция), В. Ф. Багинский (Беларусь),
Е. В. Банаев (РФ), Ю. Н. Баранчиков (РФ), К. Баррет (Великобритания), С. А. Барталев (РФ), С. М. Бебия (Абхазия),
В. Е. Бенькова (РФ), К. С. Бобкова (РФ), Е. А. Ваганов (РФ), Ч. Ван (Китай), А. Х. Вей (Канада), В. И. Воронин (РФ),
С. Н. Горошкевич (РФ), И. Д. Гродницкая (РФ), А. Н. Громцев (РФ), Г. Гуггенбергер (Германия),
И. М. Данилин (*зам. главного редактора*, РФ), Ч. Доржсүрэн (Монголия), Ч. Дугаржав (Монголия), А. А. Дымов (РФ),
Г. А. Иванова (РФ), А. П. Исаев (РФ), В. Н. Калаев (РФ), О. В. Калугина (РФ), А. В. Кирдянов (РФ), Н. И. Кириченко (РФ),
А. П. Ковалев (РФ), Г. Б. Кофман (РФ), Ю. Н. Краснощеков (РФ), К. В. Крутовский (РФ, Германия), А. М. Крышень (РФ),
К. А. Крюкова (*научный редактор*, РФ), К. Н. Кулик (РФ), А. Н. Куприянов (РФ), Ж. Ли (Канада), С. Линдер (Швеция),
С. Р. Лоскутов (РФ), Т. А. Москалюк (РФ), Е. Н. Муратова (РФ), С. В. Осипов (РФ), Т. А. Никитина (*ведущий редактор*, РФ),
И. Н. Павлов (РФ), Х. Пелтола (Финляндия), А. В. Пименов (РФ), В. Пихлер (Словакия), А. С. Прокушкин (РФ),
В. П. Путенихин (РФ), Т. С. Седельникова (*зам. главного редактора*, РФ), Л. Н. Скрипальщикова (*отв. секретарь*, РФ),
В. А. Соколов (РФ), Г. Сун (США), В. Г. Суховольский (РФ), В. В. Тараканов (РФ), А. Н. Ташев (Болгария),
Е. Е. Тимошок (РФ), Й. Урбан (Чехия), В. В. Усень (Беларусь), В. А. Усольцев (РФ), В. И. Харук (РФ), Д. Чен (США),
Т. Н. Чимитдоржиев (РФ), О. А. Шапченкова (РФ), А. З. Швиденко (РФ, Австрия), О. В. Шергина (РФ), А. С. Шишкин (РФ),
С. Д. Шлотгауэр (РФ), К. Шмуллиус (Германия), Д. Г. Щепашенко (РФ, Австрия), С. Юбанкс (США), В. Т. Ярмишко (РФ)

Адрес редакции: 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, ИЛ СО РАН
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

Редакция «Сибирского лесного журнала»
Телефоны: (391) 249-4639; (391) 290-5516
E-mail: lara@ksc.krasn.ru
Интернет-сайт: сибирскийлеснойжурнал.рф, sibjforsci.com

Новосибирск
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 2022
© Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), 2022



Основная тематика журнала:

лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация
структура, динамика и функционирование лесных экосистем
биосферные функции леса, их изменения под влиянием глобальных и региональных
климатических процессов и антропогенных воздействий
география, экология и типология лесов
лесная генетика, селекция и интродукция, дендрология
лесное ресурсоведение, этноботаника
лесные культуры
физиология и биохимия лесных растений
биотехнология, древесиноведение, химическая переработка древесины и недревесных продуктов леса
дендрохронологические исследования
лесная гидрология
лесная пирология
лесные зоокомплексы
лесная фитоценология
лесное почвоведение
лесная микробиология
лесная фитопатология и защита леса
лесомелиорация и лесная рекультивация
лесная политика, экономика, управление лесами, лесное законодательство
дистанционные и геоинформационные методы в оценке биосферных функций леса

Журнал представляет собой мультидисциплинарное рецензируемое научное издание, освещающее широкий спектр вопросов лесоведения, лесоводства, лесоустройства, лесной таксации, генетики и селекции, лесной экологии и экономики – наук о сложнейших закономерностях структуры, формирования и развития лесных экосистем и использования лесных ресурсов человеком.

«Сибирский лесной журнал. Siberian Journal of Forest Science» (ISSN 2311-1410 (печатное издание), ISSN 2312-2099 (сетевое издание)) публикуется Федеральным государственным бюджетным учреждением «Сибирское отделение Российской академии наук» на русском и английском языках.

«Сибирский лесной журнал» включен в российскую систему научного цитирования eLibrary.ru (РИНЦ), международные реферативные базы данных: Ulrichsweb: Global Serials Directory, Directory of Open Access Journals (DOAJ), AGRIS, CABI Forest Science Database, перечень периодических научных изданий ВАК при Минобрнауки РФ, готовится к включению в международные реферативные базы данных научной периодики и цитирования: Springer, Scopus, Web of Science. Полнотекстовые статьи размещаются на сайте журнала в сети: sibirskii-lesnoy-jurnal.pf, sibjforsci.com.

«Сибирский лесной журнал» предполагает следующие разделы: «Обзорные статьи», «Исследовательские статьи», «Краткие сообщения», «Рецензии», «Хроника», «Международное сотрудничество». В нем освещаются самые разные вопросы, касающиеся проблем биологического разнообразия лесов на всех уровнях его организации (генетическом, видовом, экосистемном). Публикуются статьи по антропогенной и техногенной трансформации лесных экосистем. Журнал не ограничивается лесными проблемами Сибири, принимает и публикует материалы из различных регионов мира, представляющие общенаучный интерес.

Подготовлено к печати Федеральным государственным бюджетным учреждением
«Сибирское отделение Российской академии наук»

Ведущий редактор Т. А. Никитина

Научный редактор К. А. Крюкова

Дизайн обложки С. Р. Лоскутов

Техническое редактирование и верстка Т. Р. Пантюхина

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации:

Периодическое печатное издание, журнал – ПИ № ФС 77-68699 от 09 февраля 2017 г.

Сетевое издание – ЭЛ № ФС 77-70737 от 15 августа 2017 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

Федеральный исследовательский центр

«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Сдано в набор 10.03.2022. Выход в свет 29.04.2022. Бумага типографская. Формат 60 × 84 1/8

Усл. печ. л. 5.6. Уч.-изд. л. 4.8. Тираж 100 экз. Заказ № 175. Цена свободная.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17

Отпечатано в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Сибирское отделение Российской академии наук»
630090, г. Новосибирск, Морской просп., 2

Тел.: 8 (383) 330-8466; электронная почта: e.lyannaya@sb-ras.ru; <http://www.sibran.ru>

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 581.8+574.24+633.877.3

МОРФОЛОГО-АНАТОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПИГМЕНТНЫЙ СОСТАВ ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ г. КРАСНОЯРСКА

В. В. Стасова, Л. Н. Скрипальщикова, Н. В. Астраханцева, А. П. Барченков

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, 660036, Академгородок 50/28

E-mail: vistasova@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, astr_nat@mail.ru, alexbarchenkov@mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.2021 г.

Исследование зависимости структуры и пигментного состава хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от уровня техногенной нагрузки проводили в зеленых насаждениях четырех районов г. Красноярска. Установлено, что длина, ширина, толщина, а также площади поперечного сечения хвои и центрального цилиндра уменьшаются при повышении степени загрязнения воздуха. Выявлено, что площади поперечного сечения проводящих пучков в центральном цилиндре одной и той же хвоинки, как правило, неодинаковы, различия составляют 9–12 % и характеризуются высокой индивидуальной изменчивостью. Достоверной связи размеров проводящих пучков и уровня техногенной нагрузки не найдено. Число смоляных ходов в хвое уменьшается при усилении техногенного воздействия, что указывает на ослабление защиты ассимиляционного аппарата от вредителей и болезней. Различий по содержанию фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в хвое сосен в двух районах города, резко различающихся по уровню загрязнения, не выявлено, что, возможно, обусловлено погодными условиями: обильные летние осадки препятствовали аккумуляции поллютантов на поверхности и внутри хвои. Изменения размеров, анатомической структуры и пигментного состава хвои сосны можно считать результатом адаптации к условиям произрастания и погодным факторам.

Ключевые слова: городские зеленые насаждения, *Pinus sylvestris* L., фотосинтетические пигменты, техногенное загрязнение, анатомия хвои.

DOI: 10.15372/SJFS20220201

ВВЕДЕНИЕ

Приспособление растений к условиям существования подразумевает изменение их метаболизма, их физиологических процессов, приводящее к структурным изменениям, по степени выраженности которых можно судить о состоянии окружающей среды (Скупченко, Соколова, 2008).

Исследования, проведенные в разных городах, показали, что существуют различия в структурных признаках растений в посадках вдоль улиц, в парках и в пригородных зонах. В магистральных посадках растения более угнетенные, подвержены болезням и вредителям, их жизненное состояние хуже (Сперанская, 2007; Шергина, Михайлова, 2007, Татаринцев, 2010;

Неверова и др., 2012; Петункина, 2015; Макарова, Макаров, 2018). В городских условиях они приобретают ксероморфные признаки – более мелкие листья и короткая хвоя, толстая кутикула, более мелкие клетки, увеличенный объем механических тканей, меньшая степень открытия устьиц и большее их количество на единицу площади листа (Илькун, 1978; Горышина, 1991; Неверова, 2002; Зотикова и др., 2007). Длина хвои сильно варьирует по сравнению с шириной и толщиной, которые изменяются в более узких пределах (Евстюгин, 2006; Собчак, Куровская, 2009; Григоренко, 2015), увеличена асимметрия ее развития (Соболева и др., 2009). В покровных тканях хвои сосны утолщаются кутикула и эпидерма, но уменьшается толщина гиподермы (Папина и др., 2013). Под влиянием техногенно-

го стресса также изменяются число и размеры смоляных каналов в хвое (Илькун, 1978; Евстюгин, 2006; Зотикова и др., 2007; Собчак, 2009), снижается содержание фотосинтетических пигментов (Собчак и др., 2001).

В г. Красноярске, крупном промышленном центре Сибири, состояние городских зеленых насаждений и пригородных лесов является предметом пристального изучения и мониторинга (Павлов, 2006; Экологическое состояние..., 2009). Были исследованы жизненное состояние древесных растений (Романова, 2003; Кладько, Скрипальщикова, 2019), продолжительность жизни, длина, масса хвои и содержание в ней фотосинтетических пигментов (Пахарькова и др. 2010; Григоренко, 2015; Донцов и др., 2016; и др.), однако анатомические характеристики хвои, определяющие в конечном счете продуктивность и устойчивость деревьев к техногенным загрязнениям, не рассматривались.

Цель данной работы – изучение морфологических и анатомических характеристик и пигментного состава хвои сосны обыкновенной, произрастающей в районах с разными уровнями техногенной нагрузки г. Красноярска.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Красноярск является одним из крупнейших городов Сибири, расположен на обоих берегах р. Енисей в среднем его течении на стыке трех геоморфологических районов: долины Енисея, прилегающих к ней плато и предгорий Восточного Саяна. Преобладающую часть города занимает долина Енисея (Климат..., 1982). В период становления Красноярск размещался в особо

комфортных микроклиматических условиях горной котловины, защищенной от северных ветров, а компактный характер планировки острога и посадка не противоречил специфическим климатическим условиям и природному окружению. В настоящее время неблагоприятными для города являются сочетания таких факторов, как котловинность горного рельефа, образование приземных инверсий и штилевых погодных условий с размещением промышленных предприятий выше по рельефу относительно селитебных районов города (Авдеева и др., 2015).

К основным источникам загрязнения атмосферы города относятся предприятия металлургии, теплоэнергетики, автотранспорт. Объем валовых выбросов в г. Красноярске в 2020 г. составил 109.7 тыс. т (Государственный доклад..., 2021). В 2020 г. уровень атмосферного загрязнения здесь характеризовался как «высокий». Комплексный индекс загрязнения атмосферы ИЗА5 < 13. Основной вклад в уровень загрязнения вносят взвешенные вещества, диоксид азота, аммиак, формальдегид, бенз(а)пирен. В отдельных районах города загрязнение воздуха зависит от рельефа местности, ветрового режима, особенностей хозяйственного использования территории и застройки (Хлебопрос и др., 2012; Onuchin et al., 2020; Государственный доклад..., 2021).

На территории г. Красноярска в 2020 г. были заложены четыре пробные площадки (пп) (Кладько, Скрипальщикова, 2021) (табл. 1).

На каждой пп отбирали по 5 модельных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) возрастом 25–30 лет в соответствии с инженерно-топографическими планами территорий, таким образом, чтобы вблизи них не проходили

Таблица 1. Характеристика пробных площадей

Номер пп	Расположение пп	Условия произрастания
1	Дендрарий ИЛ СО РАН, Академгородок, юго-западная окраина города	Источники загрязнения практически отсутствуют, можно считать условно чистой
2	Ул. Елены Стасовой, мкр. «Ветлужанка», западная часть города	Низкий уровень загрязнения автотранспортом (CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , бенз(а)пирен и др.).
3	Парк «Гвардейский, мкр. «Зеленая роща», восточная часть города	Высокий уровень загрязнения за счет выбросов промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса (CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , сажа, фтористые соединения, бенз(а)пирен, сероводород и др.). Особенность пп – близость не замерзающей в зимнее время р. Енисей, что способствует образованию в воздухе тумана и изморози на деревьях, абсорбирующих атмосферные токсиканты
4	Ул. 9 Мая, мкр. «Северный», северная часть города	Высокий уровень загрязнения суммарными выбросами автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса

подземные коммуникации. На пп 1 и 3 деревья были высажены группами; на пп 2 и 4 – в рядные посадки. Для исключения ценотического эффекта конкуренции выбирались деревья, располагающиеся на расстоянии не менее 3 м друг от друга. В пределах одной пп, по визуальной оценке, модельные деревья имели приблизительно одинаковые морфометрические показатели.

Для анализа в первой декаде августа 2020 г. собирали хвою второго года жизни из нижней части кроны по её окружности. В каждом насаждении для каждого из пяти модельных деревьев из собранной хвои были случайным образом взяты по 20 пар хвоинок, у которых измеряли длину, после чего фиксировали их в 70%-м этаноле. Поперечные срезы из средней части хвоинок фотографировали с использованием светового микроскопа с цифровым окуляром DCM-900. Изображения анализировали с помощью программы PhotoMaster 1.21 – определяли ширину, толщину и площадь поперечного сечения хвоинки, а также площади поперечного сечения центрального цилиндра и проводящих пучков, подсчитывали количество смоляных ходов.

Фотосинтетические пигменты исследовали в свежесобранной хвое. Параллельно брали навески для определения пигментов и влажности. Навеску свежей хвои (0.5 г) обрабатывали этанолом (95%-м) до полного извлечения пигментов. Растворы объединяли и доводили до определенного объема. Содержание пигментов определяли спектрофотометрическим методом. Оптическую плотность растворов измеряли при длине волны 470, 649 и 664 нм на спектрофотометре СФ-2000 (СКБ «Спектр», Россия). Количество пигментов рассчитывали (в мг/мл экстракта) по формулам для 95%-го этанола (Lichtenthaler, 1987):

хлорофилл *a*:

$$Ca = 13.36 \times A_{664.1} - 5.19 \times A_{648.6},$$

хлорофилл *b*:

$$Cb = 27.43 \times A_{648.6} - 8.12 \times A_{664.1},$$

каротиноиды:

$$Car = (1000 \times A_{470} - 2.13 \times Ca - 97.64 \times Cb)/209.$$

Количество пигментов пересчитывали на единицу абсолютно сухой массы хвои.

Для статистической обработки результатов измерений использовали программы MS Excel и Statistica 10. Значимость различий характе-

ристик хвои сосен из городских районов с разным уровнем техногенной нагрузки оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и критерия Дункана, который рекомендуется использовать для попарного сравнения средних, если их число больше двух (Дёрффель, 1994). Расчеты осуществляли при заданном уровне значимости $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические и анатомические характеристики хвои. Длина хвои – наиболее часто измеряемый биоиндикационный параметр, чутко реагирующий на изменение условий окружающей среды. Из четырех исследованных районов наиболее длинной она была у сосен пп 1, при минимальной техногенной нагрузке. Согласно расчетам, различия по этому показателю у сосен пп 1 и остальных пп достоверны ($p \leq 0.05$). Сосны на пп 2–4 по длине хвои различались между собой незначительно (рис. 1). Уменьшение длины хвои часто происходит при воздействии повышенных техногенных нагрузок. При этом может также уменьшаться продолжительность ее жизни и густота охвоения побегов (Хан, 2000; Овечкина, Шаяхметова, 2013; Григоренко, 2015; и др.). Кроме того, у деревьев в городских посадках снижается апикальная доминантность (Собчак, Куровская, 2009) и усиливается линейный рост боковых побегов (Хан, 2000), что трактуется как проявление компенсаторных реакций.

Такие показатели, как ширина и толщина хвои сосен в посадках на пп 4 были достоверно ($p \leq 0.05$) меньше по сравнению с хвоей сосен на пп 1–3 с более низкими уровнями загрязнения (рис. 2, А).

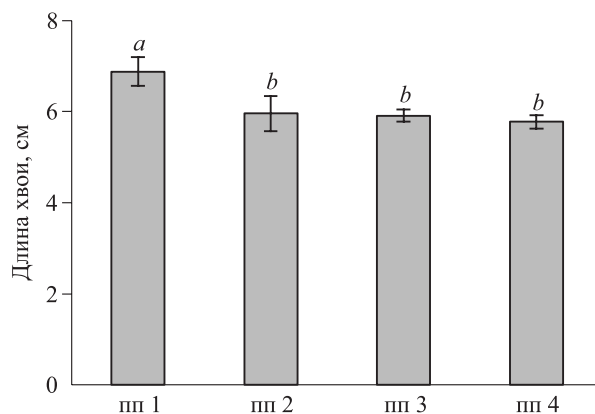


Рис. 1. Длина хвои сосны обыкновенной в городских зеленых насаждениях (средние и ошибки средних). Одинаковыми латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$.

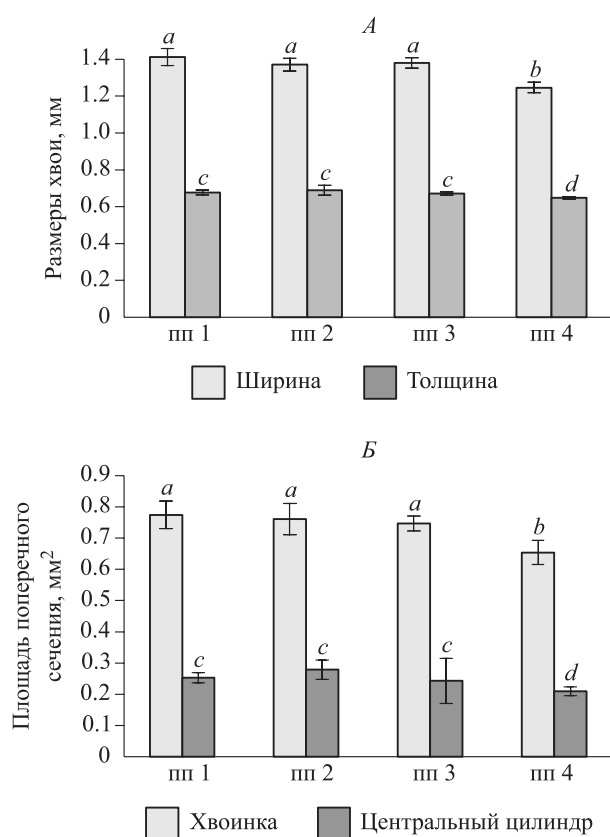


Рис. 2. Ширина, толщина (А), и площадь поперечного сечения (Б) хвои сосны обыкновенной в городских зеленых насаждениях (средние и ошибки средних). Одинаковыми латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$.

Ширина хвои сосны в городских условиях может как уменьшаться (Овечкина, Шаяхметова, 2013), так и увеличиваться (Хан, 2000). Возможно, такая реакция зависит от интенсивности техногенного воздействия: первоначальная адаптивная реакция – усиление роста – в дальнейшем сменяется его подавлением.

Площадь поперечного сечения хвои сосен из разных мест произрастания (рис. 2, Б), учитывающая не только линейные размеры, но и форму сечения, что более точно отражает объем слагающих хвоинку тканей, демонстрирует ту же тенденцию, как описана выше.

Центральный цилиндр хвои, ограниченный от ассимилирующей ткани эндодермой, содержит два проводящих пучка, трансфузионную ткань для передачи ассимилятов в транспортное русло и механическую ткань, поддерживающую жесткость структуры. Площади поперечного сечения центрального цилиндра хвои сосен на пп 1–3 достоверно не различаются, но на пп 4 достоверно меньше (рис. 2, Б).

Измерение площади поперечного сечения проводящих пучков показало, что размер пучков

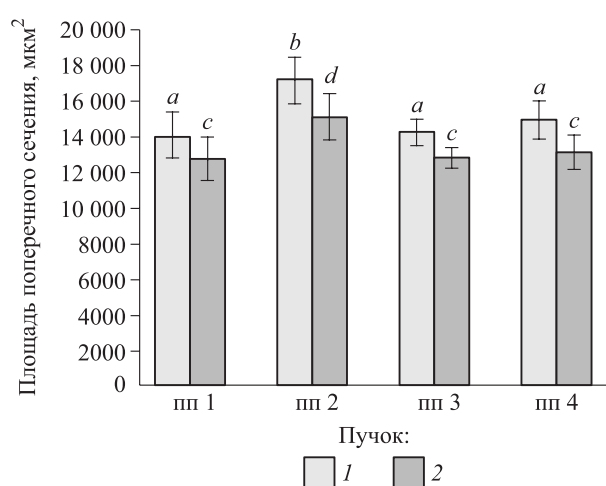


Рис. 3. Площади поперечного сечения проводящих пучков в хвое сосен в городских посадках (средние и ошибки средних).

Одинаковыми латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$.

в одной и той же хвоинке обычно неодинаков. При расчетах больший по площади пучок обозначали как первый, меньший – второй.

Площадь поперечного сечения проводящих пучков в хвое модельных деревьев колебалась от 0.01 до 0.02 мм² (10000–18000 мкм²) (рис. 3).

Различия размеров большего и меньшего пучков в среднем составляли 9–12 % и характеризовались высокой индивидуальной изменчивостью. Наибольшие размеры проводящих пучков отмечены в хвое сосен на пп 2, различия по этому показателю с пп 1, 3 и 4 достоверны при $p \leq 0.05$.

Важную роль в защитной системе дерева играет образование и накопление смолы в смоляных ходах. Смола защищает хвою от вредителей и болезней, являясь репеллентом, антисептиком, а также закрывает раны в случае повреждения тканей. Число смоляных ходов в хвое в норме – видоспецифичный признак, который может колебаться в генетически определенных пределах (Правдин, 1964). Внешние условия могут существенно влиять на количество, размер смоляных ходов и интенсивность смолообразования (Петренко, 1967; Онучин, Козлова, 1993; и др.). Отрицательное воздействие воздушных загрязнителей на содержание смоляных ходов в хвое отмечалось неоднократно (Зотикова и др., 2007; Соболева и др., 2009; Легощина и др., 2013; Legoshchina et al., 2013; Скрипальщикова и др., 2013, 2016). На изученных участках наибольшее число смоляных ходов отмечено в хвое сосен пп 1, наименьшее – на пп 4 (одинаковыми латинскими буквами обозначены вели-

чины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$):

- пп 1 – 8.80 ± 1.23 (a),
- пп 2 – 7.72 ± 0.24 (b),
- пп 3 – 7.78 ± 0.56 (b),
- пп 4 – 6.85 ± 0.59 (c).

Однако в целом на всех изученных пп она содержала достаточно большое число смоляных ходов. Для окрестностей Красноярска, по данным Л. Ф. Правдина (1964), его средние значения в хвое нижней части кроны сосны достигали 10.3 (9.1–11.1).

Данные морфолого-анатомического анализа хвои сосен из разных районов города можно суммировать следующим образом:

– на пп 1 в наиболее чистом районе города значения изученных морфолого-анатомических параметров (за исключением площади поперечного сечения проводящих пучков) были наибольшими;

– на пп 4 в наиболее загрязненном районе значения морфолого-анатомических показателей хвои были наименьшими;

– на пп 2 и 3 хвоя занимала промежуточное положение по всем характеристикам, за исключением увеличенного размера проводящих пучков в хвое сосен пп 2.

Фотосинтетические пигменты. Для определения фотосинтетических пигментов, характеризующих функциональное состояние ассимиляционного аппарата растений, были выбраны два насаждения, различающиеся по уровню

антропогенной нагрузки, – пп 1 (минимальная нагрузка) и пп 3 (высокий уровень загрязнения) (табл. 2).

Несмотря на существенные различия в уровнях антропогенной нагрузки в этих районах города, достоверных различий в содержании пигментов не выявлено. Возможно, это связано с погодными условиями периода вегетации 2020 г. – обилием осадков, очищающих поверхность хвои от загрязнений, а также препятствующих накоплению поллютантов в воздухе. По данным источника «Погода и климат» (2022), за вторую и третью декады июля 2020 г. выпало 114 мм осадков при месячной норме 70, за первую декаду августа – 41.6 мм при норме за месяц 76 мм.

Соотношение пигментов рассматривают как реакцию растения на внешние факторы. Так, отношение содержания хлорофилла *a* к содержанию хлорофилла *b* в хвое характеризует газоустойчивость растений – чем ниже данный показатель, тем менее растение устойчиво к действию поллютантов (Соболева и др., 2009). Считается, что в норме это отношение составляет 2.0–2.3 (Титова, 2013). На исследованных нами территориях этот показатель имел близкие к нормальным значения независимо от уровня загрязнения. Отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых является показателем состояния растения. Для хвои сосен на пп 1 и пп 3 оно равно 7.06 и 7.42 соответственно. Для районов г. Уссурийска с разным уровнем загрязнения выбросами автотранспорта соотношение

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов и масса 100 хвоинок сосны обыкновенной в районах г. Красноярска с разным уровнем загрязнения (средние значения и ошибки средних)

Показатель	пп 1	пп 3
Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г абс. сухой массы хвои:		
хлорофилл <i>a</i>	1.81 ± 0.12	2.03 ± 0.16
хлорофилл <i>b</i>	0.91 ± 0.05	0.86 ± 0.04
сумма хлорофиллов	2.72 ± 0.14	2.89 ± 0.17
каротиноиды	0.39 ± 0.04	0.40 ± 0.04
Соотношение форм хлорофиллов, <i>a/b</i>	1.99 ± 0.17	2.34 ± 0.22
Отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых, $(a+b)/car$	7.06 ± 0.15	7.42 ± 0.18
Содержание фотосинтетических пигментов, мкг/хвоинку:		
хлорофилл <i>a</i>	36.20 ± 4.47	34.56 ± 5.00
хлорофилл <i>b</i>	18.26 ± 2.32	14.61 ± 1.78
каротиноиды	7.73 ± 0.94	6.80 ± 1.10
сумма пигментов	62.19 ± 5.12	55.98 ± 5.42
Масса 100 хвоинок, г	3.75 ± 0.20	3.23 ± 0.31

зеленых и желтых пигментов в хвое сосны составляло 3.91 при высокой интенсивности дорожного движения и 4.86 – в контроле (Титова, 2013). Поскольку считается, что снижение этого отношения свидетельствует об ухудшении состояния растения (Титова, 2013), мы полагаем, что функциональное состояние фотосинтетического аппарата сосен в зеленых насаждениях г. Красноярска в 2020 г. было удовлетворительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение морфологических и анатомических характеристик хвои в искусственных сосновых насаждениях в районах города с разным уровнем антропогенной нагрузки показало, что эти данные значительно варьируют в зависимости от уровня загрязнения. Наилучшие показатели роста и развития хвои сосны отмечены в пп 1 с относительно слабым техногенным воздействием. Значительное снижение размеров хвоинок и слагающих их структур выявлены у сосен на пп 4 как в наиболее загрязненном районе. Достоверных различий в содержании фотосинтетических пигментов и их соотношений в хвое сосен из районов города с разным уровнем загрязнения не установлено, что в данном случае, вероятно, обусловлено погодными условиями вегетационного периода. Все отмеченные изменения размеров, анатомической структуры и пигментного состава хвои сосны являются результатом адаптации к условиям произрастания и погодным факторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдеева Е. В., Полетайкин В. Ф., Вагнер Е. А. Исторические аспекты взаимосвязи природного окружения, композиционной структуры и системы озеленения г. Красноярска // Совр. пробл. науки и образов. 2015. № 2. Ч. 2. С. 7.
- Горышина Т. К. Растение в городе. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. 152 с.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». Красноярск: Краевое гос. бюджетное учреждение «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края», 2021. 327 с.
- Григоренко А. В. Физиологические и морфологические показатели хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 4. С. 15–19.
- Дёрффель К. Статистика в аналитической химии. Пер. с нем. М.: Мир, 1994. 268 с.
- Донцов А. С., Сунцова Л. Н., Иниаков Е. М. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореал. зоны. 2016. Т. 37. № 5–6. С. 246–250.
- Евстюгин А. С. Особенности изменчивости анатомо-морфологических признаков хвои сосны обыкновенной в разных типах аэротехногенного загрязнения // Леса Урала и хозяйство в них. 2006. Вып. 28. С. 33–39.
- Зотикова А. П., Бендер О. Г., Собчак Р. О., Астафурова Т. П. Сравнительная оценка структурно-функциональной организации листового аппарата хвойных растений на территории г. Горно-Алтайска // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2007. № 299 (1). С. 197–200.
- Илькун Г. М. Загрязнение атмосферы и растения. Киев: Наук. думка, 1978. 249 с.
- Кладько Ю. В., Скрипальщикова Л. Н. Методика комплексной биоиндикационной оценки устойчивости древесных растений к техногенному воздействию на урбанизированных территориях // Сиб. лесн. журн. 2019. № 6. С. 27–38.
- Кладько Ю. В., Скрипальщикова Л. Н. Радиальный рост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2021. № 3. С. 38–43.
- Климат Красноярска / ред. Ц. А. Швер, А. С. Герасимова. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 231 с.
- Легощина О. М., Неверова О. А., Быков А. А. Изменчивость анатомической структуры хвои *Picea obovata* Ledeb. в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово // Сиб. экол. журн. 2013. № 5. С. 733–739.
- Макарова Т. А., Макаров П. Н. Фитосанитарное состояние хвойных растений в насаждениях города Сургута // Вестн. Сургут. гос. ун-та. 2018. Вып. 4 (22) С. 33–41.
- Неверова О. А. Морфометрическая и дендрохронологическая диагностика состояния древесных насаждений как способ индикации загрязнения урбанизированной среды // Усп. совр. естествозн. 2002. № 1. С. 57–64.
- Неверова О. А., Легощина О. М., Зокиров Р. С. Изменения анатомических показателей хвои *Pinus eldarica* Ten., произрастающей в примагистральных посадках г. Худжанта // Совр. пробл. науки и образов. 2012. № 4. 5 с.
- Овечкина Е. С., Шаяхметова Р. И. Морфологические изменения сосны обыкновенной на территории Нижневартовского района // Вестн. Нижневарт. гос. ун-та. 2013. № 3. С. 75–84.
- Онучин А. А., Козлова Л. Н. Структурно-функциональные изменения хвои сосны под влиянием поллютантов в лесостепной зоне Средней Сибири // Лесоведение. 1993. № 2. С. 39–45.
- Павлов И. Н. Биологический мониторинг техногенного загрязнения по морфометрическим показателям древесных растений // Фунд. иссл. 2006. № 8. С. 34–37.
- Папина О. Н., Собчак Р. О., Астафурова Т. П. Влияние урбанизированной среды на покровные ткани и содержание воды в хвое видов семейства Pinaceae Lindl. // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2013. № 3 (23). С. 152–161.
- Пахарькова Н. В., Калякина О. П., Шубин А. А., Григорьев Ю. С., Пахарьков С. В., Сорокина Г. А. Различия в акклимационных стратегиях сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение воздушной среды // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. 27. № 3–4. С. 232–237.

- Петренко Е. С. Изменчивость числа смоляных каналов в хвое сосны обыкновенной // Лесоведение. 1967. № 6. С. 76–83.
- Петункина Л. О. Разнообразие и состояние объектов озеленённых территорий общего пользования в г. Кемерово // Вестн. КемГУ. 2015. Т. 3. № 4 (64). С. 62–67.
- Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 194 с.
- Погода и климат, 2022. www.pogodaiklimat.ru.
- Романова Л. И. Состояние вегетативных органов лиственницы сибирской в условиях промышленного загрязнения г. Красноярска // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития. III Междунар. науч.-техн. конф., Брянск, 1–30 ноября 2003 г. Брянск: БГИТА, 2003. 2 с.
- Скрипальщикова Л. Н., Днепровский И. А., Стасова В. В., Пляшечник М. А., Грешилова Н. В., Калугина О. В. Морфолого-анатомические особенности хвои сосны обыкновенной под влиянием промышленных выбросов города Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2016. № 3. С. 46–56.
- Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В., Пляшечник М. А. Оценка экологического состояния сосны обыкновенной на урбанизированных территориях Красноярской лесостепи // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 11. С. 176–181.
- Скупченко В. Б., Соколова Л. О. Биоиндикация окружающей среды. СПб.: СПб гос. лесотех. акад. 2008. 95 с.
- Соболева О. М., Кондратенко Е. П., Пинчук Л. Г. Комплексная оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в г. Новокузнецке // Вестн. АГАУ. 2009. № 7. С. 33–36.
- Собчак Р. О. Диагностика состояния видов хвойных в зонах техногенного загрязнения Республики Алтай // Вестн. Том. гос. ун-та. 2009. № 325. С. 185–190.
- Собчак Р. О., Астафурова Т. П., Зайцева Т. А., Верхотурова Г. С., Зотикова А. П., Дегтярева О. Н. Оценка состояния хвойных пород в зоне действия атмосферных загрязнителей по структурно-функциональным показателям хвои // Krylovia. Сиб. бот. журн. 2001. № 3 (2). С. 114–121.
- Собчак Р. О., Куровская Л. В. Морфофункциональные особенности видов хвойных в условиях урбанизированной среды // Вестн. Том. гос. ун-та. 2009. № 327. С. 214–217.
- Сперанская Н. Ю. Состав и жизненное состояние древесных насаждений г. Барнаула: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05. Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2007. 16 с.
- Татаринцев А. И. Санитарное состояние насаждений лиственницы в г. Красноярске // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. 27. № 3-4. С. 289–293.
- Титова М. С. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L на загрязнение окружающей среды // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10. С. 122–126.
- Хан Л. В. Морфологические изменения хвои сосны обыкновенной в условиях городской среды // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. информ. мат-лов междунар. науч.-тех. конф. «Лес-2000». Вып. 1. Брянск: РИО БГИТА, 2000. С. 91–92.
- Хлебопрос Р. Г., Тасейко О. В., Иванова Ю. Д., Михайлюта С. В. Красноярск. Экологические очерки. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2012. 130 с.
- Шергина О. В., Михайлова Т. А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2007. 200 с.
- Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска / Л. Н. Скрипальщикова, А. И. Татаринцев, О. Н. Зубарева и др. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. 179 с.
- Legoshchina O. M., Neverova O. A., Bykov A. A. Variability of the anatomical structure of *Picea obovata* Ledeb. needles under the influence of emissions from the industrial zone of Kemerovo // Contemp. Probl. Ecol. 2013. V. 6. N. 5. P. 555–560 (Original Rus. Text © O. M. Legoshchina, O. A. Neverova, A. A. Bykov, 2013, publ. in Sib. Ekol. Zhurn. 2013. N. 5. P. 733–740).
- Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymol. 1987. V. 148. P. 350–382.
- Onuchin A., Kofman G., Zubareva O., Danilova I. Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk town (Russia) by pollution level // Pol. J. Environ. Stud. 2020. V. 29. N. 6. P. 4257–4267.

MORPHOLOGICAL AND ANATOMICAL CHARACTERISTICS AND PIGMENT COMPOSITION OF SCOTCH PINE NEEDLES IN GREEN STANDS OF KRASNOYARSK CITY

V. V. Stasova, L. N. Skripal'shchikova, N. V. Astrakhantseva, A. P. Barchenkov

V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: vistasova@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, astr_nat@mail.ru, alexbarchenkov@mail.ru

The studies of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) needles structure and chlorophylls and carotenoid contents were carried out in four districts of the city of Krasnoyarsk, differing in the level of technogenic load. It was shown, that the length of the needles decreases with an increase in technogenic impact. The width, thickness and cross-section area of the needles and the central cylinder also decrease with an increase in the degree of air pollution. It was found that the cross-section areas of the conducting bundles in the central cylinder, as a rule, are not equal, the differences are 9–12 % and are characterized by high individual variability. No significant correlation was found between the sizes of conducting bundles and the level of technogenic load. The number of resin ducts in needles decreases with an increase in technogenic impact that indicates a decrease in the protection of the assimilation apparatus from damage by pests and diseases. Determination of the content of photosynthetic pigments in pine needles in two districts of the city, differing in the level of pollution, did not show significant differences in the content of chlorophylls and carotenoids. Perhaps this is due to the peculiarities of the weather of this growing season – abundant summer rainfalls prevented the accumulation of pollutants on the surface and inside the needles. The noted changes in the size, anatomical structure and pigment composition of pine needles can be considered as a result of adaptation to growing conditions and weather factors.

Keywords: city green stands, *Pinus sylvestris* L., photosynthetic pigments, technogenic pollution, needle anatomy.

How to cite: Stasova V. V., Skripal'shchikova L. N., Astrakhantseva N. V., Barchenkov A. P. Morphological and anatomical characteristics and pigment composition of Scotch pine needles in green stands of Krasnoyarsk city // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 3–10 (in Russian with English abstract).

УДК 630.2

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ЛЕСА НА ГАРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. В. Кабонен¹, О. И. Гаврилова¹, А. В. Грязькин², К. А. Пак³

¹ Петрозаводский государственный университет
185086, Республика Карелия, Петрозаводск, просп. Ленина, 33

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У

³ Кареллеспроект, филиал ФГБУ «Рослесинфорг»
185035, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Дзержинского, 9

E-mail: alexkabonen@mail.ru, ogavril@mail.ru, lesovod@bk.ru, pak.ka@roslesinforg.ru

Поступила в редакцию: 21.11.2021 г.

Анализ успешности лесовозобновления после пожара – важнейшая задача лесного хозяйства. Для этих целей летом 2021 г. проведена аэрофотосъемка с квадрокоптера Phantom 4 pro 15-летней гари (2006 г.) по северо-западной границе Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия). Дополнительно к этому выполнено натурное обследование по учетным площадкам, где до лесного пожара произрастал сосняк скальный из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Работы проводились с целью оценки состояния естественного возобновления после пожара по скальным выходам путем комбинирования обработки данных аэрофотосъемки с натурными обследованиями. В результате фотограмметрической обработки реконструирован ортофотоплан с пространственным разрешением 4.6 см на пиксель, карта высот и трехмерные облака точек. Для анализа распределения породного состава растительности по территории выполнено маркирование деревьев на ортофотоплане по учетным площадкам натурных обследований, в результате которого определено количественное распределение древесных пород в соотношении 64 % сосна обыкновенная и 23 % береза повислая (*Betula pendula* Roth) (остальные виды не идентифицировались). Натурные обследования показали, что после пожара сформировался жизнеспособный молодняк смешанного состава с преобладанием сосны обыкновенной (71 % от общего количества древесных пород). В формировании молодняков участвовали также береза повислая (22 %), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) и ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench) (по 3.5 %). При сравнении высоты растений на трехмерных облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить ее только для крупной общепринятой категории (> 1.5 м), при этом зависимость этого показателя, полученного разными методами, оказалась весьма значительна ($R^2 = 0.95$). Максимальная высота деревьев на исследуемом участке составила 6 м, а средние значения – от 3.5 до 4.5 м, что свидетельствовало об успешности лесовозобновления после гари на скальных выходах.

Ключевые слова: лесовозобновление, сосняк скальный, гарь, подрост, аэрофотосъемка, инвентаризация.

DOI: 10.15372/SJFS20220202

ВВЕДЕНИЕ

Согласно «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» (Распоряжение..., 2021), около 60 % площади погибших лесов связано с воздействием лесных пожаров. Данные обстоятельства актуализируют проведение детальных оценок послепожар-

ных территорий на предмет успешности лесовозобновления, что является важнейшей задачей лесного хозяйства.

Классический способ оценки успешности лесовозобновления – метод натурного наземного обследования (Uutera, Maltamo, 1995; Грязькин, 1997; Фетисова и др., 2013), достаточно трудоемкий и не всегда доступный для исполь-

зования на сильно захламленных и удаленных лесных участках, а также на участках большой площади (Беляева и др., 2012). Альтернативные способы, такие как дешифрирование космических снимков, на сегодняшний день недостаточно разработаны или ограничены небольшим пространственным разрешением и не позволяют в полной мере оценить качество лесовозобновления (Аковецкий, Афанасьев, 2020). Однако отдельные исследования показывают высокую точность (84 %) оценки успешности естественного лесовозобновления на вырубках по многолетним рядам мультиспектральных изображений со спутника Landsat, при использовании вегетационных индексов NDVI и SWVI (Белова, Ершов, 2015).

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для учета подроста и анализа лесовозобновления позволяет существенным образом снизить трудозатраты в сравнении с натурным обследованием и получить важную информацию и снимки высокого пространственного разрешения в реальном времени (Никифоров, Мунимаев, 2010; Скуднева, 2014; Денисов и др., 2016; Осипенко и др., 2017; Дайнеко, 2018; Петушкова, Потапова, 2018; Neuville et al., 2021). В то же время оно имеет свои недостатки в сравнении со спутниковыми данными дистанционного зондирования: зависимость от погодных условий (сильный ветер, дождь, низкая температура) и малое покрытие территории съемки в связи с ограниченностью аккумуляторного ресурса (от нескольких минут до 3–4 ч).

Показано (Эпов, Злыгостев, 2012; Горохова и др., 2014; Галецкая и др., 2015; Вогель, Юфев, 2018), что при исследовании лесных территорий наиболее эффективно сочетание комбинированных методов исследований: применение БПЛА с последующей фотограмметрической обработкой данных и натурное обследование местности. При натурных обследованиях, как правило, закладываются круговые площадки площадью 10 м² с детальным описанием растительности, при этом их количество должно обеспечивать требуемую точность учета (Фетисова и др., 2013; Грязькин, 2000). Дальнейшее сопоставление результатов, полученных с учетных площадок, и картографических материалов высокого пространственного разрешения, позволяет достоверно охарактеризовать растительность на исследуемой территории.

Цель настоящей работы – дать сравнительную оценку состояния естественного возобновления леса на гари по скальным выходам в

условиях средней тайги путем сопоставления данных аэрофотосъемки с БПЛА с результатами натурного обследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – гарь 15-летней давности, образовавшаяся на месте выгоревших сосняков скальных по северо-западной границе Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия) (рис. 1). Площадь исследуемого участка составляет 30 га.

Кристаллический фундамент территории Ботанического сада (Куликов, Куликова, 2001) представлен разнофациальными вулканогенными образованиями в виде обломочных пород.

Исследуемый участок является примером экзарационной формы ледникового рельефа, образовавшейся в результате эрозии и шлифовки материковым льдом поверхности скальных пород.

Растительность гари представлена пятнами подроста из основных лесообразующих древесных пород, подлеска, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, которые чередуются со скальными выходами различной площади.

До пожара на исследуемом участке произрастал сосняк скальный возрастом около 100–120 лет. В напочвенном покрове преобладали лишайники, из подлеска – можжевельник (*Juniperus* L.). Эти показатели взяты из таксационного описания 2000 г.

Последствиями низового пожара стали массовый ветровал и усыхание деревьев, что было связано с полным выгоранием органического вещества на выходах скальных пород. Кроме скальных выходов на участке на момент исследования сохранились остатки сгоревшей древесины.

При выполнении полевых работ использовали комбинированный способ: классический метод оценки успешности естественного лесовозобновления (Грязькин, 1997, 2000; Гаврилова и др., 2020) и анализ материалов аэрофотосъемки с БПЛА (Кабонен, Ольхин, 2019, 2020).

При использовании классического метода независимо от густоты подроста, его высоты и состояния во всех случаях закладывались круговые площадки площадью 10 м² (радиус круга 178.5 см). При этом для дальнейшего сопоставления с ортофотопланом местности проводилась предварительная разметка учетных ходов и

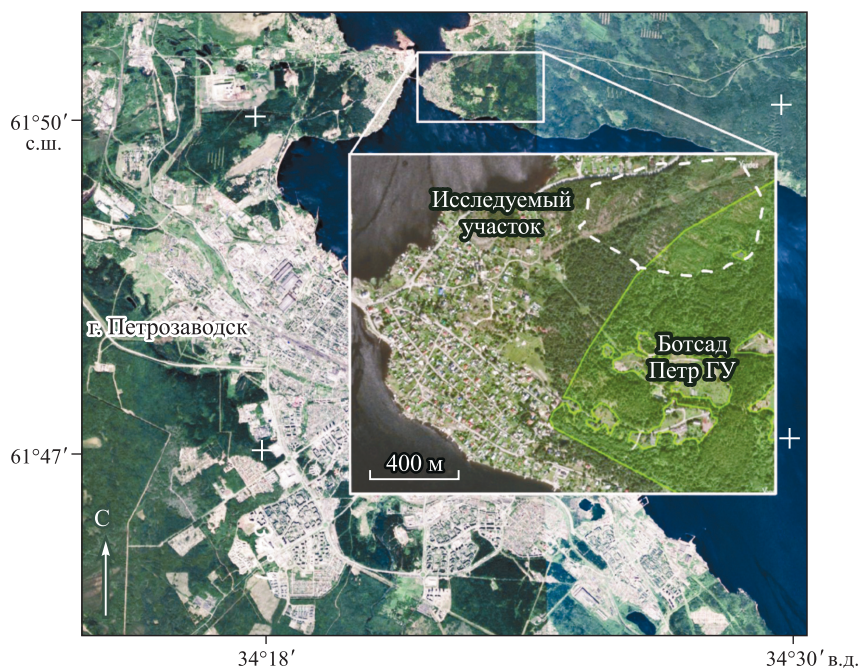


Рис. 1. Местоположение объекта исследования.



Рис. 2. Подрост хвойных и лиственных пород по гари на скальных выходах.

центров учетных площадок. Всего заложено два учетных хода по линиям наиболее длинных диагоналей исследуемого участка, на каждом ходе – по 10 площадок, распределенных по всему ходу на одинаковом расстоянии друг от друга. Для удобства дальнейшего сопоставления с ортофотопланом при проведении работ по учетным ходам проводилась запись трека хода на GPS-приемник Garmin 78.

По жизненному состоянию подрост делили на три категории: жизнеспособный, нежизнеспособный и сухой, а по высоте – на три общепринятые группы: мелкий (до 0.5 м), средний (0.51–1.5 м), крупный (1.51–4 м) (рис. 2).

Для детального исследования текущих приростов и высот сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) отбирались модельные деревья – 10 шт. для каждого возраста (от 1 года до 13 лет)

и разной толщины почвенного горизонта (1, 2 и 6 см).

Отмечено, что растительность, как правило, сосредоточена в микропонижениях, где накапливается влага и появляется органика. По крупным трещинам в скальных выходах в основном произрастают мхи, лишайники и грибы, что связано с особенностями их онтогенеза. Для проведения аэрофотосъемки использовался БПЛА квадрокоптерного типа Phantom 4 pro, обладающий следующими техническими характеристиками: стандартной RGB-камерой (число эффективных пикселей 20 млн; разрешение полученных фотографий 5472×3648 пикселей) и спутниковыми системами позиционирования GPS и ГЛОНАСС (точность позиционирования в вертикальной плоскости ± 0.1 м – система визуального позиционирования, ± 0.5 м – позиционирование по спутникам; в горизонтальной плоскости ± 0.3 м – система визуального позиционирования, ± 1.5 м – позиционирование по спутникам).

Полет БПЛА проходил на высоте 110 м от уровня взлетной площадки (высота над уровнем моря 50 м) по всему исследуемому участку. Исходное разрешение съемки – 2.5–3 см на пиксель в зависимости от локальных высот рельефа. Дрон управлялся пилотом вручную с помощью мобильного приложения DJI GO 4 без использования полетного задания. Основные полетные характеристики: дата полета – 23.06.2021, высота полета – 110 м, угол наклона камеры – 80° , число сделанных снимков – 160 шт.

Полученные данные обрабатывали в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional Version 1.5.4, в котором реализована автоматизированная технология создания трехмерных моделей высокого качества на основе цифровых снимков. Алгоритм обработки данных включал реализацию предлагаемого в руководстве пользователя решения: выравнивание снимков, построение плотного облака точек, построение текстурированной модели, карты высот и ортофотоплана. Плотное облако точек дополнительно делилось на два класса: точки земли и низкая растительность, что было связано с дальнейшим измерением высот растений. Высота деревьев на облаках точек измерялась в ручном режиме с помощью инструмента «Линейка».

Для анализа количественного и видового распределения деревьев по исследуемой территории выполнено маркирование подроста в ручном режиме на ортофотоплане в программ-

ном обеспечении MapInfo, в котором доступно создание геоинформационных систем с картографическим материалом и базой данных по отдельным объектам. Для маркирования подроста на ортофотоплане задавались окружности радиусом 50 м, центры которых находились в центрах учетных площадок при натурном обследовании. После маркирования отдельных деревьев в базе данных каждому объекту задавались (при возможности) порода дерева и высота. После занесения всех объектов в базу данных был произведен экспорт в таблицу Microsoft Excel, где осуществлялись дальнейший подсчет и распределение деревьев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате фотограмметрической обработки данных выравнивание снимков было успешным для всех фотографий. Всего скорректировано 219 тыс. связующих точек со средней невязкой 0.5 пикселя (ошибка репроецирования), что позволило создать 66 млн точек плотного облака, трехмерную модель из 3.4 млн полигонов, карту высот с разрешением 9.666×7.581 пикселей и ортофотоплан местности (17.168×13.824 пикселей). Данные характеристики свидетельствуют о высоком качестве обработки.

Для исследуемого участка реконструирован ортофотоплан территории с пространственным разрешением 4.6 см на пиксель, привязанный к географической системе координат WGS-84, однако точность привязки не превышала 1–2 м, так как на борту квадрокоптера установлено стандартное навигационное оборудование (GPS) (рис. 3).

Для решения поставленных задач исследования данной точности было достаточно, в том числе для сопоставления данных с записью трека GPS-приемника при наземном исследовании.

Фрагментарно ортофотоплан имеет пробелы в данных (белые пятна на рис. 3, а), которые вызваны недостаточным перекрытием снимков по границе исследуемой территории. Растительность, произрастающая на месте пробелов данных на ортофотоплане, не обследовалась, так как она не была повреждена пожаром (тип леса – сосняк черничный, возраст – около 110 лет). На карте высот местности (рис. 3, б) хорошо просматривается подрост (отдельные деревья высотой от 1.5 м), при этом лучше всего идентифицируется сосняк, не поврежденный пожаром и имеющий соответствующие максимальные значения высоты над уровнем моря (75 м).

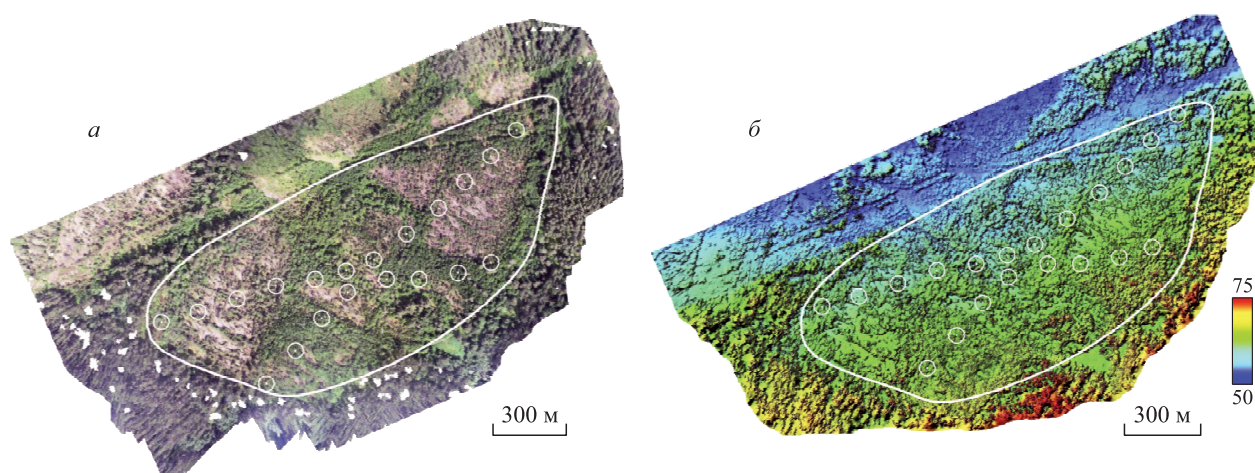


Рис. 3. Результат фотограмметрической обработки данных с БПЛА.

а – ортофотоплан; *б* – карта высот. Контур полигона – границы исследуемого участка, круги – контрольные участки (круговые площадки).

При анализе ортофотоплана было подсчитано, что обнажения скальных выходов имеются практически на всей исследуемой территории и занимают площадь 60 %. На представленных материалах хорошо видно, что часть растительности размещена по выходам скальных пород, ориентированных с юго-востока на северо-запад, что, вероятно, связано с морфологией коренных пород и крупными трещинами, которые сформированы за счет тектонической деятельности. Применение БПЛА позволило выявить характер размещения подроста, но с определением его численности и породного состава есть трудности. Мелкий подрост любых древесных пород (до 0.5 м) «не читается», так как крона у него слабо развита и представлена 1–3 боковыми побегами.

При количественном анализе распределения породного состава растительности по территории при векторном маркировании деревьев на ортофотоплане установлено, что легче всего распознаются деревья сосны обыкновенной из-за светло-сизого оттенка кроны и березы повис-

лой (*Betula pendula* Roth) ввиду ярко-зеленого контраста в сравнении с другими древесными породами. В результате подсчета древесных пород определено их количественное распределение – в соотношении 64 % сосна обыкновенная и 23 % береза повислая. Распознать до вида другие лесообразующие породы, как и состав молодняков в целом, на ортофотоплане не удалось, однако при подсчете их количество составляло 13 % от общего числа деревьев.

Натурные обследования показали, что через 15 лет после пожара сформировался жизнеспособный молодняк смешанного состава с преобладанием сосны обыкновенной (71 % от общего количества древесных пород) (табл. 1).

Кроме сосны на этой гари в формировании молодняков участвуют береза повислая (22 %), осина и ольха серая (по 3.5 %). Данные показатели согласуются с анализом ортофотоплана местности (погрешность составила менее 10 %).

При натурном обследовании подлеска выяснилось, что он представлен небольшим количеством кустарников: несколько видов ивы

Таблица 1. Распределение подроста по породам, группам высот и жизненному состоянию при натурном обследовании территории, экз./га

Порода	Крупный			Средний			Мелкий		
	Ж	НЖ	С	Ж	НЖ	С	Ж	НЖ	С
Сосна обыкновенная	2100	100	–	200	200	–	–	100	100
Береза повислая	600	100	200	700	–	300	800	–	–
Осина (<i>Populus tremula</i> L.)	100	100	200	700	500	700	4600	500	–
Ольха серая (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench)	100	–	–	300	–	–	100	–	–
И т о г о...	2900	300	400	1900	700	1000	5500	600	100

Примечание. Подрост: Ж – жизнеспособный, НЖ – нежизнеспособный, С – сухой.

Таблица 2. Видовой состав и численность подлеска, экз./га

Вид	Численность, экз./га	Средняя высота, м
Жимолость обыкновенная	170	0.53 ± 0.08
Ивы	1090	0.56 ± 0.03
Можжевельник обыкновенный	880	0.44 ± 0.06
Рябина обыкновенная	2200	0.78 ± 0.09
Шиповник собачий	160	0.37 ± 0.05
Итого...	4500	–

(*Salix* sp.), жимолость настоящая (*Lonicera xylosteum* L.), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) и шиповник собачий (*Rosa canina* L.) (табл. 2).

Общая численность подлесочных пород не превышает 4500 экз./га. Преобладает рябина обыкновенная. Идентификация подлеска и мелкого подроста на ортофотоплане не представлялась возможной из-за их небольших размеров.

Исследование живого напочвенного покрова не было целью исследования, так как ожидаемо он не будет идентифицироваться на ортофотоплане, данные приведены для описания почвенного плодородия и степени увлажнения.

Живой напочвенный покров на гари характеризуется неравномерным распределением, он встречается преимущественно пятнами по вы-

положенным участкам и микропонижениям, чередуясь со скальными выходами.

Обследование напочвенного покрова показало, что он представлен 16 видами, включая несколько видов мхов и лишайников (табл. 3).

По проективному покрытию доминирует политрихум можжевельниковый (*Polytrichum juniperinum* Hedw.) – 51 %, на долю лишайников приходится около 11 %, остальные виды покрывают 1–5 % площади опытного участка.

Встречаемость (В) определяли, как количество обследованной площади, на которой встречался тот или иной вид. У луговика извилистого (*Avenella flexuosa* (L.) Drejer) она составляет 100 %, а у политрихума можжевельникового и лишайников – по 90 %, у вереска (*Calluna* Salisb.) – 60 %, а у вейника (*Calamagrostis* Adans.) – 40 %.

Для анализа структуры молодняков по высоте построены трехмерные облака точек растительного полога и земной поверхности со скальными выходами. Пример созданной полигональной трехмерной модели исследуемого участка представлен по ссылке (Лесовосстановление..., 2022).

При сравнении высоты растений на фотограмметрических облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить только высоту растений для крупной общепринятой категории (> 1.5 м) и только для основных лесообразующих пород. При этом высоты, измеренные по данным с БПЛА, хорошо согласо-

Таблица 3. Видовой состав живого напочвенного покрова, сформировавшегося на гари, его встречаемость (В) и проективное покрытие (ПП), %

Вид	В	ПП
Брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	20	2.0
Вереск обыкновенный (<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull)	60	3.5
Вейник тростниковидный (<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth)	40	2.5
Золотарник обыкновенный (<i>Solidago virgaurea</i> L.)	30	1.5
Иван-чай узколистый (<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.)	30	1.5
Клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i> L.)	10	0.5
Кошачья лапка двудомная (<i>Antennaria dioica</i> (L.) Gaertn.)	10	0.5
Луговик извилистый (<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Drejer)	100	5.0
Луговик дернистый (<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P. Beauv.)	10	0.5
Ожика волосистая (<i>Lusula pilosa</i> (L.) Willd.)	20	1.0
Политрихум можжевельниковый (<i>Polytrichum juniperinum</i> Hedw.)	90	51.0
Черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	20	1.0
Ястребиночка обыкновенная (<i>Pilosella officinarum</i> F. W. Schultz & Sch. Bip.)	10	1.0
Гилокомиум блестящий (<i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Bruch et al.)	10	0.2
Дикран многоножковый (<i>Dicranum polysetum</i> Sw.)	10	0.2
Плевроциум Шребера (<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.)	10	0.2
Кладония оленья (<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F. H. Wigg.)	60	6
Кладония лесная (<i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.)	30	5

Таблица 4. Высота деревьев сосны обыкновенной, измеренная с использованием данных с БПЛА и наземным методом, м

Параметр	По данным с БПЛА	Наземные измерения
Высота:		
максимальная	6	5.8
минимальная	1.7	1.5
средняя	3.7	4
Стандартное отклонение	1.2	1

вывались с высотами, измеренными наземным методом (табл. 4).

Зависимость между высотами отдельных деревьев, полученных разными методами, весьма значительна ($R^2 = 0.95$), а значимых различий между высотами, полученными разными методами, не обнаружено.

Максимальная высота деревьев сосны обыкновенной на исследуемом участке не превышала 6 м, а средние значения варьировались от 3.5 до 4.5 м, что свидетельствует об успешности лесовозобновления на гари на скальных выходах, однако данный показатель на 20 % меньше высоты растений лесовозобновления на вырубках в Карелии (Смирнов и др., 2020).

Различия подроста по возрасту менее выражены. Основная часть подроста имеет возраст 12–13 лет. Это свидетельствует о том, что основное количество подроста появилось на гари после обильного урожая семян (через 2–3 года после пожара). Распределение подроста по высотам также практически не связано с возрастом. Исследование текущих приростов и высот 12-летних деревьев сосны обыкновенной пока-

зало, что в большей степени высота растений зависит от мощности горизонта A_0 (подстилки) (рис. 4).

При этом средняя мощность подстилки менялась от 1 до 6 см. Она состояла из опада хвои, мхов и кустарничков. Постепенно наблюдался переход в рыхлую массу грубого гумуса. Начало процесса образования гумусово-аккумулятивного горизонта наблюдалось при толщине подстилки не менее 4–5 см.

Из данных рис. 4 следует, что исследуемые деревья сосны обыкновенной имеют разные показатели высоты при одинаковом возрасте. Максимальные значения высот для всех возрастов имеют деревья, произрастающие в местах с толщиной подстилки 6 см. Уменьшение толщины подстилки до 1 см приводит к значительному снижению (в 3 раза) и высоты деревьев.

Данные результаты позволили построить ряд полиномиальных уравнений второй степени для растений одного возраста, а существенность различий статистически доказать по критерию t_{St} . Показатель t_{St} для средней высоты подроста сосны при толщине подстилки 1 и 6 см оказался равен $4.2 > 4$. Это означает, что различия достоверны в 100 % случаях. Критерий t_{St} при сравнении средних высот при толщине подстилки 2 и 6 см равен $2.6 > 2.58$, т. е. в 99 % случаях различия достоверны. Таким образом, установлено, что высота деревьев сосны обыкновенной после пожара при лесовосстановлении на скальных выходах зависит от мощности горизонта A_0 (запаса органического вещества).

По средней густоте подлесочные породы распределены в следующем порядке (по степени убывания): рябина, ива, жимолость, можжевель-

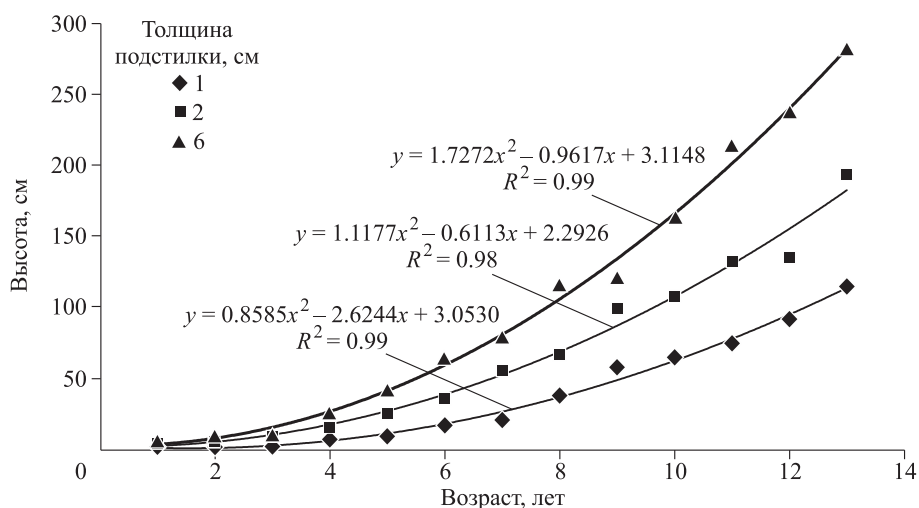


Рис. 4. Зависимость высоты сосны обыкновенной от возраста при разной мощности подстилки.

ник, шиповник. Максимальная высота жимолости достигает 0.8 м, ивы – 0.6 м, можжевельника – 0.6 м, рябины – 1.4 м, шиповника – 0.5 м.

Определить высоту подроста для мелкой и средней групп (от 0.5 до 1.5 м) не представлялось возможным в связи со сложностью их идентификации и разделения трехмерных облаков точек, относящихся к разным классам (земная поверхность и растительность). Для решения этой проблемы, вероятно, необходимо использовать мультиспектральную съемку с ближним инфракрасным (NIR) и/или дальним инфракрасным (RedEdge) каналами спектра (Dandois, Ellis, 2010).

Анализ материалов, полученных с помощью БПЛА, позволил с высокой точностью определить долю скальных обнажений и некоторые характеристики участков с восстанавливающейся растительностью. Видовой состав травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов не идентифицируется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований установлено, что самовозобновление древесных пород на гари даже в условиях бедных почв на скальных выходах идет вполне успешно. Натурные обследования показали, что после пожара сформировался жизнеспособный молодняк смешанного состава с преобладанием сосны обыкновенной (71 % от общего количества древесных пород). Начало процесса почвообразования наблюдалось только в микропонижениях, от толщины подстилки существенно зависела высота растений. Кроме сосны обыкновенной на этой гари в формировании молодняков участвуют береза повислая (22 %), осина и ольха серая (по 3.5 %). Подлесочные породы представлены рябиной, ивой, можжевельником, шиповником и жимолостью. Их небольшая высота связана с бедностью условий произрастания.

В результате фотограмметрической обработки данных, полученных с помощью БПЛА, был реконструирован ортофотоплан территории гари с пространственным разрешением 4.6 см на пиксель, что позволило произвести векторное маркирование деревьев, в результате которого было определено количественное распределение древесных пород в соотношении 64 % сосна обыкновенная и 23 % береза повислая. Данные показатели согласуются с натурным обследованием местности (погрешность составила менее 10 %). Подлесочные породы и мелкий подрост

лесообразующих пород на ортофотоплане идентифицировать не удалось.

При сравнении высоты растений на фотограмметрических облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить только высоту растений для общепринятой категории крупный (> 1.5 м). При этом высоты, измеренные по данным с БПЛА, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземным методом. Максимальная высота деревьев сосны обыкновенной на исследуемом участке не превышала 6 м, а средние значения варьировались от 3.5 до 4.5 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-316-90044 и Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия в рамках программы поддержки прикладных научных исследований и разработок студентов и аспирантов ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (Договор № 4-Г21 от 27.12.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аковецкий В. Г., Афанасьев А. В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Лесн. вестн. 2020. Т. 24. № 2. С. 29–36.
- Белова Е. И., Еришов Д. В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.
- Беляева Н. В., Грязькин А. В., Калинин П. М. Точность учетных работ при оценке естественного лесовосстановления // Вестн. Саратов. гос. агр. ун-та им. Н. И. Вавилова. 2012. № 8. С. 7–12.
- Вогель Д. К., Юфеев В. Г. Оценка лесных насаждений Волго-Ахтубинской поймы на основе фотограмметрической обработки данных цифровой аэросъемки // Изв. Нижневолжск. агр. ун-тского комплекса. 2018. № 3 (51). С. 203–209.
- Гаврилова О. И., Колганов Е. С., Пак К. А. Оценка успешности самовозобновления сосны на гари // Лесотех. журн. 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 142–149.
- Галецкая Г. А., Вьюнов М. В., Железова С. В., Завалишин С. И. Возможности обработки и анализа данных сверхлёгкого БПЛА SenseFly eBee в лесном хозяйстве // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. № 4. С. 11–18.
- Горохова И. Н., Борисочкина Т. И., Шишконокова Е. А. Использование снимков с беспилотного летательного аппарата для оценки экологического состояния почвенно-растительного покрова урбанизированной экосистемы // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 2014. № 74. С. 77–89.
- Грязькин А. В. Патент 2084129 РФ. МКИ С 6 А 01 G 23/00. Способ учета подроста // Бюл. Роспатента. 1997. № 20. 3 с.
- Грязькин А. В. Влияние факторов внешней среды на структуру и состояние подроста // Изв. СПб. лесотех. акад. 2000. Вып. 8 (166). С. 19–25.

- Дайнеко Д. В. Применение беспилотных летательных систем в лесной отрасли // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск: Изд-во Ин-та геогр. им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 59–62.
- Денисов С. А., Домрачев А. А., Елсуков А. С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестн. ПГТУ. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). С. 34–46.
- Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Дешифрирование форм и морфологических особенностей древесных растений на снимках, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Экосистемы. 2019. Вып. 20 (50). С. 197–202.
- Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Цифровое моделирование природно-ландшафтных комплексов по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов // Лесохоз. информ. 2020. № 3. С. 101–110.
- Куликов В. С., Куликова В. В. Докембрийская геология территории ботанического сада // Hortus Bot. 2001. Т. 1. С. 19–24.
- Лесовосстановление гари на скалах. 3D Model. Scetchfab, 2022. <https://skfb.ly/oqFWB>
- Никифоров А. А., Мунимаев В. А. Анализ зарубежных беспилотных летательных аппаратов, применяемых в лесном секторе // Тр. лесоинж. ф-та Петрозавод. гос. ун-та. 2010. № 8. С. 97–99.
- Осипенко А. Е., Коукал Я., Панин И. А., Иванчина Л. А., Залесов С. В. Опыт применения квадрокоптера для создания трехмерной модели лесных насаждений // Леса России и хозяйство в них. 2017. № 4 (63). С. 16–22.
- Петушкова В. Б., Потапова С. О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 717–722.
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». М.: Правительство РФ, 2021.
- Скуднева О. В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // ИВУЗ. Лесн. журн. 2014. № 6 (342). С. 150–154.
- Смирнов А. А., Богачев П. В., Смирнов А. П. Естественное возобновление на вырубках Карелии в связи с плодородием и увлажнением лесной почвы // Изв. СПб. лесотех. ун-та. 2020. Вып. 232. С. 20–32.
- Фетисова А. А., Грязькин А. В., Ковалев Н. В., Гуталь М. Оценка естественного возобновления хвойных пород на сплошных вырубках в условиях Рощинского лесничества // ИВУЗ. Лесн. журн. 2013. № 6 (336). С. 9–18.
- Эзов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо Гео-Сибирь. VIII Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Сб. мат-лов. В 2 т. 2012. Т. 2. № 3. С. 22–27.
- Dandois J. P., Ellis E. C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision // Rem. Sens. 2010. V. 2. Iss. 4. P. 1157–1176.
- Neuvillie R., Bates J. S., Jonard F. Estimating forest structure from UAV-mounted LiDAR point cloud using machine learning // Rem. Sens. 2021. V. 13. Iss. 3. Article N. 352. 18 p.
- Uutera J., Maltamo M. Impact of regeneration method on stand structure prior to first thinning: Comparative study in North Karelia, Finland vs. Republic of Karelia, Russian Federation // Silva Fenn. 1995. V. 29. N. 4. P. 267–285.

ASSESSMENT OF NATURAL FOREST REGENERATION AFTER FIRE USING DATA OBTAINED WITH UNMANNED AERIAL VEHICLE

A. V. Kabonen¹, O. I. Gavrilova¹, A. V. Gryazkin², K. A. Pak³

¹ Petrozavodsk State University

Prospekt Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185086 Russian Federation

² S. M. Kirov Saint Petersburg State University of Forest Engineering

Institutskiy pereulok, 5, St. Petersburg, 194021 Russian Federation

³ Karelesproekt, Branch of the Federal State Budgetary Institution «Roslesinforg»

Dzerzhinsky str., 9, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185035 Russian Federation

E-mail: alexkabonen@mail.ru, ogavril@mail.ru, lesovod@bk.ru, pak.ka@roslesinforg.ru

Analysis of the success of reforestation after a fire is the most important task of forestry. For these purposes, in the summer of 2021, aerial photography was carried out from a Phantom 4 pro UAV (Unmanned Aerial Vehicle) of a 15-year-old burnt-out (2006) along the north-western border of the Botanical Garden of Petrozavodsk State University (Republic of Karelia). In addition to this, a full-scale survey was carried out at the registration sites. Before the forest fire, rocky Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees grew. The work was carried out in order to assess the state of natural renewal after a fire along rocky outcrops by combining the processing of aerial photography data with field surveys. As a result of photogrammetric processing, an orthophotomap with a spatial resolution of 4.6 cm/pix, a height map and three-dimensional point clouds were reconstructed. To analyze the quantitative distribution of the territory according to the species composition, the trees were pinned on the orthophotomap according to the registration areas of field surveys, as a result of which the quantitative distribution of tree species was determined in the ratio of 64 % Scots pine and 23 % of drooping birch (*Betula pendula* Roth) (other species were not identified). Field surveys showed that after the fire, a viable young stand of mixed composition with a predominance of Scots pine (71% of the total number of tree species) was formed. In addition to Scots pine, drooping birch (22 %), aspen (*Populus tremula* L.) and gray alder (*Alnus incana* (L.) Moench) (3.5 % each) participate in the formation of young stands on this burned-out area. These indicators are consistent with the analysis of the orthomosaic of the area (the error is less than 10 %). When comparing the height of plants on three-dimensional clouds of points with field measurements, it was possible to reliably determine only the height of plants for a large generally accepted category (> 1.5 m). The maximum height of Scots pine trees in the study area is 6 m, and the average values varied from 3.5 to 4.5 m, which indicates the success of reforestation after burning on rocky outcrops.

Keywords: reforestation, rocky pine forest, burned-out forest, undergrowth, aerial photography, inventory.

How to cite: Kabonen A. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Pak K. A. Assessment of natural forest regeneration after fire using data obtained with UAV // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 11–20 (in Russian with English abstract).

УДК 630*221.04+630*231.1+633.877.3

ЛЕСОВОДСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЧЕРЕСПЛОСНО-ПОСТЕПЕННОЙ РУБКИ В СОСНЯКЕ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ КАРЕЛИИ

С. М. Синькевич*Институт леса – обособленное подразделение ФИЦ Карельский научный центр РАН
185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11*

E-mail: sergei.sinkevich@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 10.11.2021 г.

Защитные леса в Карелии приурочены преимущественно (80 %) к водным объектам и связанным с ними наземным экосистемам. Более 50 % этих лесов представлено древостоями из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Современная практика ведения хозяйства предпочитает экономичные упрощенные варианты рубок, ориентированных на использование естественного возобновительного потенциала сосняков, так как на сильнокаменистых почвах создание лесных культур представляет собой сложную задачу. На участке чересполосно-постепенной рубки (интенсивность 35 %) в разновозрастном сосняке черничном для оценки естественного возобновления поперек вырубленных полос через 9 лет после рубки были заложены три трансекты, состоящие из площадок 5 × 5 м общей длиной 1150 м. Под пологом древостоя подрост сосны представлен скудно. При общей встречаемости 15 % и средней высоте 1.2 м его густота составляет менее 0.2 тыс. шт./га, а угнетенное состояние не дает повода рассчитывать на улучшение роста. Лучшее состояние подроста ели (*Picea A. Dietr.*): встречаемость – 36 %, высота – 2.4 м, густота – 0.32 тыс. шт./га. На вырубленных полосах встречаемость соснового подроста 31 %, густота и встречаемость ели и березы (*Betula* L.) остались почти без изменений, резко возросло участие осины (*Populus tremula* L.) и ивы (*Salix* L.). Сильно разрослись травы, особенно на волоках, в частности иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), под влиянием которого густота и встречаемость хвойных вдвое ниже. В целом встречаемость и средняя высота сосны в середине и по краям полос близки. Проведенная рубка не обеспечила возобновления хвойных пород, достаточного для формирования нового древостоя, хотя появление в последние годы мелкого подроста сосны позволяет рассчитывать на дальнейшее увеличение его количества. Выполненная оценка увеличения радиального прироста деревьев по кернам показала его незначимость. Полученные результаты и литературные данные убеждают в обязательности минерализации почвы при проведении чересполосно-постепенных рубок.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, постепенные рубки, естественное возобновление, живой напочвенный покров, динамика прироста.

DOI: 10.15372/SJFS20220203

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Карелия 33.6 % земель лесного фонда занимают защитные леса (Лесной план..., 2018) в водоохранных зонах (17.7 %), запретные полосы вдоль водных объектов и нерестоохранные полосы (9.9 %), а также леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов, и особо охраняемые природные территории (6 %). Из них более 80 % связаны с защитой водных объектов и приуроченных к ним наземных экосистем и вносят большой вклад в сохранение

экологической устойчивости региона и сохранение биологического разнообразия.

В составе защитных лесов Карелии во всех возрастных группах доминируют сосняки, занимающие 1.6 млн га, или 60 % всей лесопокрытой площади, наиболее представлены спелые и перестойные насаждения (44.1 %). Здесь разрешены выборочные (Правила..., 2020) чересполосно-постепенные рубки, которые должны проводиться с соблюдением принципов сохранения и усиления полезных свойств леса. Вековой опыт лесоводственной науки и результаты масштаб-

ных производственных экспериментов в Карелии послужили основанием для вывода о том, что «при любой системе рубок для успешного возобновления сосны необходимы специальные мероприятия» (Валяев, 1989). В контексте повышения доходности лесов развитием этой мысли стала широко распространившаяся в последние 20 лет на Северо-Западе РФ по примеру скандинавских соседей идеология искусственного лесовосстановления тепличными сеянцами с закрытой корневой системой.

Однако в последнее время под влиянием осознания необходимости сохранения биоразнообразия и природного генофонда лесов в практику лесного хозяйства европейских стран возвращается ориентация на естественное возобновление, являющаяся одной из основ концепции устойчивого развития (Masternak et al., 2020). На фоне смешивания этих диаметрально противоположных тенденций, которому способствовала изменчивость современного лесного законодательства, ожидаемым развитием ситуации стало широкое распространение максимально упрощенных технологий сырьевого освоения защитных лесов. В классификации видов и способов рубок определяющими факторами являются срок и способ лесовозобновления (Чибисов, Вялых, 2005). Именно возможность легально отложить на неопределенное время заботы о лесовосстановлении сделала привлекательными для лесных арендаторов чересполосно-постепенные рубки в защитных лесах. Этому способствовали сведения об успешности возобновления сосны (*Pinus* L.) и сохранении продуцирующей способности площади под волоками из-за особенности схемы разработки лесосек (Помазнюк и др., 1990), подтвержденные более поздними публикациями о хорошей результативности естественного возобновления при проведении выборочных, узколесосечных и мелкоконтурных рубок в сухих сосновых борах (Hallikainen et al., 2019; Brichta et al., 2020).

В то же время для сохранения водоохранных-защитных свойств лесов необходимым минимумом является именно успешность возобновления главных пород в кратчайшие сроки. Существенным фактором считается также поддержание уровня прироста древесины, при котором обеспечивается испарение влаги, необходимое для сохранения водного режима почв. С учетом изложенного целью работы стала попытка оценить ход естественного возобновления и прирост в сосновом древостое, пройденном чересполосно-постепенной рубкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования представляет собой относительно разновозрастный высокополнотный древостой со средним составом 3С(110)2С(220)1С(320)1Е(100)2Б(1)Ос(70) III класса бонитета, сформировавшийся под влиянием проведенных около 110 и 45 лет назад выборочных рубок. Место произрастания – пологий (5°) склон восточной экспозиции на побережье Онежского озера. Район произрастания (62°09'17" с. ш., 34°36'53" в. д.) относится к среднетаежной подзоне и характеризуется средним для Карелии количеством осадков (550 мм), преобладанием западных ветров и довольно длительным вегетационным периодом (155 дней). Почва представляет собой маломощный щебнистый супесчаный среднеподзолистый бурозем, подстилаемый скальными породами основного состава; тип условий произрастания – черничный, варьирующий по склону от брусничного до кисличного. Первый прием чересполосно-постепенной рубки интенсивностью 35 % проведен в 2009 г., вырубленные полосы шириной 25 м ориентированы вдоль склона. Заготовка древесины велась комплексом «харвестер – форвардер» с прокладкой одного центрального волока; расстояние трелевки составляло в среднем 400 м, порубочные остатки укладывались на волок.

Учет естественного возобновления выполнен отдельно по породам и грациям высот на трех трансектах, состоящих из площадок 5 × 5 м общей длиной 1150 м, размещенных поперек вырубленных полос в верхней, средней и нижней частях склона. Средние показатели численности, встречаемости и высоты подроста анализировались с учетом расположения площадок относительно стен леса вырубленных полос. Для оценки динамики прироста отобраны буравом Пресслера керны на высоте 1.3 м с деревьев разных поколений по всей площади участка, а также с сосен младшего поколения – в опушечных частях не тронутых рубкой полос. Обработка и анализ собранной информации выполнены с использованием электронных таблиц Excel и программного пакета Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты естественного возобновления под пологом древостоя и на вырубленных полосах существенно различаются по численности и встречаемости сосны, которые удвоились, а так-

Таблица 1. Средние параметры подроста под пологом древостоя и на вырубленных полосах

Показатель	С	Е	Б	Ос	Ив	Олс
<i>Под пологом древостоя</i>						
Встречаемость, %	15	36	10	1	–	3
Густота, шт./га	186	319	106	19	–	50
Высота, м	1.2	2.4	2.8	2.0	–	3.8
<i>На вырубленных полосах</i>						
Встречаемость, %	31	35	14	9	8	6
Густота, шт./га	311	287	122	165	89	141
Высота, м	1.1	1.5	2.5	1.6	3.6	4.0

Примечание. Здесь и далее: С – сосна, Е – ель (*Picea A. Dietr.*), Б – береза (*Betula L.*), Ос – осина (*Populus tremula L.*), Ив – ива (*Salix L.*), Олс – ольха серая (*Alnus incana (L.) Moench.*).

же за счет поросли осины, ольхи серой и ивы, количество которых возросло в 5 раз (табл. 1).

При этом общая численность сосны, ели и березы осталась на уровне, не позволяющем сформировать хозяйственно ценное насаждение.

Распределение подроста по ширине вырубленных полос неравномерно и зависит от экспозиции относительно сторон света (табл. 2).

Сосновый подрост тяготеет к притененным южным зонам полос, однако там же сосредоточена значительная часть березы и ольхи, вдвое превышающих его по высоте. Встречаемость ели существенно выше по краям полос, причем в северной, наиболее освещенной части, ее вдвое больше, чем в середине. Сосредоточенная там же осиновая поросль при значительной средней густоте имеет низкую встречаемость.

Для оценки возможного осветляющего влияния рубки на естественное возобновление под пологом древостоя сопоставлены параметры подроста на разном расстоянии от стен леса также с учетом сторон света (табл. 3).

Какого-либо значимого влияния на сосновый подрост под пологом рубка не оказала, так как сосне требуется верхнее освещение. Встречаемость и густота ели, которой достаточно бокового освещения, в зоне 0–5 м от северной границы, прилегающей к вырубленным полосам, существенно выше по сравнению с центральной частью. При этом в южной, наиболее освещенной части средняя высота и ели и сосны несколько меньше за счет развития имевшегося до рубки мелкого подроста. Поросль лиственных пород сосредоточена в основном в южной части, но влияние на нее последней рубки недостоверно.

О влиянии рубки на итоговый результат возобновления главных пород можно судить по

Таблица 2. Параметры подроста в различных частях вырубленных полос относительно сторон света

Показатель	С	Е	Б	Ос	Ив	Олс
<i>Северная часть</i>						
Встречаемость, %	30	50	5	10	10	5
Густота, шт./га	280	380	40	200	80	40
Высота, м	1.3	2.1	2.0	1.8	2.5	3.0
<i>Средняя часть</i>						
Встречаемость, %	28	25	18	10	10	8
Густота, шт./га	260	210	150	200	120	210
Высота, м	1.1	1.8	2.3	1.6	3.0	4.0
<i>Южная часть</i>						
Встречаемость, %	29	38	19	10	5	5
Густота, шт./га	362	286	171	95	57	133
Высота, м	1.4	1.7	2.6	1.4	3.0	4.0

распределению подроста по категориям высот (табл. 4).

Доля мелкого соснового и елового подроста, появившегося после рубки на вырубленных полосах, в среднем вдвое выше, причем сосенки высотой до 0.3 м, выросшие в последние годы, закономерно приурочены к местам с наименее развитым травяно-кустарничковым покровом. Подроста высотой до 1 м на вырубленных полосах вдвое меньше, чем под пологом, что, по-видимому, связано с задержкой адаптации

Таблица 3. Параметры подроста под пологом древостоя в зависимости от экспозиции и удаления от стен леса

Показатель	С	Е	Б	Ос, Олс
<i>0–5 м от южной границы</i>				
Встречаемость, %	11	44	17	11
Густота, шт./га	200	422	156	89
Высота, м	0.9	1.4	3.6	3.0
<i>5–10 м от южной границы</i>				
Встречаемость, %	12	35	29	6
Густота, шт./га	188	235	353	47
Высота, м	1.3	3.1	2.9	2.0
<i>Более 10 м от границ леса</i>				
Встречаемость, %	19	32	6	4
Густота, шт./га	212	247	54	94
Высота, м	1.3	2.4	2.5	3.5
<i>5–10 м от северной границы</i>				
Встречаемость, %	6	41	–	–
Густота, шт./га	141	471	–	–
Высота, м	1.1	2.7	–	–
<i>0–5 м от северной границы</i>				
Встречаемость, %	12	47	6	–
Густота, шт./га	71	424	118	–
Высота, м	1.3	3.0	2.0	–

Таблица 4. Распределение подроста главных пород по категориям высот в разных частях делянки, %

Категория высот, м	Сосна		Ель	
	Полосы	Древо-стой	Полосы	Древо-стой
0.3	13	0	7	2
0.5	16	7	34	14
1	25	51	14	34
1.5	31	31	10	16
2	14	9	16	8
3	2	1	10	10
4	–	–	3	3
5	–	–	5	8
6	–	–	0	6
Итого...	100	100	100	100

имевшихся до рубки мелких особей к условиям вырубки и последующей конкуренцией травяного покрова. Более крупные экземпляры, сохраненные при рубке, быстрее оправились после рубки, увеличили прирост, и часть елей, находящихся непосредственно у стен леса, даже достигла пересчетных размеров.

Обширная лесоводственная литература, посвященная естественному возобновлению леса, свидетельствует о важной роли (в том числе при выборочных рубках) живого напочвенного покрова (Декатов, 1961; Мелехов и др., 1965; Рысин, 1970; Усов и др., 2017) и в частности – его видового состава (Беляева, Нойкина, 2008; Помазнюк и др., 2012; Сергиенко, Соколова, 2012). На объекте исследования пространственная

структура живого напочвенного покрова была изначально неоднородна в связи с разнообразием почвенных условий и прошлой хозяйственной деятельностью (табл. 5).

В целом под пологом насаждения в живом напочвенном покрове абсолютно доминирует черника (71 %), злаково-черничный покров преобладает на 18 %, бруснично-вересковый – на 4 и широколистный – на 7 % учетных площадок. Полосная рубка практически не повлияла на это распределение, только у южных стен леса немного сократилась доля черники за счет разрастания злаков.

На вырубленных полосах помимо радикального сокращения доли черники произошла пространственная дифференциация живого напочвенного покрова. В северной, наиболее освещенной зоне, почти в 10 раз выросла доля бруснично-верескового типа и в 3 раза – чернично-злакового. Центральная зона повсеместно заросла кипреем (*Chamaenerion* Ség.) с вкраплением островков вейника, а преобладание черники в сочетании со злаками сохранилось в притененных южных частях вырубленных полос. Анализ соответствия живого напочвенного покрова и естественного возобновления показал, что на вырубленных полосах наибольшая средняя плотность сосны (600–700 шт./га) приходится на площадки с бруснично-вересковым покровом, а ели (700–800 шт./га) – с чернично-злаковым. Под пологом древостоя наблюдается аналогичная закономерность, но там плотность сосны в группах у стен леса может достигать 1200 шт./га.

Таблица 5. Представленность типов живого напочвенного покрова в разных частях делянки с учетом экспозиции и удаленности от стен леса, %

Место- положение	Преобладающие виды					Итого
	Вереск (<i>Calluna</i> Salisb.), брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	Черника (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	Черника, злаки (Poaceae Barnhart)	Иван-чай (<i>Chamaenerion Ség.</i>), вейник (<i>Calamagrostis Adans.</i>)	Широкоотравье	
<i>На вырубленных полосах</i>						
Север	35	20	40	5	0	100
Центр	20	3	18	53	8	100
Юг	19	33	10	29	10	100
<i>Под пологом древостоя</i>						
Север, м:						
0–5	17	67	11	6	0	100
5–10	6	71	18	6	0	100
Середина	1	75	11	2	10	100
Юг, м:						
5–10	0	71	24	0	6	100
0–5	6	59	24	6	6	100

В наибольшей степени на вырубленных полосах проявляется отрицательное влияние иван-чая (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), разрастание которого на трелевочных волоках отмечено и другими исследователями (Ковалева, Собачкин, 2015). На площадках с его преобладанием численность сосны, ели и осины в 2 раза меньше, чем в среднем по вырубленной площади (152 шт./га), аналогично ниже их встречаемость (ок. 15 %), и, кроме того, вдвое ниже высота сосны (0.6 м). Параметры березы и ольхи серой на таких площадках близки к средним, а присутствие ивы увеличено вдвое. В лесоводственной литературе влияние иван-чая на возобновление хвойных оценивается в целом как положительное при условии не превышения им густоты 20–30 экз./м² (Декатов, 1961; Мелехов и др., 1965), но приводятся также сведения о токсичности его корневых выделений для древесных растений (Рысин, 1970). Концентрации иван-чая на волоках способствует повышенное содержание питательных веществ, высвобождающихся при разложении порубочных остатков. Но в связи с давно укоренившейся практикой сбора большей их части по окончании разработки делянки они превращаются в труднопреодолимое препятствие для укоренения и развития всходов сосны и ели. В связи с этим на площади 25-метровой лесосеки полоса шириной 6–7 м выпадает из процесса естественного лесовозобновления до тех пор, пока не перегниют, по крайней мере, мелкие веточки и в сплошном слое сучьев появятся просветы. Отрицательное влияние порубочных остатков при узкополосных рубках отмечалось ранее (Валяев, 1989), причем указывалось, что даже в случае прикапывания трактором в удаленных частях делянки сучья и ветви остаются лежать толстым рыхлым слоем. Преобладающая в настоящее время сортиментная технология заготовки позволяет использовать пасечные волокна длиной до 400 м, на которых в случае чересполосно-постепенной рубки будет выполнено около 15 рейсов форвардера. При этом, по крайней мере, половина длины волокна будет использована для вдвое меньшего числа рейсов, в ходе которых эффективное уплотнение нереально.

В связи с широким распространением чересполосно-постепенных рубок их результаты закономерно находят отражение в публикациях российских, белорусских и латвийских лесоводов, в том числе и с указаниями на недостаточность естественного возобновления (Борко и др., 2013; Ильинцев и др., 2017; Усов и др., 2017;

Шиман, Клыш, 2017; Rums et al., 2019), причем отмечалось, что недостижение цели такой рубки в условиях Беларуси весьма распространено (Рожков и др., 2014). Закономерным выводом из этого является понимание необходимости проведения мер содействия (Потапенко, Мохначев, 2016; Ильинцев и др., 2019; Rums et al., 2019), сопровождающих рубки в сосняках во всех географических подзонах (Санников С. Н., Санников Д. С., 2015). Приводимые в публикациях примеры успешной практической реализации активного содействия возобновлению при чересполосно-постепенных рубках в сосняках ограничены плужной обработкой почвы (Борко, 2012; Видякин, 2012; Борко и др., 2013; Шиман, Клыш, 2017), которая на мелких сильнокаменистых почвах вряд ли будет приемлема.

В отношении перспектив влияния чересполосно-постепенной рубки на прирост оставляемой части древостоя в условиях объекта исследования может представлять интерес только наиболее молодое поколение сосны, так как более старые экземпляры, достигшие возраста естественной спелости, уже слабо реагируют на изменения внешней среды и, в частности, на проведение рубок, история которых запечатлена в динамике радиального прироста (рис. 1).

В сформировавшемся сосновом древостое увеличение освещенности в результате чересполосной рубки может оказать влияние только в опушечной части древостоя, так как кроны всех деревьев расположены на одном уровне по высоте. Этой же зоной практически ограничивается и прогревание почвы, что подтверждается реакцией подроста (см. табл. 3) и живого напочвенного покрова (табл. 5) под пологом древостоя. Сопоставление динамики радиального прироста младшего поколения сосны (120 лет) в опушках вдоль вырубленных полос с приростом в центральной части между ними показало, что в первые 5 лет после рубки прирост у северных границ вырубленных полос увеличился в среднем на 29 %, а у южных – лишь на 14 % (рис. 2).

Впоследствии эта разница элиминировалась и в среднем за 10 лет составила 23 %.

Принимая во внимания суммарную ширину опушечных полос (около 15 м), долю младшего поколения сосны в составе древостоя, а также средние размеры деревьев ($D = 36$ см, $H = 23$ м) и исходный уровень радиального прироста (0.65 мм), можно прийти к выводу об увеличении текущего прироста древостоя (Казимиров, Кабанов, 1976), оставленного после первого приема рубки, на 0.1 м³/га площади, занятой древостоем.

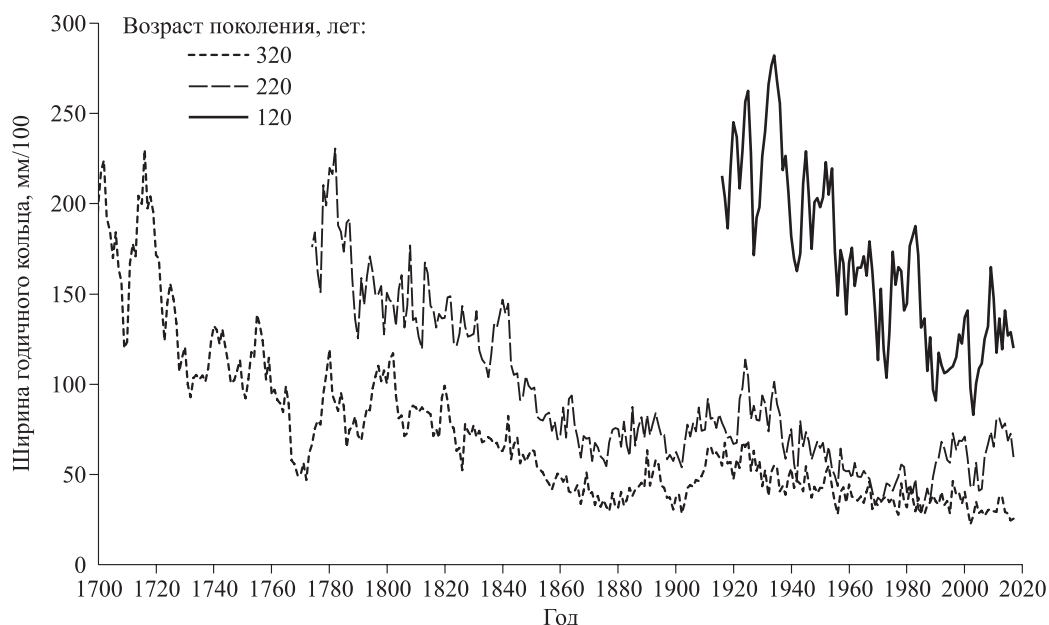


Рис. 1. Динамика радиального прироста сосны разных поколений.

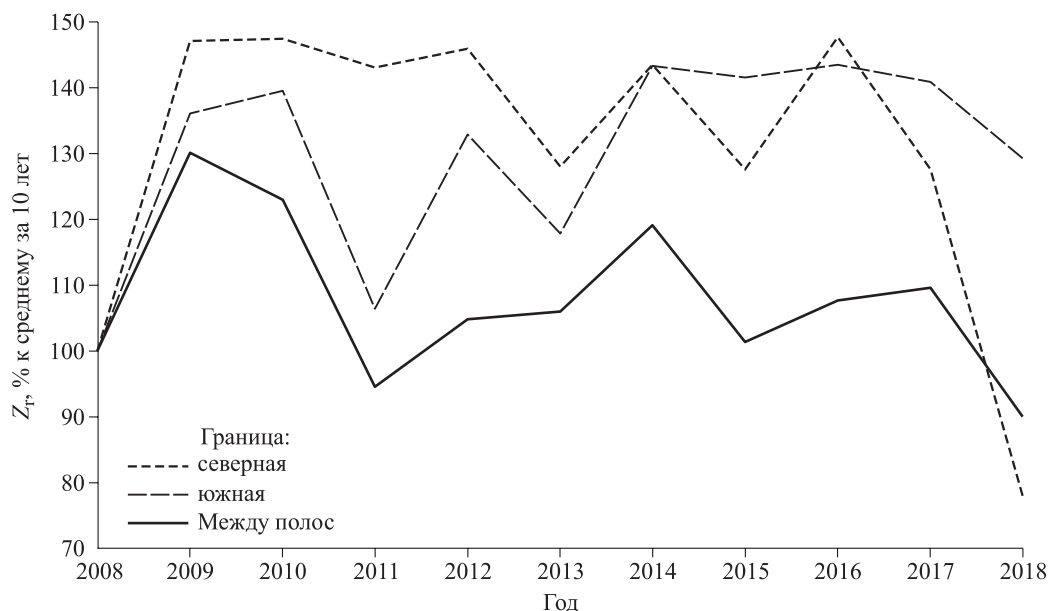


Рис. 2. Добавочный радиальный прирост сосны (Z_r) в опушках вдоль вырубленных полос.

В экологическом аспекте это в лучшем случае – компенсация потерь от снижения устойчивости древостоя, а для целей лесовыращивания и лесопользования – незначительная величина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чересполосно-постепенные рубки приобрели в последнее десятилетие большое значение как способ освоения расчетной лесосеки в защитных лесах без особого увеличения затрат на отвод лесосек. Поскольку основной целью освоения защитных лесов является «сохранение сре-

добразующих, водоохраных, защитных, санитарно-гигиенических, оздоровительных и иных полезных функций» (Лесной кодекс..., 2006), получение информации о восстановлении вырубаемых насаждений важно для оценки и возможной корректировки цикла лесоводственных мероприятий, на проведение которых согласно «Правилам заготовки древесины...» (2020) отводится 20 лет.

Выполненное исследование показало, что в среднетаежном сосняке преобладающего в лесном фонде республики типа леса и уровня производительности при существующем положении

естественное возобновление не решает задачи восстановления и поддержания необходимого уровня экосистемных услуг. Это относится как к предварительному возобновлению под пологом материнского древостоя, так и к последующему на всей территории делянки. На фоне высокой пространственной вариабельности густоты ($V > 100\%$) попытка выявить какие-либо участки с достаточными параметрами естественного возобновления не привела к успеху. По всей территории делянки густота и встречаемость подроста хозяйственно ценных пород оказались в разы меньше показателей, необходимых для формирования нового насаждения, функционально аналогичного вырубленному.

Исследованием также выявлено, что снижение водоохранно-защитного функционала насаждения, произошедшее по причине фактического сокращения покрытой лесом площади, не может быть компенсировано достигнутым увеличением прироста оставшейся после рубки части древостоя.

Прописанный в «Правилах заготовки древесины...» (2020) алгоритм разрешения такой ситуации предусматривает оценку состояния возобновления к моменту проведения последующих приемов рубки с искусственным лесовосстановлением. Однако на 25-метровой полосе механизированная подготовка почвы неизбежно уничтожит большую часть все же появившегося после первого приема подроста, но не устранит губительного влияния, сформировавшегося за 10 лет покрова злаков на высаженные сеянцы.

Единственным рациональным решением проблемы восстановления и сохранения водоохранного потенциала эксплуатируемых защитных лесов представляется повсеместное проведение минерализации поверхности почвы при чересполосно-постепенных рубках и соответствующая корректировка нормативной базы с учетом региональных условий.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН (Институт леса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляева Н. В., Нойкина А. М. Успешность естественного возобновления сосны на вырубках в зависимости от типа леса // Актуал. пробл. лесн. комплекса. 2008. № 21 (3). С. 6–13.

Борко А. Ч. Особенности возобновительных процессов в сосновых лесах после проведения полосно-постепенных рубок главного пользования // Тр. БелГТУ. Сер. Агр. науки. 2012. № 1. С. 109–113.

Борко А., Лабоха К., Шиман Д. Естественное возобновление после полосно-постепенных рубок в сосняках Беларуси // Лесн. и охот. хоз-во. 2013. Июль. С. 25–31.

Валяев В. Н. Выборочные и сплошнолесосечные рубки в Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1989. 102 с.

Видякин А. И. Естественное возобновление сосны при проведении постепенных рубок в подзоне хвойно-широколиственных лесов Вятско-Камского междуречья // Агр. вестн. Урала. 2012. № 11 (103). С. 56–57.

Декастов Н. Е. Мероприятия по возобновлению леса при механизированных лесозаготовках. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1961. 278 с.

Ильинцев А. С., Третьяков С. В., Наквасина Е. Н., Амосова И. Б., Алейников А. А., Богданов А. П. Влияние длительно-постепенных рубок в смешанных сосновых насаждениях на естественное лесовозобновление, живой напочвенный покров и некоторые свойства верхних горизонтов почвы // Лесотех. журн. 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 85–99.

Ильинцев А. С., Третьяков С. В., Контев С. В., Богданов А. П. Применение сплошных узколесосечных рубок и их влияние на естественное лесовозобновление в Емцовском учебно-опытном лесхозе Архангельской области // Сб. тр. СевНИИЛХ. 2019. С. 19–30.

Казимиров Н. И., Кабанов В. В. Лесотаксационные таблицы. Петрозаводск: Карелия, 1976. 32 с.

Ковалева Н. М., Собачкин Р. С. Напочвенный покров и возобновление сосны после выборочных рубок в сосняках Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 2. С. 105–112.

Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 02.07.2021). М.: Эксмо-Пресс, 2022. 144 с.

Лесной план Республики Карелия на 2019–2028 г. Утв. распоряжением главы РК от 24.12.2018 № 731-р. Петрозаводск, 2018. 234 с.

Мелехов И. С., Корконосова Л. И., Чертовской В. Г. Руководство по изучению типов концентрированных рубок. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1965. 180 с.

Помазнюк В. А., Поздеев Е. Г., Деминцев Ю. И. Полосно-постепенные рубки в лесах I группы // Леса Урала и хоз-во в них. 1990. Вып. 15. С. 50–55.

Помазнюк В. А., Залесов А. С., Магасумова А. Г. Влияние полосно-постепенных рубок на лесовозобновление в производных березняках Новоялинского лесхоза // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30. № 3–4. С. 303–306.

Потапенко А. М., Мохначев П. Е. Характеристика лесовозобновительных процессов в сосновых насаждениях после проведения первого приема равномерно-постепенных рубок // Актуал. пробл. лесн. комплекса. 2016. Вып. 44. С. 55–58.

Правила заготовки древесины и особенности заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации. Утв. Приказом Минприроды России от 01.12.2020 № 993. М.: Минприроды, 2020. 52 с.

Рожков Л. Н., Давыдовская Т. Д., Бельчина О. Г. Эффективность несплошных рубок в сосняках Негорельского

- учебно-опытного лесхоза // Актуал. пробл. лесн. комплекса. 2014. № 38. С. 48–52.
- Рысин Л. П. Влияние лесной растительности на естественное возобновление древесных пород под пологом леса // Естественное возобновление древесных пород и количественный анализ его роста. М.: Наука, 1970. С. 7–53.
- Санников С. Н., Санников Д. С. Система рубок и возобновления сосновых лесов на эколого-географической основе // Сиб. лесн. журн. 2015. № 6. С. 3–16.
- Сергиенко В. Г., Соколова О. И. Динамика живого напочвенного покрова и естественное лесовозобновление на вырубках // ИВУЗ. Лесн. журн. 2012. № 2. С. 35–41.
- Усов М. В., Залесов С. В., Шубин Д. А., Толстиков А. Ю., Белов Л. А. Перспективность применения чересполосных постепенных рубок в сосняках Алтая // Агр. вестн. Урала. 2017. № 1 (155). С. 44–48.
- Чибисов Г. А., Вялых Н. И. Системы рубок главного пользования и лесовосстановления в таежной зоне Европейской части России // ИВУЗ. Лесн. журн. 2005. № 4. С. 49–61.
- Шиман Д. В., Клыш А. С. Возобновление сосновых насаждений после проведения первых приемов полосно-степенных рубок в Нарочанско-Вилейском геоботаническом районе Беларуси // Состояние и перспективы развития лесного хозяйства: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Омск, 13–14 марта 2017 г. Омск: Омск. гос. агр. ун-т, 2017. С. 38–42.
- Brichta J., Bílek L., Linda R., Vítámvás J. Does shelterwood regeneration on natural Scots pine sites under changing environmental conditions represent a viable alternative to traditional clear-cut management? // Centr. Europ. For. J. 2020. V. 66. Iss. 2. P. 104–115.
- Hallikainen V., Hökkä H., Hyppönen M., Rautio P., Valkonen S. Natural regeneration after gap cutting in Scots pine stands in northern Finland // Scand. J. For. Res. 2019. V. 34. Iss. 2. P. 115–125.
- Masternak K., Głębocka K., Surowaniec K., Kowalczyk K. Growth traits of natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in south-eastern Poland // Folia For. Pol. Ser. A. 2020. V. 62. Iss. 3. P. 220–226.
- Rums O., Straupe I., Zdors L. Comparison of regeneration of Scots pine *Pinus sylvestris* L. in *Myrtillosa* and *Hylocymiosa* forest types after shelterwood cuttings // Forestry and Wood Proc. 2019. V. 35. P. 55–60.

SILVICULTURAL EFFICIENCY OF STRIP-SHELTERWOOD FELLING IN PINE STAND OF MID-TAIGA SUBZONE OF KARELIA

S. M. Sinkevich

*Institute of Forest, Federal Research Center Karelian Scientific Centre
of the Russian Academy of Sciences
Pushkinskaya str., 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation*

E-mail: sergei.sinkevich@krc.karelia.ru

The protective forests in Karelia are concentrated mainly (80 %) around water objects. More than 50 % of these forests are presented by Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. Modern practice of forestry prefers the simplified felling types oriented on use of natural renewal potential of pine forests because artificial regeneration on stony soils are very complex. On a site of the strip-shelterwood felling (intensity of 35 %) in an uneven-age pine stand of bilberry type in 9 years after the felling three transects consisting of plots of 5 × 5 m with a total length of 1150 m across the clear-cut strips were established for an assessment of natural renewal. Under forest canopy pine undergrowth is presented poorly. At the general frequency of 15 % and average height of 1.2 m its density is less than 0.2 thousand tress per ha, and its condition does not give a hope to expect of growth improvement. The condition of spruce (*Picea* A. Dietr.) undergrowth is better: its frequency – 36 %, height – 2.4 m, and density – 0.32 thousand tress per ha. On the cutted strips the pine frequency are 31 %, density and frequency of spruce and birch (*Betula* L.) remained almost without changes; the participation of an aspen (*Populus tremula* L.) and willow (*Salix* L.) are increased sharply. The strip-roads are covered by willow weed (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), under the influence of which density and frequency of the conifers is twice lower. On the whole, the frequency and average height of a pine in the middle and at the edges of cutted strips are close. The executed felling did not provide the renewal of coniferous species sufficient for formation of a new forest stand, though emergence in recent years of the small undergrowth of a pine allows to count on his further quantitative increase. The executed assessment of increase in a radial growth of trees on cores showed his insignificance. The obtained results and literary data convince of obligatory need of a scarification of the soil surface during the strip-shelterwood felling execution.

Keywords: Scotch pine, shelterwood felling, natural regeneration, ground vegetation, dynamics of increment.

How to cite: Sinkevich S. M. Silvicultural efficiency of strip-shelterwood felling in pine stand of mid-taiga subzone of Karelia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 21–28 (in Russian with English abstract).

УДК 630*182.22

СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСНЫХ ФРАКЦИЙ И ОБЪЕМЫ КОМПОНЕНТОВ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛОВЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ ТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

В. Г. Стороженко

Институт лесоведения РАН

143030, Московская обл., Одинцовский р-он, с. Успенское, ул. Советская, д. 21

E-mail: lesoved@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2021 г.

Рассмотрены проблема оценки баланса накапливаемой и разлагаемой древесной биомассы в лесных сообществах и бюджет C , CO_2 , H_2O и Q в коренных девственных разновозрастных лесах еловых формаций таежной зоны Европейской России. Исследования проведены в конкретных биогеоценозах разных динамических характеристик в подзонах северной, средней и южной тайги. Изучены количество и объем структурных элементов возрастных рядов коренных девственных разновозрастных еловых биогеоценозов различного сукцессионного положения, динамика формирования стволовой фракции древесного опада (валежа), пулы и потоки компонентов, депонированных в древесине стволовой фракции фитоценозов, и древесный отпад в едином сукцессионном ряду биогеоценозов различных динамических характеристик. На пробных площадях проведен цикл исследований, позволивших получить сведения о возрастных структурах древостоев, их динамических показателях, объемах деревьев в возрастных поколениях древостоев, текущего древесного опада и валежа. Все объемные показатели древостоев и древесного опада переведены в фитомассу. Объемы C , CO_2 , H_2O и Q (энергии), депонированные в древесине и выделяющиеся при ее разложении дереворазрушающими грибами, вычислены при помощи формулы микогенного ксилолиза древесины. На примере елового биогеоценоза подзоны средней тайги климаксовой фазы динамики рассчитана масса углерода, разных фракций древесины, представленная в графическом изображении. Определено, что объемы пулов и потоков компонентов древесины в древостоях и при разложении древесины грибами-деструкторами определяются структурными особенностями возрастных рядов древостоев, объемами древесного опада в грациях стадий разложения. Совместный анализ возрастных структур древостоев, структур текущего древесного опада и валежа по стадиям разложения помогает более точно определить динамическое положение лесного биогеоценоза в расширенном пространстве его сукцессионного развития. В наиболее устойчивых (климаксовых) девственных еловых лесах тайги балансовые соотношения накопления и разложения биомассы представляют собой модель оптимального бюджета и могут расцениваться как эталонные в сравнении с лесами различного происхождения и структурных характеристик.

Ключевые слова: *структуры коренных еловых лесов тайги, пулы и потоки C , CO_2 , H_2O и Q (энергии), баланс биомассы устойчивых ельников.*

DOI: 10.15372/SJFS20220204

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные проблемы масштабных сокращений площадей природных экосистем, продуцирующих кислород и поглощающих углекислый газ, нарушение баланса воспроизводства биомассы и ее утилизации, прогрессирующий техногенный пресс на природные комплексы, сопровождающийся их деградацией и зачастую

уничтожением, выбросы промышленных производств с выделением огромных объемов CO_2 и другие, следующие за ними неконтролируемые воздействия на экосистемы, напрямую связываются с изменением газового состава атмосферы, развивающимся «парниковым эффектом» и разнообразными природными катаклизмами. Осознание надвигающихся природных катастроф определяет актуализацию исследований,

связанных с определением объемов компонентов, содержащихся в биомассе древостоев лесных экосистем, входящих в то же время в состав парниковых газов и выделяющихся в атмосферу при разложении этой биомассы. Лесные экосистемы России составляют около 20 % лесов мира и значительный объем биомассы планеты. По некоторым данным (Замолодчиков и др., 2005; Zamolodchikov et al., 2005), запасы углерода в лесах России составляли на период до 2003 г. 34.17×10^9 т. При этом, как правило, расчеты этих показателей в масштабах России основываются на данных учета Государственного лесного фонда России (Исаев и др., 1993; Уткин и др., 2001; Швиденко и др., 2003, Замолодчиков и др., 2005; Zamolodchikov et al., 2005; Мониторинг..., 2008; и др.). Принимая эти сведения как ориентировочные из-за неопределенности оценок при учете запасов древесины в лесах с различными лесоводственными характеристиками на всей территории России, необходимо рассматривать и более мелкие лесные объекты – лесные биогеоценозы, на анализе которых возможно с большей точностью рассматривать пулы и потоки углерода (C), диоксида углерода (CO₂), воды (H₂O) и энергии (Q). Исследования в этом направлении связываются со следующей логикой эволюционного развития лесных сообществ.

Формирование структур девственных лесных биогеоценозов, развивающихся без вмешательства в их сукцессионную динамику каких-либо экзогенных факторов воздействия, подчинено эволюционным законам балансового равновесия воспроизводимой и разлагаемой биомассы в коадаптационной зависимости автотрофных и гетеротрофных консортов лесных сообществ (Selleck, 1960; Сукачев, 1964; Демаков, 2000; Стороженко, 2007; Стороженко и др., 2018). Эта парадигма определяет основное содержание понятия устойчивости лесных сообществ. Она рассматривается как базовая, созданная эволюцией платформа функционирования лесного сообщества, при которой весь цикл накопления и разложения биомассы с участием углерода, кислорода, водорода, энергии Солнца и минеральных элементов почвы сбалансирован на всех уровнях биосферы и атмосферы. Показатели биомассы древесины фитоценозов, пулов и потоков компонентов живой и отмершей структур биогеоценозов в объемном и числовом выражении также должны быть подчинены этой же парадигме формирования балансовых законов функционирования устойчивых лесных со-

обществ. Рассчитанные значения обозначенных компонентов в коренных девственных, эволюционно сформированных лесных сообществах могут служить базовыми в сравнительной оценке с лесами других структур и происхождения (Стороженко и др., 2018). В настоящее время оценкой таксономического, генетического, функционального, структурного разнообразия лесов озабочены ученые ведущих научных центров России и зарубежья. Их исследования создают основу для дальнейшего изучения коренных девственных лесных сообществ (Стороженко, 2002, 2007, 2014; Восточноевропейские леса..., 2004; Коренные еловые леса..., 2006; Мониторинг..., 2008; Cardinale et al., 2011; O'Connor et al., 2017; Стороженко и др., 2018; Лукина и др., 2020; Lukina et al., 2020; и др.).

В генезисе коренного эволюционно развивающегося лесного биогеоценоза его жизненное пространство определяется бесконечной сменой возрастных поколений возрастных рядов древостоя, даже если этот цикл может периодически повторяться от нулевого состояния (например, после сплошного ветровала или пожара) (Мониторинг..., 2008) до климакса. На пространстве этого генезиса наиболее сбалансированным по биомассе слагающих биогеоценозы консортов признается климаксовое динамическое положение лесного сообщества, которое характеризует его как наиболее устойчивое по структурным и функциональным параметрам в девственных еловых лесах тайги (Сукачев, 1964; Дыренков, 1984; Демаков, 2000; Стороженко и др., 2018; и др.).

В этой связи представляет фундаментальный интерес изучение числовых и объемных показателей, депонированных в древесине и выделяющихся при ее разложении компонентов на разных этапах сукцессионного развития малых объектов лесных сообществ, которые наиболее наглядно проводить в девственных лесах еловых формаций различных динамических показателей, наиболее устойчивых в сохранении структурных и функциональных особенностей древостоев. В лесах эволюционного формирования, близких или непосредственно относящихся к фазе климакса, можно рассмотреть следующую цепь преобразований в биогеоценозах – процессы накопления биомассы древостоями фитоценозов, процессы отмирания живых деревьев и перевода их в древесный отпад, процессы разложения древесного отпада до состояния гумуса дереворазрушающими грибами, согласованные во времени, протекают в одном временном

пространстве с одинаковой скоростью и должны быть эталонами структурных и функциональных показателей лесной биосистемы.

Цель настоящего исследования – изучить количественные и объемные показатели структурных элементов возрастных рядов коренных девственных разновозрастных еловых биогеоценозов различного сукцессионного положения, динамику формирования стволовой фракции древесного опада (валежа), пулы и потоки C , CO_2 , H_2O и Q (энергии), депонированные в древесине стволовой фракции фитоценозов и древесного опада в едином сукцессионном ряду на разных этапах развития биогеоценозов различных динамических характеристик.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований приняты коренные разновозрастные девственные еловые древостои таежной зоны Европейской России, в подзоне северной тайги – еловые биогеоценозы Нямозерского лесничества Кандалакшского лесхоза Мурманской области (1) (66.944478 с. ш. 31.61376 в. д.), Северодвинского лесхоза Архангельской области (2) (64.499166 с. ш.; 39.838241 в. д.), национального парка «Югыд-Ва» Подчерского лесничества Коми Республики предгорий Урала (3) (63.940461 с. ш.; 57.585186 в. д.); в регионах средней тайги – ельники резервата «Вепсский лес» Ленинградской области (4, 5) (60.647025 с. ш.; 34.721037 в. д.), Андомского лесничества Вологодской области, урочище «Атлека» (6) (61.304582 с. ш.; 36.808353 в. д.); в южной тайге – ельники заповедника «Кологривский лес» в Костромской области (7, 8) (58.860240 с. ш.; 43.840790 в. д.) и Центрально-лесного биосферного заповедника в Тверской области (9) (56.458840 с. ш. 32.967130 в. д.).

Все отобранные для анализа биогеоценозы расположены в наиболее типичных для подзон тайги условиях произрастания, как правило, черничной группы типов леса – от чернично-кисличных до чернично-сфагновых. На посто-

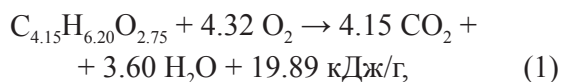
янных пробных площадях осуществлялся цикл исследований, включавший следующие виды работ. Лесоводственное описание биогеоценозов с определением состава древостоев (с последующей корректировкой по результатам перечетов), полноты, бонитета, подроста, подлеска, напочвенного покрова. После закладки пробных площадей (пп) вся площадь разбивалась на квадраты 10×10 м, проводились нумерация деревьев, сплошной пересчет по диаметрам, ярусам и категориям состояния (Правила..., 2013). Керны отбирались у шейки корня деревьев возрастным буром Пресслера. По кернам бурения по годичным кольцам определялись возрасты деревьев. Фиксировались дефекты древесины, присутствие гнилей с разделением их по диаметрам, типам и степени развития в стволах деревьев. Картирование расположения деревьев и стволов древесного опада (валежа) на пробной площади проводилось по размеченным квадратам. Подрост всех пород учитывался с разбивкой его по грациям высоты через 0.5 м до диаметра 6 см. Деревья диаметром 6 см и более входили в общий пересчет состава древостоя. Картирование и описание валежа проводилось по разработанной ранее методике с учетом морфометрических характеристик стволов валежа – порода, диаметр ствола, стадия его разложения (Стороженко, 1990; Стороженко, Шорохова, 2012; Шорохова, 2020) (табл. 1).

В камеральный период вычислялись количественные и объемные показатели деревьев в возрастных поколениях возрастных рядов древостоев (Третьяков и др., 1952), определялись динамические показатели биогеоценозов (Дыренков, 1984), состояние деревьев, количество и объемы текущего древесного опада и валежа по стадиям разложения (Стороженко, 1990). Объемы стволов деревьев и валежа рассчитывались по таблицам с использованием данных высот деревьев и разрядов высот для ели (*Picea A. Dietr.*), соответствующих условиям произрастания конкретных биогеоценозов каждой подзоны тайги, измеренных на пробных площадях в эксперименте (Третьяков и др., 1952). Запасы и объемы древесины переводились в фитомассу по

Таблица 1. Сокращенная шкала датировок процесса разложения валежа ели, лет

Показатель	Стадия разложения				
	1	2	3	4	5
Южная тайга	1 – 3	4 – 20	21 – 30	31 – 40	41 – 50
Северная тайга	1 – 5	6 – 25	26 – 35	36 – 45	46 – 60
Стадия ксилолиза	Начальная	Максимальная	Затухающая	Конечная	Гумификация

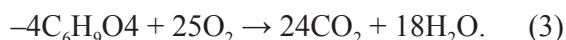
конверсионным коэффициентам в пределах широтных полос: для северной тайги – 0.75, средней – 0.68 и южной – 0.73 (Замолодчиков и др., 2003). Содержание в фитомассе древесины CO_2 , H_2O и Q (энергия) рассчитывалось по формуле микогенного ксилолиза древесины, предложенной В. А. Соловьёвым (1992). Масса углерода вычислялась отдельно как 49.9 % от фитомассы древостоя по формуле



в более упрощенном варианте:

$$100 \text{ частей древесины} + 138.4(\text{O}_2) = 182.6 (\text{CO}_2) + 55.8 (\text{H}_2\text{O}) + 19.89 \text{ кДж/г}. \quad (2)$$

После дальнейших преобразований формула микогенного ксилолиза приобретает следующий вид:



По утверждению В. А. Соловьева (1992), формулы 1 и 3 «имеют фундаментальное значение для решения многих задач, связанных с ксилолизом» (с. 157)

Полученные сведения позволили ответить на поставленные вопросы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принятые для исследований коренные разновозрастные девственные ельники по географическому положению в широтных координатах наиболее рассредоточены в подзоне северной тайги – от западных границ России до предгорий Урала (около 1300 км), где в составе древостоев обычны кедр (*Pinus sibirica* Du Tour), лиственница (*Larix* Mill.), пихта (*Abies* Mill.) и кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel.). Наиболее компактно размещены биогеоценозы средней тайги, где между крайними объектами расстояние всего 280 км. Изучаемые ельники южной тайги отстоят друг от друга на 600 км, что определяет участие пихты в составе древостоев востока Костромской области.

Структура коренных разновозрастных ельников по многочисленным литературным источникам и нашим многолетним исследованиям в еловых массивах различных подзон тайги Европейской России имеет разнообразное строение возрастных рядов древостоев биогеоценозов (Воропанов, 1950; Гусев, 1964; Комин, Семечкин, 1970; Дыренков, 1984; Стороженко, 2007;

Мониторинг..., 2008; и др.). В свою очередь, это разнообразие связано с различным структурным содержанием биогеоценозов и их динамическими характеристиками, участием деструктивных комплексов в процессах накопления и разложения биомассы древостоев (табл. 2).

Разнообразное структурное строение еловых сообществ определяет и различные по объему и массе потоки поглощения газов из атмосферы древостоями и выделения их при разложении отмершей биомассы в основном комплексом деструктурирующих грибов и грибов различного таксономического состава на разных стадиях утилизации древесной массы. В концептуальной работе некоторых авторов ЦЭПЛ РАН и ИЛ РАН подробно представлены модели углеродного цикла в разных наземных экосистемах, в том числе в лесных сообществах, в которых рассмотрены схемы потоков углерода в пяти стратах различных уровней структуры биогеоценозов (Замолодчиков и др., 2005; Zamolodchikov et al., 2005) и к которым мы обратились в своих исследованиях.

В настоящем исследовании в качестве стратификационной модели уровня автотрофов приняты страта живых деревьев самого древостоя как объекта депонирования компонентов биомассы, текущего древесного отпада (ТДО) и валежа в качестве страт стока этих компонентов. Такой подход позволяет соединить потоки компонентов древесины в значительное по протяженности единое временное пространство. В свою очередь, это дает возможность представлять сукцессионное движение лесного сообщества на более широком временном отрезке, корректируя определение фазы его динамики.

В табл. 3 приведено распределение деревьев по возрастным поколениям и динамическому положению в еловых биогеоценозах таежной зоны (первая страта). На основе этих показателей определены фазы динамики биогеоценозов.

Структура второй страты, включающей показатели текущего древесного отпада – категории деревьев усыхающих, свежего и старого сухостоя, находящихся в составе древостоев, и валежа, распределенного по стадиям разложения, приведена в табл. 4.

Ельники северной тайги. Биогеоценоз пп 1 (Мурманская область) по географическому положению близок к северной границе подзоны северной тайги и обладает наименьшими запасами стволовой древесины. Распределение деревьев в возрастных поколениях возрастного ряда биогеоценоза по числовым и объемным показате-

Таблица 2. Основные лесоводственные характеристики изучаемых биогеоценозов

Номер пп	Регион	Состав	Тип леса	Полнота	Бонитет	Подрост	Подлесок	Покров	Положение	Запас, м³/га
Северная тайга										
1	Мурманская обл.	10Е + С, Б	Е. мш-бр-баг	0.6	V	Е, Б, С	Мж, Рб	Мхи, бр, чер-тол	Ровный	57.7
2	Архангельская обл.	10Е + Б	Е. чер-бр-баг	0.6	IV	Е, Б	Рб, Ив	Чер, бр, тол, мхи	Понижен	138.2
3	Республика Коми	8Е2Б + П, К	Е. чер-зм-бр,	0.6	IV	Е, К, П, Б	Кдст	Мхи, бр, чер, пл	Слабый склон	149.4
Средняя тайга										
4	Ленинградская обл.	10Е + Ос	Е. май-кис	0.8	II	Е, Ос,	Мж, Рб	Мхи, чер, бр, май	Гривка	382.1
5	Вологодская обл.	10Е + Б	Е. чер-бр-сф	0.8	III	Е, Б	Мж, Рб	Чер, бр, мхи,	Понижен	363.5
6		8Е1Б1Ос	Е. чер-кис-пап	0.7	II	Е, Ос, Б	Рб	Чер, кис, май	Склон	348.2
Южная тайга										
7	Костромская обл.	10Е + П, Б	Е. кис-чер-пап	0.8	II	Е, П, Б	Рб	Чер, кис, мхи,	Ровный	361.1
8	Тверская обл.	8Е1Б1Лп	Е. кис-щит	0.8	I-II	Е, Б, Лп	Рб	Кис, пап, чер	Ровный	367.8
9		8Е1Ос1Б	Е. чер	0.8	I-II	Е, Б, Ос	Мж, Рб	Чер, бр, май, мхи	Ровный	329.2

Примечание. Типы леса: баг – багульниковый; бр – брусничный; зм – зеленомошный; кис – кисличный; май – майниковый; мш – мшистый; пап – папоротниковый; сф – сфагновый; чер – черничный; щит – щитовниковый. Покров: бр – брусника; кис – кислица; май – майник; пап – папоротник; пл – плаун; тол – толокнянка; чер – черника. Древесные породы: Б – береза; Е – ель; К – кедр; Лп – липа; Ос – осина; П – пихта; С – сосна. Подлесок: Ив – ива; Кдст – кедровый стланик; Мж – можжевельник; Рб – рябина.

лям имеет один эксцесс возрастания значений в четвертом возрастном поколении (160–200 лет).

Согласованные показатели числа и объемов древостоев в середине возрастного ряда, по данным И. И. Гусева (1964), характеризуют биогеоценоз как климаксовое лесное сообщество. С такой характеристикой динамического положения биогеоценоза можно согласиться, принимая во внимание довольно низкие показатели объемов текущего древесного отпада и валежа по стадиям разложения (табл. 4). В то же время суммарные объемы валежа составляют 60.8 % от запаса древостоя, что свидетельствует об интенсивных вывалах деревьев из состава древостоя в период между 10–20 годами в ретроспективе (Стороженко, 1990). В структуру валежа выпадали деревья наиболее крупных диаметров, значительно превышающих средний диаметр древостоя (табл. 4). Можно предположить, что именно они способствовали достижению биогеоценозом состояния климакса.

Биогеоценоз пп 2 (Архангельская область) имеет самый длинный возрастной ряд из всех, взятых для анализа биогеоценозов, с возрастом деревьев первого поколения до 380 лет. Распределение деревьев в возрастных поколениях как по числу, так и по объемам стволовой древесины не имеет четко выраженных эксцессов возрастания значений в каких-либо возрастных поколениях. Большие значения среднего возраста деревьев древостоя (263 года) определяют биогеоценоз как сообщество, стремящееся из области, близкой к климаксу, в область дигрессии. Однако значительное число деревьев категорий текущего древесного отпада и относительно равномерные объемы валежа по стадиям разложения в ретроспективе от 5 до 60 лет свидетельствуют о том, что этот период еще не наступил.

Биогеоценоз пп 3 (Национальный парк «Югыд-Ва», предгорья Урала), напротив, имеет самый короткий возрастной ряд, что характерно для ельников возвышенного местоположения этого региона. Распределение числа и объемов деревьев в возрастных поколениях уверенно указывают на то, что биогеоценоз совсем недавно прошел фазу климакса и начал склоняться в область дигрессии. На такую сукцессионную динамику указывают незначительные объемы текущего древесного отпада и один эксцесс объемов валежа в ретроспективный период более 30 лет, когда почти распалось первое поколение, а древостой вошел в фазу, близкую к климаксу, и значительно большие средние диаметры валежа, нежели деревьев древостоя.

Таблица 3. Число стволов, запасы древостоев и объемы деревьев в возрастных поколениях по подзонам в еловых биогеоценозах европейской тайги

Номер пп	Число стволов, запас древостоя, шт. м³/га	Число стволов (шт., числитель) и объемы деревьев (м³/га, знаменатель) в возрастных поколениях*, лет									Фаза динами- ки**
		41–80	81–120	121–160	161–200	201–240	241–280	281–320	321–360	361–400	
Северная тайга											
1	$\frac{303}{57.7}$	$\frac{16}{0.3}$	$\frac{38}{1.9}$	$\frac{74}{7.3}$	$\frac{95}{20.3}$	$\frac{46}{16.3}$	$\frac{28}{9.0}$	$\frac{6}{2.6}$	–	–	Кл
2	$\frac{1056}{138.2}$	$\frac{56}{1.1}$	$\frac{167}{7.5}$	$\frac{111}{3.7}$	$\frac{178}{19.7}$	$\frac{66}{10.0}$	$\frac{178}{33.3}$	$\frac{133}{13.9}$	$\frac{67}{15.2}$	$\frac{100}{33.8}$	Кл-Дг
3	$\frac{759}{148.4}$	$\frac{170}{1.2}$	$\frac{130}{28.1}$	$\frac{167}{23.6}$	$\frac{267}{84.2}$	$\frac{25}{11.3}$		–	–	–	Кл-Дг
Средняя тайга											
4	$\frac{1133}{383.5}$	$\frac{280}{27.5}$	$\frac{554}{179.4}$	$\frac{186}{43.4}$	$\frac{5}{1.3}$	$\frac{22}{22.7}$	$\frac{38}{51.2}$	$\frac{48}{58.0}$	–	–	Дм-Дг
5	$\frac{1320}{363.5}$	$\frac{50}{0.6}$	$\frac{260}{22.3}$	$\frac{650}{189.2}$	$\frac{215}{68.8}$	$\frac{85}{39.6}$	$\frac{50}{35.8}$	$\frac{10}{7.2}$	–	–	Кл
6	$\frac{790}{348.2}$	$\frac{30}{1.0}$	$\frac{180}{4.4}$	$\frac{90}{6.4}$	$\frac{60}{12.6}$	$\frac{100}{43.2}$	$\frac{200}{176.6}$	$\frac{130}{104.0}$	–	–	Дг
Южная тайга											
7	$\frac{574}{322.1}$	$\frac{155}{11.2}$	$\frac{182}{28.4}$	$\frac{115}{63.5}$	$\frac{30}{4.3}$	$\frac{65}{155.0}$	$\frac{27}{59.7}$	–	–	–	Дг
8	$\frac{386}{367.8}$	$\frac{94}{7.2}$	$\frac{74}{29.6}$	$\frac{102}{100.8}$	$\frac{52}{78.8}$	$\frac{44}{91.4}$	$\frac{20}{60.0}$	–	–	–	Кл-Дг
9	$\frac{406}{329.2}$	$\frac{63}{4.1}$	$\frac{186}{104.9}$	$\frac{92}{86.9}$	$\frac{38}{64.2}$	$\frac{27}{69.1}$	–	–	–	–	Дм-Дг

* Поколение до 40 лет – подрост.

** Здесь и далее: Кл – климакс, Дм – демутация, Дг – дигрессия.

Ельники средней тайги. Биогеоценоз пп 4 (Ленинградская область, резерват «Вепсский лес») формировался с некоторым разрывом в возрастных поколениях, причина которого не ясна. Можно предположить, что в ретроспективе от 160 до 200 лет в биогеоценозе был период, в котором действовали неизвестные факторы, препятствовавшие появлению естественного возобновления ели, но с сохранением деревьев других возрастных поколений. Это послужило причиной формирования двух эксцессов объемов деревьев в возрастном ряду – в первых двух поколениях и в шестом поколении. Показатели древесного опада в категории валежа не могут прояснить причины формирования такой структуры возрастного ряда, так как временная шкала стадий разложения валежа примерно в 2 раза короче возраста четвертого поколения древостоя. Повышенное количество деревьев категории старого сухостоя, но при этом незначительная суммарная величина их объема объясняется малым средним диаметром деревьев – менее 10 см. По структуре возрастного ряда биогеоценоз

можно характеризовать как демутационно-дигрессивный.

Биогеоценоз пп 5 (Резерват «Вепсский лес») имеет один эксцесс числа деревьев и их объемов в пятом возрастном поколении с постепенно нисходящими значениями к первым поколениям. Можно отметить также довольно большие значения как по числу деревьев, так и по их объемам категории текущего древесного опада, что, безусловно, связано с повышенными объемами валежа. Незначительное превышение среднего диаметра валежа над средним диаметром древостоя свидетельствует о почти одинаковом по объемам вывале деревьев из средневозрастных и старовозрастных возрастных поколений. По структуре возрастного ряда, данным текущего опада и валежа можно характеризовать биогеоценоз как абсолютно разновозрастное лесное сообщество, близкое к фазе климакса.

Биогеоценоз пп 6 (Вологодская область, урочище «Атлека») имеет наибольшие значения объемов стволовой древесины в первых двух возрастных поколениях, что составляет почти

Таблица 4. Объемы древесного опада в еловых биогеоценозах европейской тайги

Номер пп	Запас древос- стоя, $\frac{\text{шт.}}{\text{м}^3/\text{га}}$	Текущий древесный отпад*, $\frac{\text{шт.}}{\text{м}^3/\text{га}}$				Количество древесного опада от запаса древостоя, %	Валеж, $\frac{\text{шт.}}{\text{м}^3/\text{га}}$					Количество валежа от запаса древостоя, %	Средний диаметр, см		Фаза дина- мики	
		всего	усых.	св. сух.	ст. сух.		всего	по стадиям разложения					деревьев	валежа		
								5	4	3	2	1				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Северная тайга																
1	$\frac{303}{57.7}$	$\frac{14}{3.3}$	$\frac{6}{1.0}$	$\frac{3}{1.7}$	$\frac{5}{0.6}$	$\frac{4.6}{5.7}$	$\frac{87}{35.1}$	$\frac{14}{5.0}$	$\frac{14}{6.3}$	$\frac{21}{9.6}$	$\frac{34}{13.6}$	$\frac{4}{0.6}$	$\frac{28.7}{60.8}$	16.5	24.7	Кл
2	$\frac{1056}{138.2}$	$\frac{88}{9.5}$	$\frac{22}{2.4}$	$\frac{5}{0.6}$	$\frac{61}{6.5}$	$\frac{8.3}{6.8}$	$\frac{167}{45.8}$	$\frac{39}{9.4}$	$\frac{28}{10.6}$	$\frac{33}{10.8}$	$\frac{50}{12.2}$	$\frac{17}{2.8}$	$\frac{15.8}{33.1}$	16.2	18.9	Кл-Дг
3	$\frac{759}{149.4}$	$\frac{6}{0.7}$	$\frac{1}{0.1}$	$\frac{1}{0.1}$	$\frac{4}{0.5}$	$\frac{0.8}{0.5}$	$\frac{176}{68.7}$	$\frac{17}{8.5}$	$\frac{21}{7.0}$	$\frac{83}{38.5}$	$\frac{38}{12.9}$	$\frac{17}{1.8}$	$\frac{23.2}{46.0}$	14.2	23.0	Кл-Дг
Средняя тайга																
4	$\frac{1133}{383.5}$	$\frac{226}{13.62}$	$\frac{27}{1.12}$	$\frac{11}{4.8}$	$\frac{188}{7.7}$	$\frac{19.9}{3.6}$	$\frac{236}{87.2}$	—	$\frac{27}{23.0}$	$\frac{32}{22.5}$	$\frac{118}{33.6}$	$\frac{59}{8.1}$	$\frac{20.8}{22.7}$	17.9	19.2	Дм-Дг
5	$\frac{1320}{363.5}$	$\frac{149}{18.9}$	$\frac{29}{6.3}$	$\frac{10}{2.1}$	$\frac{110}{10.5}$	$\frac{11.3}{5.2}$	$\frac{210}{72.2}$	$\frac{33}{20.3}$	$\frac{10}{8.7}$	$\frac{38}{12.3}$	$\frac{100}{23.6}$	$\frac{29}{7.3}$	$\frac{15.9}{19.9}$	17.3	19.1	Кл
6	$\frac{790}{348.2}$	$\frac{20}{2.43}$	$\frac{10}{2.32}$	—	$\frac{10}{0.11}$	$\frac{2.5}{0.7}$	$\frac{240}{130.2}$	$\frac{80}{33.7}$	$\frac{50}{29.1}$	$\frac{40}{16.8}$	$\frac{60}{43.2}$	$\frac{10}{7.4}$	$\frac{30.4}{37.4}$	19.8	26.6	Дг
Южная тайга																
7	$\frac{574}{361.1}$	$\frac{26}{37.9}$	$\frac{7}{2.2}$	$\frac{3}{4.5}$	$\frac{16}{31.2}$	$\frac{4.5}{10.5}$	$\frac{131}{204.6}$	$\frac{74}{108.9}$	$\frac{18}{34.4}$	$\frac{15}{23.0}$	$\frac{20}{34.2}$	$\frac{4}{4.1}$	$\frac{22.8}{56.7}$	20.7	39.8	Дг
8	$\frac{386}{367.8}$	$\frac{56}{16.3}$	$\frac{10}{1.7}$	$\frac{2}{2.1}$	$\frac{44}{12.5}$	$\frac{14.5}{4.4}$	$\frac{98}{101.2}$	$\frac{14}{15.4}$	$\frac{10}{12.5}$	$\frac{26}{22.2}$	$\frac{38}{48.2}$	$\frac{10}{2.9}$	$\frac{25.4}{27.5}$	26.2	28.9	Кл-Дг
9	$\frac{406}{329.2}$	$\frac{42}{12.2}$	$\frac{17}{4.3}$	—	$\frac{25}{7.9}$	$\frac{10.3}{3.7}$	$\frac{152}{136.0}$	$\frac{23}{28.4}$	$\frac{33}{29.2}$	$\frac{63}{51.0}$	$\frac{31}{22.7}$	$\frac{2}{4.7}$	$\frac{37.4}{41.3}$	25.4	29.2	Дм-Дг

Примечания. Текущий отпад: усых. — усыхающие; св. сух. — свежий сухостой; ст. сух. — старый сухостой. Стадии разложения валежа см. в табл. 1.

52 % от запаса древостоя и характеризует биогеоценоз как дигрессивное лесное сообщество. Этот вывод подтверждают данные больших объемов валежа, особенно относящихся ко второй стадии разложения, т. е. появившегося в период примерно от 5 до 15 лет в ретроспективу, что уменьшило количество и объем деревьев первого поколения в возрастном ряду биогеоценоза и обозначило высокие значения среднего диаметра валежа в сравнении со средним диаметром древостоя. Таким образом, биогеоценоз можно с уверенностью отнести к абсолютно разновозрастным лесным сообществам дигрессивных фаз динамики. Можно отметить, что в ближайшие 100 лет в биогеоценозе будут продолжаться повышенные по объемам вывалы старовозрастных деревьев и средний диаметр древостоя снизится.

Ельники южной тайги. Биогеоценоз пп 7 (Заповедник «Кологривский лес») имеет в пер-

вых двух поколениях возрастного ряда 215 м³ стволовой древесины, что составляет 59.5 % от запаса древостоя. Можно отметить и значительные объемы валежа, больше половины которого приходится на 5-ю стадию разложения со сроком вывала деревьев примерно 50 лет в ретроспективу, т. е. в сроки формирования самых старших двух первых возрастных поколений. На это указывают и большие средние значения диаметров стволов валежа в сравнении со средними диаметрами деревьев древостоя. В ближайшие 40–80 лет в биогеоценозе будут происходить значительные поступления стволов в структуру валежа. Биогеоценоз уверенно определяется как абсолютно разновозрастное лесное сообщество дигрессивной фазы динамики.

Биогеоценоз пп 8 (Заповедник «Кологривский лес») имеет один эксцесс количества и объемов деревьев в четвертом возрастном поколении, чему соответствует и средний возраст де-

Таблица 5. Баланс по массе компонентов древесины при ее ксилолизе в изучаемых биогеоценозах

Номер пп	Запас древостоя, м³/га	Фитомасса древостоя, т/га	Поглощаемый кислород, т/га	Масса выделяющихся компонентов древесины			Фаза динамики
				CO ₂	H ₂ O	Q, кДж · 10 ⁶	
				т/га			
Подзона северной тайги							
1	57.7	43.3	60.0	79.1	24.2	8.61	Кл
2	138.2	103.7	142.7	189.4	57.0	20.6	Кл-Дг
3	149,4	112.1	158.2	204.7	65.6	22.3	Кл-Дг
Подзона средней тайги							
4	382.1	259.8	359.6	474.4	144.9	51.5	Дм-Дг
5	363.5	247.2	342.1	451.4	137.9	49.0	Кл
6	348.2	236.8	327.7	432.4	132.1	47.0	Дг
Подзона южной тайги							
7	361.1	245.5	339.8	448.3	137.0	48.7	Дг
8	367.8	250.1	346.2	456.7	139.6	49.6	Кл-Дг
9	329.2	223.9	309.8	408.8	124.9	44.4	Дм-Дг

древесины, и по этому признаку его можно было бы отнести к сообществу климаксовой фазы динамики (Гусев, 1964). Однако объемы деревьев в первых трех возрастных поколениях в сумме значительны – 230.2 м³, 62.6 % от запаса древостоя. За время движения к фазе климакса биогеоценоз одновременно набирал большие объемы деревьев старовозрастных поколений, что двигало его в область дигрессии. Следует так же обратить внимание на почти равные и высокие значения средних диаметров стволов валежа и деревьев древостоя, что свидетельствует о преимущественном отпаде деревьев из старших возрастных поколений. Таким образом, биогеоценоз можно характеризовать как абсолютно разновозрастное лесное сообщество климаксово-дигрессивной фазы динамики.

Биогеоценоз пп 9 (Центрально-лесной биосферный государственный заповедник) по структуре возрастного ряда и по показателям деревьев текущего древесного отпада и валежа по стадиям разложения близок к биогеоценозу пп 8. Некоторые различия имеются в возрастах экссесса количества и объемов деревьев – здесь экссесс расположен ближе к молодым поколениям более короткого возрастного ряда, что определяет и более молодой средний возраст древостоя. Именно поэтому биогеоценоз можно характеризовать как абсолютно разновозрастный демулационно-дигрессивной фазы динамики.

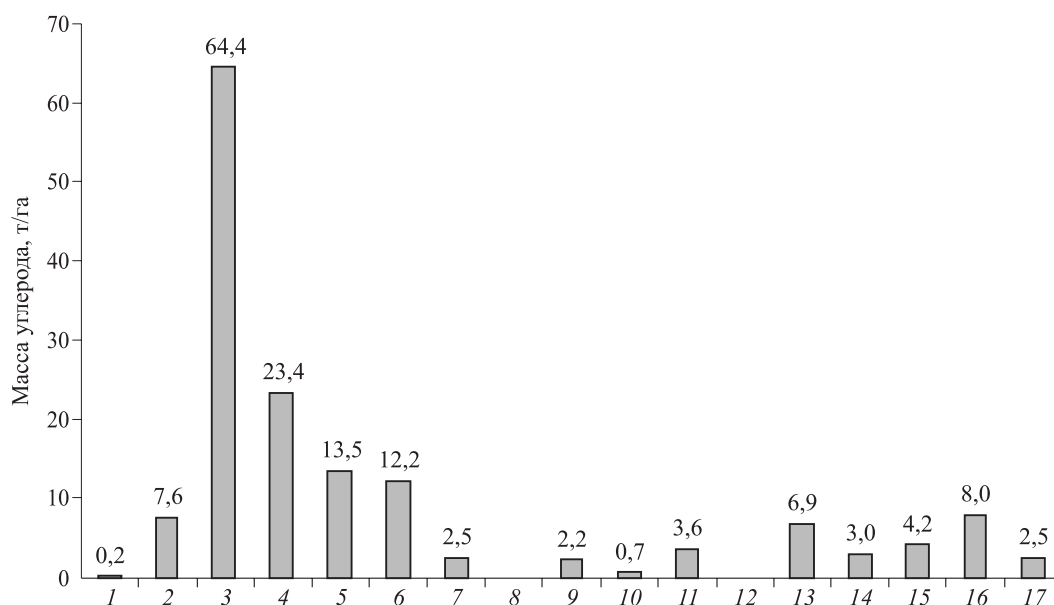
В целом все представленные для анализа биогеоценозы подзон таежной зоны можно рассматривать как один из примеров разнообразия структур коренных девственных, сформированных эволюцией и современной динамикой раз-

вития, лесных сообществ. При этом необходимо иметь в виду, что это разнообразие имеет ярко выраженный мозаичный характер, состоящий из мозаик разных возрастных поколений (Стороженко, 2007). Даже рядом находящиеся лесные сообщества имеют различные значения параметров возрастных рядов и других лесоводственных характеристик, они уникальны по своим структурам. Анализируя близкие по динамическим характеристикам показатели древостоев в определенных фазах динамики (демутация, дигрессия, климакс), всегда можно обнаружить различия в количестве и объемах деревьев в возрастных рядах, текущем древесном отпаде, валеже.

Имея это в виду, можно с уверенностью ожидать в таких лесах различные значения параметров дыхания лесных сообществ и, в частности, бюджета компонентов биомассы. Ниже представлена попытка показать масштаб этого бюджета в изучаемых коренных девственных ельниках (табл. 5).

Согласно результатам расчетов массы оксида углерода, воды и энергии, заключенных в фитомассе древесины ельников различных структурных показателей возрастных рядов и соответственно фаз динамики по подзонам тайги, базовой величиной, от которой рассчитываются все объемы компонентов древесины, является запас древостоя, что объясняет различия в их значениях по подзонам тайги.

В целом лесной биогеоценоз включает в себя и другие консорты древесной фракции – текущий древесный отпад и валеж, входящие в состав мортмассы биогеоценоза и включающие значительные объемы древесины.



Масса углерода в объединенной древесной фракции елового биогеоценоза пп 5.

Древесные фракции биогеоценоза: 1–7 – возрастные поколения древостоя, 9–11 – текущий древесный опад, 13–17 – валеж.

Эти фракции различаются по интенсивности выделения компонентов древесины. Деревья категории старого сухостоя в большинстве своем в значительной степени могут быть заселены дереворазрушающими грибами, разлагающими древесину стоящих на корню деревьев, способствующих их переводу в структуру валежа, и исключать их при учетах стока продуктов ксилолиза, как и объемы валежа, нельзя.

Стволы валежа, входящие так же в состав мортмассы биогеоценоза, представляют собой основной базисный трофотопический субстрат для грибного консорта лесного сообщества, выполняющего фундаментальную функцию по разложению древесного опада с выделением C , CO_2 , H_2O и энергии. На рисунке приведен пример расчета объемов углерода в объединенной древесной фракции древостоя, текущего древесного опада и валежа биогеоценоза пп 5, приближающегося по структурным параметрам к фазе климакса.

Биогеоценоз расположен в подзоне средней тайги и по градации Д. Г. Замолотчикова и др. (2003) входит во вторую широтную полосу с коэффициентом конверсии 0.68. Объем фитомассы этого древостоя при переводе запаса древесины в фитомассу для ели старших возрастов составляет 247.2 т/га.

Масса продуктов ксилолиза, выделяющихся при разложении древесной фракции биогеоценоза, определяется по приведенной выше упрощенной формуле микогенного ксилолиза (2) древесины В. А. Соловьева (1992).

Суммарная масса углерода объединенной древесной фракции анализируемого биогеоценоза, включающая объемы углерода древостоя (в том числе текущего древесного опада) и валежа, составляет 153.8 т/га, без объемов текущего древесного опада, который входит в состав древостоя – 147.5 т/га.

По той же формуле рассчитываются объемы объединенной древесной фракции диоксида углерода, воды и энергии (табл. 5). При этом необходимо понимать, что представленные расчеты проводятся в стационарном положении биогеоценоза, вне его динамики и в любой другой период расчета масса отдельных фракций и ее суммарное значение будут другими. Также другое оригинальное распределение компонентов древесины в позициях возрастных структур, текущего древесного опада и валежа будет и в биогеоценозах любых других фаз динамики, отвечающие объемам фитомассы.

Имея в виду все вышеизложенное, теоретически вполне возможно рассчитать показатели объемов компонентов древесины биогеоценозов самых разных динамических характеристик (не только коренных девственных лесов), на основе которых составить таблицы пулов и потоков C , CO_2 и H_2O , которые помогут в проектировании оптимальных структур лесов различного назначения и использования, функционального содержания, в том числе лесов, сбалансированных по бюджету биомассы, устойчивых, долговременного функционирования.

Методически имело бы большую научную ценность осуществить анализ структуры обширного по площади участка коренного девственного леса, включающего большое количество разнообразных по динамическим характеристикам биогеоценозов, на результатах которого можно было бы представить средние значения интересующих нас показателей как эталонов бюджета биомассы устойчивых, эволюционно сформированных лесных сообществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коренные девственные еловые леса таежной зоны имеют разновозрастное строение древостоев, оригинальное для каждого биогеоценоза распределение количества и объемов деревьев в возрастных поколениях возрастных рядов, разнообразное динамическое положение в сукцессионном поле каждого биогеоценоза.

Объемы древесного опада в составе текущего опада и валежа также имеют разнообразные показатели, значение которых по грациям состояния и разложения стволов соответствуют динамическому положению биогеоценозов. При этом объемы валежа могут достигать более половины запаса древостоев, что определяется динамическим положением лесного сообщества, в котором грибной дереворазрушающий комплекс активно участвует в формировании возрастных структур биогеоценозов.

Объемы пулов и потоков компонентов древесины в древостоях и при разложении древесины грибами-деструкторами определяются структурными особенностями возрастных рядов древостоев, объемами древесного опада в грациях стадий разложения.

Совместный анализ возрастных структур древостоев, структур текущего древесного опада и валежа по стадиям разложения помогает в более точном определении динамического положения лесного биогеоценоза в расширенном пространстве его сукцессионного развития.

В наиболее устойчивых климаксовых девственных еловых лесах тайги балансовые соотношения накопления и разложения биомассы представляют собой модель ее оптимального бюджета как важнейшей характеристики устойчивых по структурным и функциональным параметрам лесных сообществ и могут рассцениваться как эталонные значения в сравнении с лесами различного происхождения и структурных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воропанов П. В. Ельники Севера. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 179 с.
- Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность: в 2-х кн. М.: Наука, 2004. Кн. 1. 479 с. Кн. 2. 575 с.
- Гусев И. И. Строение и особенности таксации ельников Севера. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 76 с.
- Демаков Ю. П. Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методические аспекты. Йошкар-Ола: Периодика Марий-Эл, 2000. 414 с.
- Дыренков С. А. Структура и динамика таежных ельников. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1984. 176 с.
- Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесобразующих пород России // Лесн. таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.
- Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Коровин Г. Н., Честных О. В. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России // Экология. 2005. № 5. С. 323–333.
- Исаев А. С., Коровин Г. Н., Уткин А. И., Пряжников А. А., Замолодчиков Д. Г. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // Лесоведение. 1993. № 5. С. 3–10.
- Комин Г. Е., Семечкин И. В. Возрастная структура древостоев и принципы ее типизации // Лесоведение. 1970. № 2. С. 25–33.
- Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / Под ред. К. С. Бобковой, Э. П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 337 с.
- Лукина Н. В., Гераськина А. П., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Куприн А. В., Чернов Т. И., Чумаченко С. И., Шанин В. Н., Кузнецова А. И., Тебенькова Д. Н., Горнова М. В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопр. лесн. науки. 2020. Т. 3. № 4. С. 1–90.
- Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы. М.: Наука, 2008. 453 с.
- Правила санитарной безопасности в лесах. Утв. приказом Минприроды России от 24.12.2013. № 613.
- Соловьев В. А. Микогенный ксилолиз, его экологическое и технологическое значение // Научные основы устойчивости лесов к дереворазрушающим грибам. М.: Наука, 1992. С. 140–171.
- Стороженко В. Г. Датировка разложения валежа ели // Экология. 1990. № 6. С. 66–69.
- Стороженко В. Г. Гнилевые фауны коренных лесов Русской равнины. М.: ВНИИЛМ, 2002. 156 с.
- Стороженко В. Г. Устойчивые лесные сообщества. Теория и эксперимент. М.: Гриф и К, 2007. 192 с.
- Стороженко В. Г. Эволюционные принципы поведения дереворазрушающих грибов в лесных биогеоценозах. М.: Гриф и К, 2014. 180 с.
- Стороженко В. Г., Быков А. В., Бухарева О. А., Петров А. В. Устойчивость лесов. Теория и практика биогеоценологических исследований. М.: Тов-во. науч. изд. КМК, 2018. 171 с.
- Стороженко В. Г., Шорохова Е. В. Биогеоценозические и ксилотитические параметры устойчивых таежных

- ельников / под ред. В. И. Крутова и В. Г. Стороженко // Грибные сообщества лесных экосистем. Петрозаводск, 2012. Т. 3. С. 22–41.
- Сукачев В. Н. Основы лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1964. 574 с.
- Третьяков Н. В., Горский П. В., Самойлович Г. Г. Справочник таксатора. М., Л.: Гослесбумиздат, 1952. 853 с.
- Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Честных О. В., Коровин Г. Н., Зукерт Н. В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
- Швиденко А. З., Ваганов Е. А., Нильссон С. Биосферная роль лесов России на старте третьего тысячелетия: углеродный бюджет и Протокол Киото // Сиб. экол. журн. 2003. № 6. С. 645–655.
- Шорохова Е. В. Запасы и экосистемные функции крупных древесных остатков в таежных лесах: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. СПб.: СПбЛТУ, 2020. 299 с.
- Cardinale B. J., Matulich K. L., Hooper D. U., Byrnes J. E., Duffy E., Gamfeldt L., Balvanera P., O'Connor M. I., Gonzalez A. The functional role of producer diversity in ecosystems // Amer. J. Bot. 2011. V. 98. N. 3. P. 572–592.
- Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia // Forests. 2020. V. 11. N. 9. Article number: 979. 19 p.
- O'Connor M. I., Gonzalez A., Byrnes J. E. K., Cardinale B. J., Duffy J. E., Gamfeldt L., Griffin J. N., Hooper D., Hungate B. A., Paquette A., Thompson P. L., Dee L. E., Dolan K. L. A general biodiversity-function relationship is mediated by trophic level // Oikos. 2017. V. 126. Iss. 1. P. 18–31.
- Selleck G. W. The climax concept // Bot. Rev. 1960. V. 26. N. 4. P. 535–545.
- Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Korovin G. N., Chestnykh O. V. Dynamics of carbon pools and fluxes in Russia's forest lands // Rus. J. Ecol. 2005. V. 36. Iss. 5. P. 291–301 (Original Rus. Text © D. G. Zamolodchikov, A. I. Utkin, G. N. Korovin, O. V. Chestnykh, 2005, publ. in Ekologiya. 2005. N. 5. P. 323–333).

STRUCTURES OF WOOD FRACTIONS AND VOLUMES OF WOOD COMPONENTS IN SPRUCE BIOGEOCENOSSES OF THE TAIGA OF EUROPEAN RUSSIA

V. G. Storozhenko

*Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences
Sovetskaya str., 21, Village of Uspenskoe, Odintsovsky District, Moscow Oblast,
143030, Russian Federation*

E-mail: lesoved@mail.ru

The problem of assessing the balance of accumulated and degraded woody biomass in forest communities, the budget of C, CO₂, H₂O, and Q (energy) in primary virgin forests of different ages of spruce formations in the taiga zone of European Russia is discussed. The studies were carried out in specific biogeocenoses of different dynamic characteristics in the subzones of the northern, middle and southern taiga. The purpose of the research is to study in quantitative and volumetric terms the structural elements of the age series of primary virgin spruce biogeocenoses of different ages of different successional positions, the dynamics of the formation of the stem fraction of wood waste (deadwood), pools and flows of components deposited in the wood of the stem fraction of phytocenoses and tree waste in a single succession series. biogeocenoses of various dynamic characteristics. A cycle of studies was carried out on the trial plots, which made it possible to obtain information about the age structures of forest stands, their dynamic indicators, the volume of trees in the age generations of forest stands, the current tree waste and fallen trees. All volume values of forest stands and wood waste are converted into phytomass. The volumes of C, CO₂, H₂O and Q (energy) deposited in wood and released during its decomposition by wood-destroying fungi were calculated using the formula for mycogenic wood xylolysis. On the example of the spruce biogeocenosis of the middle taiga subzone of the climax phase of dynamics, the mass of carbon, different fractions of wood, presented in a graphic image, was calculated. It has been determined that the volumes of pools and flows of wood components in forest stands and during the decomposition of wood by fungi – destructors are determined by the structural features of the age series of forest stands, the volumes of wood waste in gradations of decomposition stages. A joint analysis of the age structures of forest stands, the structures of current tree waste and deadwood by stages of decomposition helps in a more accurate determination of the dynamic position of forest biogeocenosis in the expanded space of its successional development. In the most stable (climax) virgin spruce forests of the taiga, the values of the balance ratios of accumulation and decomposition of biomass represent an optimal budget model and can be regarded as reference values in comparison with forests of different origin and structural characteristics.

Keywords: *structures of primary taiga spruce forests, pools and fluxes of C, CO₂, H₂O and Q (energy), biomass balance of sustainable spruce forests.*

How to cite: *Storozhenko V. G. Structures of wood fractions and volumes of wood components in spruce biogeocenoses of the taiga of European Russia // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 29–40 (in Russian with English abstract).*

УДК 630*232.43:630*24

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СМЕШАННЫХ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР В МАРИЙСКОМ ЗАВОЛЖЬЕ

Ю. П. Демаков^{1, 2}, А. В. Исаев¹, Т. В. Нуреева²

¹ Государственный природный заповедник «Большая Кокшага»
424038, Йошкар-Ола, ул. Воинов-Интернационалистов, 26

² Поволжский государственный технологический университет
424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

E-mail: YPDemakov@yandex.ru, avsacha@yandex.ru, NureevaTV@volgatech.net

Поступила в редакцию 01.11.2021 г.

Приведены результаты многолетних опытов, проведенных на двух стационарных объектах, созданных в 1976 и 1968 гг. в различных типах лесорастительных условий Марийского Заволжья. Насаждения первого из них, расположенного в сухом бору, состояли только из деревьев сосны (*Pinus L.*) и березы (*Betula L.*) в различных соотношениях, а второго на суглинистых дерново-подзолистых почвах – из трех пород (березы, ели (*Picea A. Dietr.*) и сосны). Контрольным вариантом служили чистые культуры сосны. Производительность древостоя, его товарную структуру и таксовую стоимость оценивали расчетным путем по разработанной нами методике на основе показателей среднего диаметра, высоты и числа деревьев. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования мероприятий по оптимизации породного состава лесов с целью сохранения биологического разнообразия, а также снижения частоты возникновения и интенсивности пожаров. Показано, что в сухих и свежих борах сосново-березовые культуры значительно уступают чистым сосновым по производительности древостоя и особенно по его таксовой стоимости. До возраста 10–15 лет высота деревьев березы в них выше, чем сосны, но после 25–30 лет положение их становится обратным. В субориях, а особенно в раменах, береза угнетает не только светолюбивую сосну, но даже теневыносливую ель, значительно превосходя их по размерам. Сделан вывод о том, что создавать смешанные сосново-березовые и сосново-елово-березовые культуры в условиях Марийского Заволжья нецелесообразно из-за разной требовательности древесных пород к плодородию почвы, а также различий в скорости их роста и развития. Эти культуры не выполняют также и возложенных на них функций по повышению биологического разнообразия и устойчивости функционирования насаждений, а также снижению их пожароопасности.

Ключевые слова: лесные культуры смешанного состава, рост, развитие, производительность, товарная структура, таксовая стоимость.

DOI: 10.15372/SJFS20220205

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проведения исследований обусловлена необходимостью совершенствования мероприятий по оптимизации породного состава насаждений с целью сохранения биологического разнообразия, а также снижения частоты возникновения и интенсивности пожаров, что связано во многом с широким распространением на территории Марийского Заволжья светлых хвойных лесов, обладающих очень высокой горимостью. Аналитический обзор литературных

источников (Миронов, 1970; Горев, 1983; Родин, Лямеборшай, 1998; Калинин, 2006; Сиволапов и др., 2013; Чернодубов, Сотников, 2018; Otazua, Raquette, 2018) показал, что на бедных песчаных почвах ассортимент пригодных для произрастания древесных и кустарниковых пород весьма ограничен и у лесоводов нет единого мнения по поводу целесообразности формирования смешанных насаждений. Так, Ф. Н. Харитонович (1961) выступал против создания сосново-березовых культур, но другие исследователи (Рубцов, 1969; Обновленский, 1970; Калининченко и

др., 1973; Попов, 1997) пришли к выводу, что в свежих борах и суборах можно чередовать три–пять рядов сосны (*Pinus* L.) с одним-двумя рядами березы (*Betula* L.) с обязательным введением буферных рядов из кустарников, однако наиболее благоприятные условия для роста обоих пород складываются при размещении их полосами шириной 10–12 м. А. С. Сухоруков (2010) показал, что на песках сосново-березовые культуры имеют очень низкую сохранность и плохо растут, но К. Г. Шамирян (2012), Н. К. Артемьева и А. И. Чернодубов (2016), наоборот, отмечают их высокую производительность при составе 8С2Б. А. И. Русаленко (1979) считал, что сосново-березовые культуры на песчаных почвах целесообразно создавать лишь при уровне грунтовых вод в летний период не более 2 м или же при наличии в почве суглинистых и глинистых прослоек, способствующих задержанию влаги. По данным Д. Д. Лавриненко (1965), на плодородных почвах береза угнетает рост деревьев сосны и создавать здесь смешанные лесные культуры нецелесообразно. Неоднозначность выводов исследователей по данному вопросу обусловлена, на наш взгляд, различиями в возрасте исследуемых лесных культур, их густоте, составе и почвенных условиях, оказывающих очень большое влияние на характер взаимоотношений пород.

Цель настоящей работы – оценить экономическую и экологическую целесообразность создания смешанных сосново-березовых и сосново-елово-березовых культур в условиях Марийского Заволжья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены на двух стационарных опытных объектах. Первый из них площадью 5.5 га создан на территории Старожильского участкового лесничества (кварталы 81 и 95), пройденной в 1972 г. лесным пожаром высокой интенсивности. Осенью 1975 г. участок был очищен от погибшего древостоя корчевателем Д-513А, а весной 1976 г. созданы культуры с размещением посадочных мест 1.5×0.75 м в пяти вариантах с двукратной повторностью. В первом варианте опыта 10 рядов саженцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) чередовали с пятью рядами дичков березы, которые представляли собой несортированную смесь березы повислой (*Betula pendula* Roth) и б. пушистой (*B. pubescens* Ehrh.), во втором – три ряда сосны с тремя рядами березы. В следующих вариантах

опыта три ряда сосны отделяли от одного ряда березы кустарниками: в третьем – кленом ясенелистным (*Acer negundo* L.), в четвертом – лохом узколиственным (*Elaeagnus angustifolia* L.), в пятом – бузиной красной (*Sambucus racemosa* L.). Дополнительно было заложено еще две пробные площади в чистых культурах березы и сосны, созданных в это же время с подобным размещением посадочных мест.

Рельеф участка ровный, почва песчаная (содержание частиц менее 0.01 мм варьирует от 1.8 до 10.0 %, составляя в среднем 5.5 %), слабоподзолистая, на древнеаллювиальных песках, грунтовые воды залегают на глубине более 2.5 м. Под пологом сосны в настоящее время сформировался живой напочвенный покров с преобладанием плевроциума Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.) и дикранума многоножкового (*Dicranum polysetum* Sw.), а в рядах, занятых березой, он представлен в основном кладонией лесной (*Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot.) (рис. 1).

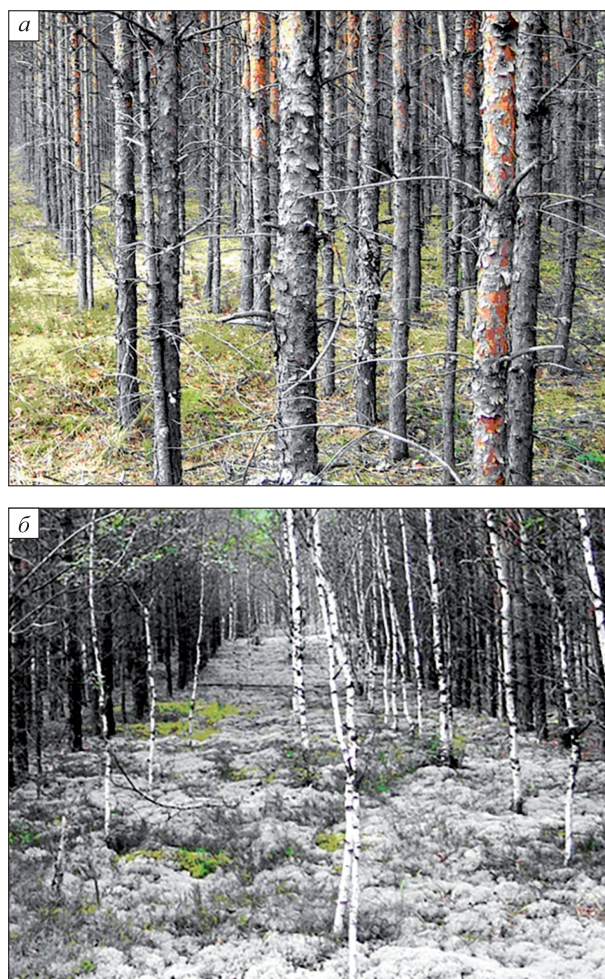


Рис. 1. Живой напочвенный покров под пологом сосны (а) и березы (б) в смешанных лесных культурах, созданных на песчаных почвах Марийского Заволжья.

В его составе единично встречаются прострел раскрытый (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.), кошачья лапка двудомная (*Antennaria dioica* (L.) Gaertn.), василек Маршалла (*Centaurea marschalliana* Spreng.), фиалка собачья (*Viola canina* L.) и ландыш майский (*Convallaria majalis* L.). Подлесок очень редкий, состоящий из ракитника русского (*Chamaecytisus ruthenicus* (Fisch. ex Wol.) Klásk), дрока красильного *Genista tinctoria* L. и вереска обыкновенного *Calluna vulgaris* (L.) Hull.

Второй объект создан в 1968 г. на приовражно-балочных землях в бассейне р. Манага в центральной части Республики Марий Эл (Демаков и др., 2017а, б). Почва на участке дерново-подзолистая суглинистая. В состав насаждений введено три породы деревьев: сосна обыкновенная, ель европейская (*Picea abies* (L.) H. Karst.) и береза повислая, которые чередовали между собой в одном из вариантов опыта по схеме Б-Е-С-Е, а во втором – по схеме Б-Е-С-С-Е. В качестве контрольного варианта служили чистые культуры сосны. Расстояние между саженцами в рядах во всех вариантах опыта составляло 1.2 м.

На каждой секции опытных объектов периодически (вначале ежегодно, а затем через 5–15 лет) оценивали состояние насаждений на пробных площадях (пп) с детальным перечетом

деревьев и замером их высоты у 10–12 экз. в преобладающих ступенях толщины. Объем стволов деревьев, общий запас древостоя на секциях, его товарную структуру и таксовую стоимость оценивали расчетным путем по разработанной нами методике (Демаков и др., 2017а, б, 2018; Демаков, 2018) на основе показателей среднего диаметра, высоты и числа деревьев.

Цифровой эмпирический материал обработан с использованием стандартных методов математической статистики (Лакин, 1990; Гринин и др., 2003) и пакетов соответствующих прикладных программ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что смешанные сосново-березовые культуры на первом опытном объекте значительно уступают по производительности чистым сосновым (табл. 1).

Так, общий запас стволовой древесины в чистом 42-летнем березняке составляет всего 54 м³/га, а в чистом сосняке – в 5.2 раза больше. По абсолютно сухой массе древостоя и её энергетическому потенциалу березняк уступает сосняку в 4.1 раза, а по таксовой стоимости – даже в 15.7 раза. Наилучший результат в смешанных культурах отмечен в варианте С-С-С-Б-Б-Б.

Таблица 1. Текущее состояние древостоя в 42-летних культурах разного состава, созданных в сухом бору Старожильского лесничества Республики Марий Эл

Параметр	Вариант опыта*				
	10С	10С5Б	3С3Б	3С1Б	10Б
Густота древостоя общая, экз./га	3000	3027	2282	2633	2698
Доля участия деревьев сосны, %	100.0	77.8	82.5	92.3	0.0
Средняя высота деревьев, м:					
сосны	14.5	13.8	14.6	13.7	–
березы	–	7.6	8.1	7.3	7.0
Средний диаметр деревьев, см:					
сосны	12.4	11.8	13.7	13.7	–
березы	–	4.7	5.1	7.3	8.3
Площадь сечения стволов общая, м ² /га	35.99	26.69	28.63	26.15	14.50
Доля участия стволов сосны, %	100.0	95.7	97.2	98.8	0.0
Запас стволовой древесины общий, м ³ /га	283	199	220	197	54
Доля участия деревьев сосны, %	100.0	97.2	98.2	99.2	0.0
Фитомасса общая, т/га	189.2	135.1	149.1	133.2	46.4
Доля участия деревьев сосны, %	100.0	96.7	97.6	99.1	0.0
Энергетический потенциал, ГДж/га	3764	2687	2966	2650	924
Доля участия деревьев сосны, %	100.0	96.7	97.9	99.1	0.0
Таксовая цена, тыс. руб./га	24.15	15.98	20.08	15.95	1.54
Доля участия деревьев сосны, %	100.0	99.4	99.6	99.8	0.0

* Цифрами обозначено количество рядов сосны и березы; 10С и 10Б – чистые культуры сосны и березы.

Таблица 2. Приживаемость и сохранность древесных и кустарниковых пород по усредненным данным всех вариантов опыта, %

Время после посадки, лет	Сосна	Береза	Бузина	Клен	Лох
1	85.7	89.6	96.9	98.9	96.4
2	81.0	88.9	81.8	85.7	1.6
3	80.5	88.4	60.3	60.7	0.1
4	79.4	88.4	44.6	43.7	0
5	78.7	88.4	29.2	21.2	0
9	76.6	82.0	1.2	0	0
14	74.5	77.2	0	0	0
28	60.4	39.6	0	0	0
42	39.9	22.5	0	0	0

Многолетние наблюдения за состоянием смешанных культур показали, что все высаженные кустарники выпали из их состава в течение 3–10 лет (табл. 2).

Дольше всех из кустарников сохранялась бузина красная, а быстрее всего выпал лох узколистный. Наиболее высокая сохранность в культурах отмечается у сосны обыкновенной, хотя и у нее к 42 годам отмерло 60 % от исходного числа саженцев.

Динамику сохранности саженцев сосны и березы по усредненным данным всех вариантов опыта с высокой точностью ($p < 0.01$) описывают следующие уравнения регрессии:

$$Y_C = 86.0 \times \exp(-8.577 \times 10^{-3} t^{1.171});$$

$$R^2 = 0.953, \quad (1)$$

$$Y_B = 90.0 \times \exp(-1.506 \times 10^{-3} t^{1.851});$$

$$R^2 = 0.992, \quad (2)$$

где Y – сохранность саженцев сосны (С) и березы (Б), %; t – время, прошедшее после их высадки в культуры, лет.

Динамику средней высоты деревьев (H , м) в смешанных культурах по усредненным данным всех вариантов опыта с высокой точностью ($p < 0.01$) описывают, как показали расчеты, следующие уравнения регрессии:

$$H_C = 22.1 [1 - \exp(-1.477 \times 10^{-3} t^{1.750})];$$

$$R^2 = 0.997, \quad (3)$$

$$H_B = 8.5 [1 - \exp(-2.495 \times 10^{-3} t^{1.998})];$$

$$R^2 = 0.934. \quad (4)$$

Деревья березы до возраста 10–15 лет были несколько выше деревьев сосны, а после 25–30 лет стали значительно уступать им, ежегодно снижая темпы годовичного прироста. После

35 лет средняя высота деревьев березы практически перестала изменяться и у многих из них стали усыхать верхушки.

В смешанных лесных культурах, созданных на суглинистых дерново-подзолистых почвах, береза явно подавляет хвойные деревья, значительно превосходя их по размерам и общему запасу (рис. 2, табл. 3).

Особенно сильно угнетены деревья ели, хотя они удалены от рядов березы на расстояние 4.3 м. Деревья сосны, удаленные от деревьев ели на 2.8 м, несколько крупнее их. Производительность лесных культур в обоих вариантах опыта возрастает по мере снижения исходной густоты древостоя и доли участия в нём березы. Так, на пп 1, где один ряд березы чередовался с тремя рядами хвойных, запас стволовой древесины составил 394 м³/га, его общая масса 174 т/га, а таксовая стоимость – 29 тыс. руб./га. На пп 2, где ряд березы чередовался с четырьмя рядами хвойных, размер деревьев всех пород выше, что связано как с меньшей долей участия березы, так и большей шириной междурядий. На обеих пробных площадях по числу деревьев преобладает ель, за которой на пп 1 следует береза, а на пп 2 – сосна. Чистые культуры сосны на данном

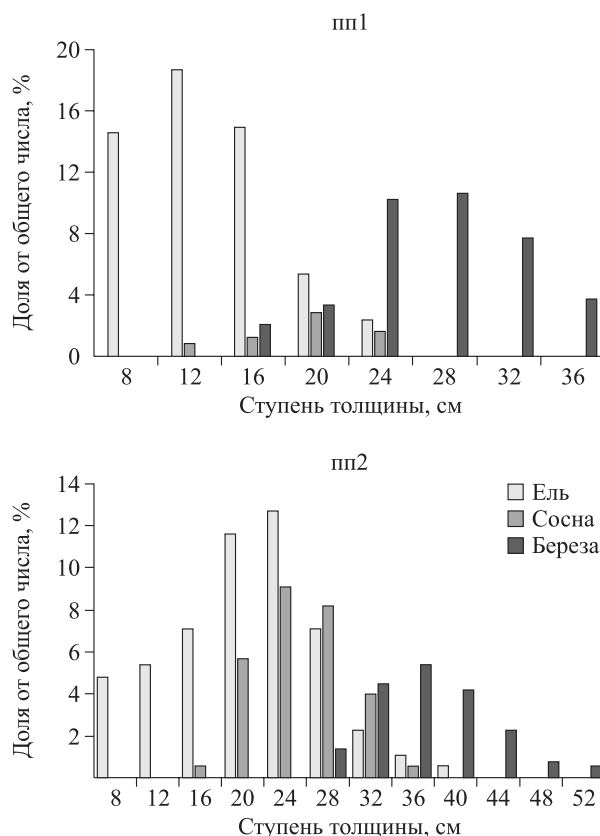
**Рис. 2.** Закономерности распределения деревьев разных пород по ступеням их толщины в смешанных насаждениях.

Таблица 3. Производительность 50-летнего древостоя в смешанных лесных культурах на опытном объекте, созданном на суглинистых дерново-подзолистых почвах

Параметры древостоя	Сосна	Ель	Береза	Итого
пп 1; смешение Б-Е-С, расстояние между Б и Е = 4.3 м, между рядами хвойных = 2.8 м				
Средний диаметр, см	19.8	13.9	27.7	—
Средняя высота, м	24.4	15.7	28.8	—
Средний объем ствола, м ³	0.359	0.126	0.711	—
Число деревьев, экз./га	70	600	400	1070
Площадь сечения стволов, м ² /га	2.14	9.09	24.17	35.41
Относительная полнота	0.05	0.24	0.73	1.02
Запас древесины, м ³ /га:				
стволовой	24	68	302	394
крупной	0.6	0.0	73.9	74.5
средней	11.8	12.8	123.4	148.0
Масса стволовой древесины, т/га	10.5	28.0	135.5	174.0
Общая фитомасса, т/га	15.3	45.7	198.7	259.7
Стоимость древесины, тыс. руб./га	2.8	6.1	20.1	29.0
пп 2; смешение Б-Е-С-С-Е, расстояние между Б и Е = 4.3 м, Е и С = 2.8 м, С – С = 3.5 м				
Средний диаметр, см	25.9	21.8	37.6	—
Средняя высота, м	25.6	21.3	27.1	—
Средний объем ствола, м ³	0.625	0.396	1.213	—
Число деревьев, экз./га	234	439	160	833
Площадь сечения стволов, м ² /га	12.33	16.39	17.77	46.48
Относительная полнота	0.28	0.37	0.55	1.20
Запас древесины, м ³ /га:				
стволовой	138	156	206	500
крупной	20.4	21.1	113.9	155.4
средней	78.1	68.3	27.8	174.2
Масса стволовой древесины, т/га	61.3	64.9	92.0	218.2
Общая фитомасса, т/га	90.8	100.9	137.7	329.4
Стоимость древесины, тыс. руб./га	19.5	18.8	15.8	54.1

объекте, как показали наши исследования (Демаков и др., 2017б), имеют более высокую производительность и превосходят их по тактовой стоимости древесины. Установлено, что с увеличением ширины междурядий на плантациях сосны с 1.5 до 4 м средний диаметр деревьев возрастает с 15.3 до 24.9 см, а объем крупной и средней древесины – с 227 до 363 м³/га. Увеличение ширины междурядий позволяет также экономить на стоимости посадочного материала при создании плантаций. Береза в смешанных насаждениях обгоняет хвойные деревья не только в росте, но и в развитии: в возрасте 45–50 лет она уже полностью достигает технической спелости и промедление с ее вырубкой ведет лишь к потере товарных качеств древесины.

Анализ приведенных данных показывает, что на богатых суглинистых дерново-подзолистых почвах вводить в культуры березу в смеси её с сосной и елью нецелесообразно, так как это снижает производительность и устойчивость насаждений. Об этом же свидетельствуют дан-

ные других исследователей (Лавриненко, 1965; Калиниченко и др., 1973), показавших, что береза в данных условиях обгоняет в росте сосну и ель уже в возрасте 20–25 лет, оказывая на них сильное угнетающее воздействие. Ожесточенная конкурентная борьба между деревьями в смешанных насаждениях происходит при этом не только за свет, но и за жизненное пространство в почве (Санников и др., 2012; Санников, Санникова, 2014). Успешное сосуществование в ценозах деревьев сосны и березы возможно лишь в весьма узком диапазоне эдафических условий, определяемых гранулометрическим составом почвы, уровнем залегания грунтовых вод и наличием водоупорных горизонтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что создавать смешанные сосново-березовые культуры во всех типах лесорастительных условий Марийского Заволжья нецелесообразно из-за раз-

ной требовательности этих древесных пород к плодородию почвы, а также различий в скорости их роста и развития. В сухих и свежих борах сосново-березовые культуры значительно уступают чистым сосновым по производительности древостоя и особенно его таксовой стоимости. До возраста 10–15 лет деревья березы в них выше, чем сосны, но после 25–30 лет положение их становится обратным. Эти культуры не выполняют также и возложенных на них функций по повышению биологического разнообразия и устойчивости функционирования насаждений, а также снижению их пожароопасности. В субборах, а особенно в раменах, береза сильно угнетает не только светолюбивую сосну, но даже теневыносливую ель, значительно превосходя их деревья по размерам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемяева Н. К., Чернодубов А. И. Сосново-березовые культуры в Хреновском бору // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений: Материалы XIX Междунар. науч. конф. Красноярск: СибГАУ, 2016. С. 6–8.
- Горев Г. И. Зависимость продуктивности от породного состава культур // Лесн. хоз-во. 1983. № 6. С. 17–20.
- Гринин А. С., Орехов Н. А., Новиков В. Н. Математическое моделирование в экологии: учеб. пособие. М.: ЮНИТИ-Дана, 2003. 269 с.
- Демаков Ю. П. Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-т, 2018. 432 с.
- Демаков Ю. П., Мухортов Д. И., Нуреева Т. В. Pro motus coniferarum – Программа для расчета динамики состояния хвойных древостоев на постоянных пробных площадях. Вариант 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617460 от 5 июля 2017а года. Заявка № 2017614495 от 16.05.2017 г.
- Демаков Ю. П., Нуреева Т. В., Краснов В. Г., Рыжков А. А. Эколого-ресурсный потенциал лесных насаждений на приовражно-балочных землях Среднего Поволжья // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экол. Природопольз. 2017б. № 3 (35). С. 73–87.
- Демаков Ю. П., Нуреева Т. В., Пураев А. С., Краснов В. Г. Экономические основы и опыт плантационного лесовыращивания в Среднем Поволжье // Сиб. лесн. журн. 2018. № 2. С. 3–14.
- Калинин К. К. Древесно-кустарниковые породы при создании смешанных лесных культур // Лесн. хоз-во. 2006. № 3. С. 37–39.
- Калиниченко Н. П., Писаренко А. И., Смирнов Н. А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 328 с.
- Лавриненко Д. Д. Взаимодействие древесных пород в различных типах леса. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 248 с.
- Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
- Миронов В. В. Облесение песков Юго-Востока. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 168 с.
- Обновленский В. М. Совершенствование типов и способов создания культур сосны // Тр. Брян. лесохоз. ин-та. 1970. Т. 10. С. 102–115.
- Попов В. К. Сосново-березовые культуры центральной лесостепи. Воронеж: Квадрат, 1997. 224 с.
- Родин С. А., Лямеборшай С. Х. Оптимизация породного состава лесных культур // Лесн. хоз-во. 1998. № 4. С. 23–24.
- Рубцов В. И. Культуры сосны в лесостепи. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 285 с.
- Русаленко А. И. О создании сосново-березовых культур на песчаных почвах // Лесн. хоз-во. 1979. № 12. С. 37–40.
- Санников С. Н., Санникова Н. С., Петрова И. В. Очерки по теории лесной популяционной биологии. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 270 с.
- Санников С. Н., Санникова Н. С. Лес как подземно-сомкнутая дендроценоэкосистема // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 25–34.
- Сиволопов А. И., Алиев Э. В., Чеботарев В. В. Особенности создания культур сосны, березы и дуба на гарях Усманского бора // Соврем. пробл. науки и образования. 2013. № 6. 8 с.
- Сухоруков А. С. Успешность роста и состояния сосны в смешанных культурах // Лесн. вестн. 2010. № 1. С. 17–21.
- Харитонович Ф. Н. Учитывать межвидовые отношения при создании лесных культур // Лесн. хоз-во. 1961. № 1. С. 15–18.
- Чернодубов А. И., Сотников И. С. Сосново-березовые культуры Белгородской области // Экологические и биологические основы повышения продуктивности и устойчивости природных и искусственно возобновленных лесных экосистем: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию высш. лесн. образования в г. Воронеж и ЦЧР России 4–6 октября 2018 г.: в 2 т. Воронеж: ВГЛУ, 2018. Т. 1. С. 637–642.
- Шамирян К. Г. Сравнительная характеристика сосново-березовых культур с различной схемой смешения // Науч. журн. КубГАУ. 2012. № 81 (07). С. 1–9.
- Otazua J. U., Paquette A. Mixed forest plantations // Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests / Andrés Bravo-Oviedo, Hans Pretzsch, Miren del Río (Eds.). Springer, Cham, 2018. P. 319–341.

AN EXPERIENCE IN CREATING MIXED FOREST CROPS IN MARI ZAVOLZH'E

Yu. P. Demakov^{1,2}, A. V. Isaev¹, T. V. Nureeva²

¹ State Nature Reserve «Bolshaya Kokshaga»

Voinov-Internatsionalistov str., 26, Yoshkar-Ola, 424038 Russian Federation

² Volga State Technological University

Ploshchad' Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000 Russian Federation

E-mail: YPDemakov@yandex.ru, avsacha@yandex.ru, NureevaTV@volgatech.net

The results of long-term experiments carried out on two stationary objects of forest plantations in 1976 and 1968 in different types of forest growing conditions of the Mari Trans-Volga region are presented. The plantations of the 1967, created in a dry forest, consisted only of pine *Pinus* L. and birch *Betula* L. trees in various proportions, and the second, created on loamy soils, is of three tree species (birch, spruce *Picea* A. Dietr. and pine). Pure pine plantations served as a control group. The productivity of the stand, its commodity composition and tax value were estimated by calculation in terms of the average diameter, height and number of trees according to our methodology. The relevance of research is driven by the need of improving measures to optimize the species composition of forests in order to preserve biological diversity, as well as reduce the frequency and intensity of fires. It is shown that in dry and fresh pine forests, pine-birch plantations demonstrate significantly worse stand productivity and especially tax value. Until the age of 10–15 years, the height of birch trees in them is higher than that of pines, but after 25–30 years, their position changes to the opposite. On sandy loam and loamy soils, birch suppresses from the composition of the stand not only light-loving pine, but even shade-tolerant spruce, significantly exceeding them in size. It is concluded that it is impractical to create mixed pine-birch and pine-spruce-birch crops in the conditions of the Mari Volga region due to the different demands of tree species on soil fertility, as well as differences in the speed of their growth and development. These plantations also do not fulfill the functions assigned to them for increasing the biological diversity and sustainability of the functioning of plantations, as well as to reduce their fire hazard.

Keywords: mixed forest crops, growth, development, productivity, commodity structure, tax value.

How to cite: Demakov Yu. P., Isaev A. V., Nureeva T. V. An experience in creating mixed forest crops in Mari Zavolzh'e // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 41–47 (in Russian with English abstract).

CONTENTS

RESEARCH ARTICLES

<i>V. V. Stasova, L. N. Skripal'shchikova, N. V. Astrakhantseva, A. P. Barchenkov</i> Morphological and Anatomical Characteristics and Pigment Composition of Scotch Pine Needles in Green Stands of Krasnoyarsk City	3
<i>A. V. Kabonen, O. I. Gavrilova, A. V. Gryazkin, K. A. Pak</i> Assessment of Natural Forest Regeneration After Fire Using Data Obtained with Unmanned Aerial Vehicle	11
<i>S. M. Sinkevich</i> Silvicultural Efficiency of Strip-Shelterwood Felling in Pine Stand of Mid-Taiga Subzone of Karelia	21
<i>V. G. Storozhenko</i> Structures of Wood Fractions and Volumes of Wood Components in Spruce Biogeocenoses of the Taiga of European Russia	29
<i>Yu. P. Demakov, A. V. Isaev, T. V. Nureeva</i> An Experience in Creating Mixed Forest Crops in Mari Zavolzh'e	41

* IN MEMORIAM

* Ivan Semenovich Kosenko (03.12.1940–10.04.2022)

* Article is published in online edition.

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

<i>В. В. Стасова, Л. Н. Скрипальщикова, Н. В. Астраханцева, А. П. Барченков</i> Морфолого-анатомические характеристики и пигментный состав хвои сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярск	3
<i>А. В. Кабонен, О. И. Гаврилова, А. В. Грязькин, К. А. Пак</i> Оценка естественного возобновления леса на гари с использованием данных, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата	11
<i>С. М. Синькевич</i> Лесоводственная эффективность чересполосно-постепенной рубки в сосняке среднетаежной подзоны Карелии	21
<i>В. Г. Стороженко</i> Структуры древесных фракций и объемы компонентов древесины еловых биогеоценозов тайги Европейской России	29
<i>Ю. П. Демаков, А. В. Исаев, Т. В. Нуреева</i> Опыт создания смешанных лесных культур в Марийском Заволжье	41

* ПАМЯТИ УЧЕНОГО

* Иван Семенович Косенко (03.12.1940–10.04.2022)

* Статья публикуется в сетевом издании.