

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

ISSN 2311-1410

Сибирский лесной журнал

Номер 4
Июль–Август 2023



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 4 July–August 2023

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. Chimitdorzhiev (RF),
Chimidnyam Dorjsuren (Mongolia), Chultem Dugarjav (Mongolia), Alexey A. Dymov (RF), Steve Eubanks (USA),
Svetlana Yu. Evgrafova (RF), 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 Schmullius (Germany), Olga V. Shergina (RF),
Alexander S. Shishikin (RF), Svetlana D. Shlotgauer (RF), Anatoly Z. Shvidenko (RF, Austria), Vladimir A. Sokolov (RF),
Vladimir V. Soldatov (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. Usoltshev (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

№ 4 2023 Июль – Август

Научный журнал. Издается 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. Гутгенбергер (Германия),
И. М. Данилин (*зам. главного редактора*, РФ), Ч. Доржсурэн (Монголия), Ч. Дугаржав (Монголия), А. А. Дымов (РФ),
С. Ю. Евграфова (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), Т. А. Никитина (*ведущий редактор*, РФ),
С. В. Осипов (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), В. В. Солдатов (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. Шапченко (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», 2023
© Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), 2023



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, ботаника, 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 Министерстве науки и высшего образования РФ (категория K1), 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: sibirskiylessnoyjournal.rf, 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 29.07.2023. Выход в свет 31.08.2023. Бумага типографская. Формат 60 × 84 1/8

Усл. печ. л. 9.5. Уч.-изд. л. 8.6. Тираж 100 экз. Заказ № 182. 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>

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 57.06+59.08+639.1.052

ТИПОЛОГИЯ ЛЕСНЫХ ОХОТНИЧЬИХ УГОДИЙ

А. Г. Рассолов, А. С. Шишкин

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

E-mail: agrassolov.net@gmail.com, shishikin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.02.2022 г.

Рассмотрены разработанные классификационные схемы лесных охотничьих угодий, в частности основанная ранее на лесной типологии с четырехуровневым делением (категория – класс – группа типов – тип), согласно которой приводятся средообразующие аргументы и критерии для их выделения. На основе анализа литературы, посвященной классификации лесных охотничьих угодий, показана эволюция классификации природных ресурсов от использования имеющейся информации (материалы лесоустройства) до видовой оценки продуктивности, отображаемой на спутниковых снимках. Утверждается, что любая тематическая интерпретация природной основы не соответствует задачам охотустройства: животные подвижны, а лесная среда динамична, поэтому классификация охотничьих угодий должна учитывать пространственный и сукцессионный факторы формирования условия обитания. Представленная схема учитывает на уровне ареала действия климатического (зонального, высотно-поясного), популяции – экологического (кормового, защитного и гнездопригодного) и динамики численности – сукцессионного (динамика насаждений) факторов. При охотустройстве принимаются во внимание уже имеющиеся материалы лесоустройства и прежнего охотустройства, но также учитывается и тематическая интерпретация исходной информации. Предлагается прямое дешифрирование экологических свойств изображения охотничьих угодий по космическим снимкам, а разработанная классификационная схема динамического состояния позволяет прогнозировать их сукцессионную продуктивность и уровень численности животных, поэтому следует ориентироваться на получение прямой информации об охотничьих угодьях с использованием космической съемки высокого разрешения.

Ключевые слова: лесная типология, группа классов, класс, группа типов, тип, спутниковая съемка.

DOI: 10.15372/SJFS20230401

ВВЕДЕНИЕ

Выделение охотничьих угодий, однородных по экологическим свойствам местообитаний охотничьих животных, представляется весьма сложной задачей, значительно сложнее, чем выделение почвенных или геоботанических разностей, поскольку эти компоненты (почва, растительность) экосистемы более статичны по сравнению с животным населением. Кроме того, каждый вид требует специфических экологических условий обитания (Юргенсон, 1968; Соколов, 1970; Козловский, 1971). Например, мигра-

ционная сибирская косуля (*Capreolus pygargus* (Pallas)) в 50-х годах прошлого века пришла из Восточного Саяна и начала осваивать приангарские сосново-лиственные молодняки после рубки спелых сосняков 50–60-х годов, которые к 2010 г. в результате сукцессионных процессов превратились в сосновые жердняки и стали непригодны для обитания данного вида. В 90-х косуля перешла на летние станции темнохвойных вырубок (осиновые молодняки) Енисейского края, но зимними станциями оставалась Канская лесостепь. Ведущие миграционные факторы для косули – корм и глубина снега.

Пока действовал «черный рынок», соболя (*Martes zibellina* Linnaeus) добывали в местах его размножения, а затем это стало возможным только в наименее пригодных для обитания ивняках р. Енисей, когда зверьки покидали участки размножения. Перераспределением угодий для добычи соболя послужил запрос рынка. Реакклиматизация соболя привела к изменению структуры охотничьей продукции: снижению численности обыкновенной белки (*Sciurus vulgaris* (Linnaeus)) более чем в 5 раз, резкому сокращению численности тетеревиных (Tetraonidae), горностая (*Mustela erminea* (Linnaeus)) и зайца-беляка (*Lepus timidus* (Linnaeus)), а колонок (*Mustela sibirica* Pallas) вообще исчез из ареала соболя. На численность этих зверей и птиц повлияла хищническая деятельность размножившегося соболя, что усугубилось низкими рыночными ценами на его шкурку. Плотность лося (*Alces alces* (Linnaeus)) на шелкопрядниках 50-х годов в Западной Сибири и последовавших гарях достигла 5–8 особей на 1000 га, а сейчас она соответствует естественной кормности угодий (2–3 на 1000 га). Добывать зверей на мясо стало выгодно в радиусе не более 200 км от места сбыта, так как амортизация снегоходов и ГСМ определили площадь освоения угодий. Таким образом, в структуру охотничьей продукции вошел рынок и «заготовительные» цены.

Тип охотничьих угодий как объект хозяйствования сочетает в себе естественные свойства ландшафта, сукцессионные процессы, иницируемые природой (шелкопрядники, пожары) или человеком (вырубки) и социально-экономические условия добычи и сбыта охотничьей продукции.

Изменились формы собственности, однако по прошествии времени осталась цель ведения охотничьего хозяйства – получение продукции охоты, а значит качество закрепляемых охотничьих угодий. От их продуктивности напрямую зависит экономическая эффективность ведения охотничьего хозяйства. Ранее (в советское время) охотничье хозяйство было планово-убыточным, а сейчас охотничьи угодья могут содержать лишь состоятельные люди за счет иной сферы деятельности. Основная масса охотпользователей занимается деятельностью ради извлечения прибыли (промысловое направление), а значит планировать деятельность без знаний производительности взятых в аренду охотничьих угодий невозможно.

Цель настоящей работы – дать обзор существующих подходов к классификации лесных

охотничьих угодий и предложить вариант, отвечающий современным требованиям методов оценки продуктивности угодий.

В задачи исследований входили исторический анализ и разработка вариантов типологии лесных охотничьих угодий с учетом современных данных спутниковой съемки и знаний о сукцессионных процессах в лесах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе исследований анализировался опыт проведения охотустроительных работ в Сибири (более 60 хозяйств на площади около 10 млн га), в том числе охотустройство Северо-Енисейского и Туруханского районов, а также определялась продуктивность охотугодий 18 Центральных районов Красноярского края (Шишкин, Данилин, 1998). При этом хозяйства имели разную направленность: спортивные, любительские, промысловые, национально-этнические. Проработаны основные литературные источники по охотустройству. Привлечены собственные данные по особенностям экологии промысловых видов Сибири, сукцессионным изменениям условий обитания, прямому дешифрированию свойств охотничьих угодий по космическим снимкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При всем разночтении целей и задач охотустройства большинство исследователей однозначно признают необходимость описания и инвентаризации охотничьих угодий. Содержание работы по инвентаризации охотничьих угодий впервые и достаточно полно изложено С. В. Лобачевым и В. Г. Стахровским в книге «Верхне-Вычегодская экспедиция...» (1932). Для зоологов более естественным казался подход к угодьям как к среде обитания охотничьих животных, тем более что большая часть научных исследований проводилась в заповедниках, на научных стационарах. Такие термины и понятия, как биологическая съемка, тип местообитания, биотоп, станция – характеризовали биологическое направление в изучении охотничьих угодий.

Термин «тип местообитания» введен Г. Г. Доппельмайром еще в 1916 г. в ходе его двухлетней соболиной экспедиции на Северо-Восток Байкала. При этом под типом место-

обитания он имел в виду участки местности с одинаковыми условиями обитания охотничьих животных, одинаковым составом охотничьей фауны и плотностью его населения, то есть то, что сейчас обозначается термином «тип охотничьего угодья» (Соболиный промысел..., 1926). А. А. Шилов (1969) под типом местообитания понимал набор сезонных стадий круглогодичного обитания микропопуляции конкретного вида животного, полагая, что самовозобновляющиеся группировки животных конкретного вида не могут длительное время существовать в пределах одного однородного типа растительности. При этом следует учитывать, что угодья – хозяйственная единица, а местообитание – биологическое, поэтому в определение охотничьих угодий, как и типа леса, следует добавлять «проведение одинаковых охотхозяйственных мероприятий».

Можно возразить, что однородный тип растительности, даже не являясь синонимом типа охотничьего угодья, может восприниматься и трактоваться достаточно широко в зависимости от степени детализации однородности (сукцессионной, формационной, ландшафтной и пр.). Жизнеспособные группировки охотничьих видов, в частности грызуны, вполне могут существовать в «однородном типе растительности» и, напротив, группировки широко мигрирующих видов – северный олень (*Rangifer tarandus* (Linnaeus)), косуля, алтайский марал (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov), лось – не вмещаются в площади, занимаемые «типом местообитания», в понимании этого термина А. А. Шилов (1969). В 50–60-х годах прошлого века была попытка ввести в классификацию охотничьих угодий видовой эколого-популяционный подход, который рассматривает тип местообитания как жизненное пространство популяции (микропопуляции, группировки) конкретного вида. Предлагалось упрощенное охотустройство и «хозяйственный» (сейчас это называется «денежный») подход к классификации охотничьих угодий, которые делились по основному объекту охоты (Скалон В. Н., Скалон Н. Н., 1958; Красный, 1965; Сорокина, 1969), а называть угодья рекомендовалось по доминирующему виду: тетеревиные, лосиные, заячьи и пр. Такой подход значительно ускоряет и удешевляет проведение охотустроительных работ, поскольку список добываемых видов резко сокращается. Это предложение в чистом виде признано неприемлемым, однако элементы предлагаемой классификации имеют место в современной теории и практике ведения охотничьего хозяйства.

Модная в 70–80-х годах прошлого века ландшафтная классификация природных образований, включающая все компоненты, в том числе и зоологический, не имеет теоретических возражений, но на практике реальные границы ландшафтных разностей выделяются субъективно (местность, урочище, фация). Эта классификация до сих пор не нашла применения, несмотря на ее очевидность (Кузякин, 1979; Шишкин, 2016). Географический ландшафт может опосредованно учитывать более широкий спектр природных факторов и, следовательно, более полно – зависимость состава и плотности населения охотничьих животных от среды обитания. Однако для использования в охотничьем хозяйстве система ландшафтной классификации слишком сложна и субъективна для практиков, кроме того, в современных условиях она базируется на материалах спутниковых съемок.

Ландшафтный метод пытались безуспешно использовать в лесном и сельском хозяйствах, поэтому материалы лесо- и землеустройства нельзя напрямую применять для охотустройства (Шишкин, 2016). Несомненно, ландшафтным методом (новым) можно решать прежде всего экологические проблемы, но вначале необходимо отработать методику объективности выделения ландшафтных образований, их соответствия уже используемым классификациям.

В практике охотничьего хозяйства в связи с универсальностью и оценкой потенциальной продуктивности угодий наибольшее признание получила типологическая схема Д. Н. Данилова (1960, 1966), развивающая подходы к охотустройству С. В. Лобачева, В. Г. Стахровского (Верхне-Вычегодская экспедиция..., 1932). Произошло это прежде всего потому, что она базировалась на лесной типологии и предполагала прямое использование материалов лесоустройства, объем и качество которых ранее превосходили охотустроительные работы. К сожалению, типологическая схема Д. Н. Данилова (1960) статична и не позволяет вести непрерывное охотустройство, учитывая сукцессионное развитие лесов, а также дешифровочные признаки изображения охотугодий на спутниковых снимках. Поскольку любое тематическое отражение природной среды не применимо для оценки условий обитания охотничьих животных и, прежде всего, это касается структурных особенностей (мозаичности) растительности. Важность этого фактора отмечал А. И. Хлебников (1977) при изучении экологии соболя в Западном Саяне.

Не выдерживает критики и официально принятая типология охотугодий, где выделяются

категории, классы, группы типов и тип охотничьих угодий. На уровне категорий выделяются лесные, степные и высокогорные угодья, но высокогорные могут быть лесными и степными, а болотные или водные входят в лесные, т. е. не определен масштаб выделения. Не понятно, что взято за основу такого деления? Если это природно-климатические зоны, тогда это оправдано. В классе охотничьих угодий отдельно выделяются гари, вырубки и сухостой, но их экологические свойства меняются даже быстрее, чем периодичность (10 лет) классического охотустройства. Группа лесных типов основана на формационном делении, т. е. не учитывает возраст и сомкнутость насаждений, а также напочвенный покров. Тип декларируется как однородный комплекс признаков местообитания животного и охоты на него. Что является критерием такого выделения, опять же, не определено. Очевидно, что при такой классификации охотничьих угодий упущено два основных принципа: временной и пространственный.

Здесь уместно привести мнения некоторых классиков охотустройства: «Типология охотничьих угодий имеет целью расчленить территорию на участки, сходные как в природном, так и в хозяйственном отношении» (Данилов, 1960). «Основными критериями выделения конкретных типов угодий должны быть их узнаваемость в природе и хозяйственная целесообразность этого выделения» (Линейцев, 1973). «Типы лесных (и любых других) охотничьих угодий имеют право на независимое существование лишь в тех случаях, когда их выделение выражает четкую практическую целенаправленность, преследуя этим прикладные задачи охотничьего хозяйства». «Научно-прикладную классификацию лесных охотничьих угодий ни в коем случае нельзя смешивать с тем набором нередко укрупненных типологических категорий, к которым прибегают на практике». «Тип охотничьего угодья, как всякий тип, результат типизации природных явлений – всегда известное обобщение (генерализация), следовательно, отвлеченность от конкретной действительности отдельно взятых лесных урочищ» (Юргенсон, 1973).

С этими утверждениями нельзя не согласиться, однако, когда авторы утверждают, что «тип угодья не имеет конкретной протяженности в натуре», можно возразить, что все зависит от уровня генерализации (масштаба, времени освоения видом). Эти условия (оценка продуктивности, организация охоты, проведение биотехнических мероприятий) остаются обязательными в наше время и на ближайшую перспективу.

Принимая типологическую схему (уровни генерализации) Д. Н. Данилова (1960): категория – класс – группа типов – тип, мы полагаем такое деление оптимальным. При этом категория охотничьих угодий имеет географическое (зональное) определение, а остальные – лесоводственное (формация, группа типов леса по напочвенному покрову, по полноте, возрасту) (Шишкин, 2005). Уровни генерализации по необходимости могут дробиться, например группа классов – высотные пояса в горах, через «+» указывается смешение признаков и т. п. конкретно для каждого хозяйства. Предложенная и подробно анализируемая далее классификационная схема универсальна по географии охотничьих ресурсов и может трансформироваться под региональное охотхозяйство, а также по видам недровесного пользования в лесу. Цель современной классификации любительских и промысловых охотничьих угодий – выделить однородные условия обитаний и охоты, для того чтобы определить норму добычи. В спортивных хозяйствах цель классификации охотничьих угодий – биотехнические мероприятия, а норма добычи – вторична.

Класс угодий, выделяемый по основной лесобразующей породе (кедровники, сосняки, лиственничники, пихтачи, березняки, елово-пихтовые леса, осиново-березовые леса и т. д. – лесные формации), по нашему мнению, наряду с категорией угодий должен стать основным элементом государственного кадастрового учета охотничьих угодий. При этом следует согласиться с предложением Д. Н. Данилова (1960) лесонасаждение относить к классу угодий, названному по конкретной породе, если ее участие в составе лесонасаждения составляет 6/10 и выше.

Следует обратить внимание на отличие экологических свойств насаждений (охотничьих угодий) от сложившейся практики лесоводства, при которой древостои разделяют по наиболее ценной и перспективной, с точки зрения заготовок, древесной породе. Поэтому при определении пространственного положения угодий очень важно в качестве первичного материала использовать не только лесотаксационные описания выделов и планшеты, но в большей степени – спутниковые снимки.

Для расчетов или практического хозяйственного воздействия Д. Н. Данилов (1966) объединял типы леса в соответствующие типы охотничьих угодий, исключая смешанные хвойно-лиственные насаждения, чтобы иметь конкретные площади для определения их продуктивности или

емкости, а также направления биотехнических работ. Он выделил четыре принципа типологии лесных охотничьих угодий: направленность биотехнических мероприятий; мезорельеф, возраст, полнота и сомкнутость древостоя; стоимость и скорость выполнения охотоустроительных работ; ориентация на главные виды охотничьих животных. При этом возможны любые объединения типов леса, удобные или необходимые в практической работе охотничьего хозяйства, но они должны вписываться в заданную типологическую схему (индивидуальную) одного хозяйства, иметь один показатель продуктивности угодий (бонитет), одинаковую организацию охоты, и затрат на проведение биотехнических работ (Данилов, 1966).

Подход к типологизации угодий «от вида» или «от территории» нередко ставит исследователей по разные стороны рубежа непонимания друг друга, хотя отражает лишь разные уровни детализации (или генерализации) факторов среды обитания. П. Б. Юргенсон (1973) считал, что «тип охотничьего угодья – понятие прежде всего видовое» и, более того, называл типом охотничьего угодья «участок территории, когда он имеет существенные различия лишь для одного вида и лишь по одному сезонному фактору». Таким образом, автор приравнивает тип угодья к сезонной стадии, что верно для организации охоты, и экологическим условиям обитания. В промысловых угодьях Туруханского района Красноярского края по этому принципу в отдельный тип угодий выделяются мелкие, заросшие водорослями промерзающие озера с целью первоочередного облова ондатры (*Ondatra zibethicus* (Linnaeus)), но, в то же время, это и наиболее кормные угодья и для других водоплавающих охотничьих видов.

Трудно представить естественный вариант «видового типа угодий». Подход «от вида», это частный случай, обусловленный практической востребованностью продукции охоты. В связи с этим С. Н. Линейцев (1973) отмечал, что типологическое деление угодий промысловых хозяйств таежной зоны должно учитывать видовую (финансовую составляющую) направленности охотничьего хозяйства. При подходе к выделению типов угодий промыслового хозяйства «от территории» как среды обитания мы невольно будем (и должны) ориентироваться в своих действиях на основные в экономическом плане виды охотничьих животных, что справедливо только для текущего момента и спроса рынка (Линейцев, Рассолов, 2001).

А. И. Хлебников (1977) в кедровниках Западного Саяна описал следующие типы охотничьих угодий: низогорные черневого пояса северного макросклона, среднегорные черневого пояса северного макросклона, верхнего таежного пихтового пояса северного макросклона, высокогорного пояса, южного макросклона. Очевидно, что макросклон и его высотный пояс – географическая категория, кедровники – формационный класс, но нет группы и типа охотничьих угодий, они только подразумеваются в породном составе древостоя, видовом составе напочвенного покрова, возрасте, сомкнутости крон и глубине снега.

С. Н. Линейцев (1973) в охотничьих угодьях Шорского и Шушенского охотпромпхозов выделял кедрч травянистый (тип угодий, расположен во всех высотных поясах, преобладает на склонах южной экспозиции); кедрч мшистый (распространен во всех высотных поясах, преобладает по склонам северной экспозиции); кедрч крутых склонов (включает бадановые кедровники, по склонам гор крутизной более 20° встречается во всех высотных поясах); кедрово-пихтовая тайга (включает в себя мшистые, крупнопапоротниковые, бадановые кедровники, распространен на выровненных участках в низкогорном и среднегорном поясах).

Для спелых насаждений такой подход правомочен и мы уже наблюдаем кроме классов (кедрачи) группы типов охотничьих угодий (доминанты напочвенного покрова). Но не ясно, к какой группе следует относить гари и вырубки кедровников, т. е. возрастное состояние насаждений, которых в Саянах в настоящее время более половины.

Работы из серии учебных пособий (Русанов, 1986; Харченко и др., 1993; Ключев, 2003; Леонтьев, 2013; Козлов, 2015; Мартынов и др., 2022), к сожалению, не внесли определенности в классификацию охотничьих угодий. Соответственно мы получаем следующее поколение охотоведов и инженеров лесного хозяйства, далеких от современных возможностей и способов классификации охотничьих угодий.

В связи с этим считаем необходимым классификацию охотничьих угодий проводить с учетом современных приемов оценки природных ресурсов. При этом для копытных и пушных видов следует учитывать снежность и сезонность использования местообитаний (рис. 1).

Критическая глубина снежного покрова определяется расстоянием от груди до копыт передних конечностей. При этом для лося она

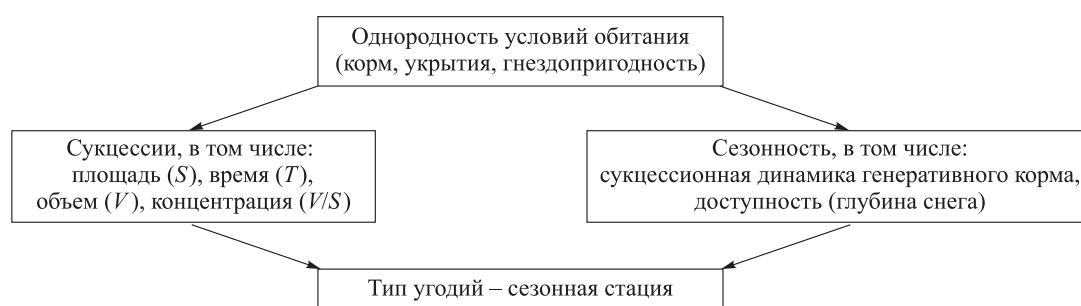


Рис. 1. Схема выделения лесных охотничьих угодий.

составляет 90 см; марала, северного оленя – 70 и косули – 50 см (Юргенсон, 1968). Естественно, что эти значения корректируются концентрацией корма и при его увеличении и доступности глубина может увеличиваться, но не значительно.

Комфортное обитание зверей возможно при глубине снега на 50 % ниже критической, что позволяет им использовать до 80 % доступного корма (Владышевский, 1980). В связи с динамикой выпадения снега копытные вынуждены формировать миграционные группировки, которые в зимний период выходят в малоснежные места (обычно зону отстрела), а летом и во время гона обитают в труднодоступных угодьях что и определяет их популяционную принадлежность. Поэтому, следует выделять категории угодий, которые соответствуют ареалам обитания (популяционные группировки) вида и на этом уровне учитывать обитание копытных.

В табл. 1 приведена предлагаемая и многократно апробированная классификационная схема лесных охотничьих угодий с критериями

выделения в охотничьих хозяйствах и заповедниках с использованием спутниковых снимков (Ельский, Шишкин, 1985; Хлебников и др., 1988; Шишкин, 2005, 2006).

Эта схема на уровне группы и типа охотничьих угодий может прогнозировать продуктивность угодий и ее емкость в зависимости от изменения экологических условий, т. е. вести непрерывное охотустройство. Такое прогнозирование позволяет учитывать консортивный и сукцессионный факторы формирования защитных условий и кормовой базы, регулировать норму отстрела, например, если в перспективе снизится кормовая емкость (древесно-веточного корма) угодий, то следует увеличить охотничий пресс на потребителей (копытные, заяц-беляк). Они все равно уйдут, если есть куда, а возможно, сократят свое воспроизводство или погибнут.

В результате такого подхода, основной тип охотничьих угодий как местообитание последовательно получает климатическую, консортивную (функциональная связь с доминирующей растительностью) и сукцессионную характе-

Таблица 1. Схема (критерии, биологические признаки) выделения охотничьих угодий

Уровень генерализации	Факторы		
	природно-климатические	консортивные	сукцессионные
Категория, группа классов	Тип растительности, природные зоны, ВПК, ареал, статична во времени, пока не изменится климат		
Класс		Формации, популяция, динамичен в течение века	
Группа типов		Напочвенный покров, семейная (клановая) группа, динамична в течение нескольких десятков лет	
Тип			Возраст, сезонная стация, семейная группа, индивидуальное обитание, динамичен в течение 10 лет

Примечание. ВПК – высотно-поясной комплекс.

Таблица 2. Классификационная схема лесных охотничьих угодий северного макросклона Саян

Группа классов	Класс	Группа типов	Тип
Высокогорная	Кедрач	Лишайниковая	Открытый
Горно-таежная	Сосняк	Ягодная	Кормовой
Подтаежная	Лиственный	Травянистая	Защитный
Лесостепная	Пихтач	Кустарниковая	Комплексный
	Долина	Покосы	
	С.-х. угодья	Выпаса	
	Альпийские луга	Поля	
	Болото	Сточные	
	Озера	Безсточные	

ристики. Биологическая оценка включает ареал, популяцию, динамику численности вида и его индивидуальный (семейный, клановый) участок обитания. Время существования условий обитания колеблется от десятка лет до существенных изменений климата. Таким образом, уровни генерализации классификаций охотничьих угодий получают критерии выделения, т. е. системность.

В табл. 2 показан пример разработки классификационной схемы охотничьих угодий северного макросклона южных гор Сибири, на примере Курагинского района (Шишкин, Данилин, 1988).

Высотно-поясные комплексы (климатический градиент) выделяются на уровне группы классов. Тип угодий отражает сукцессионное (возрастное) состояние насаждений, которых

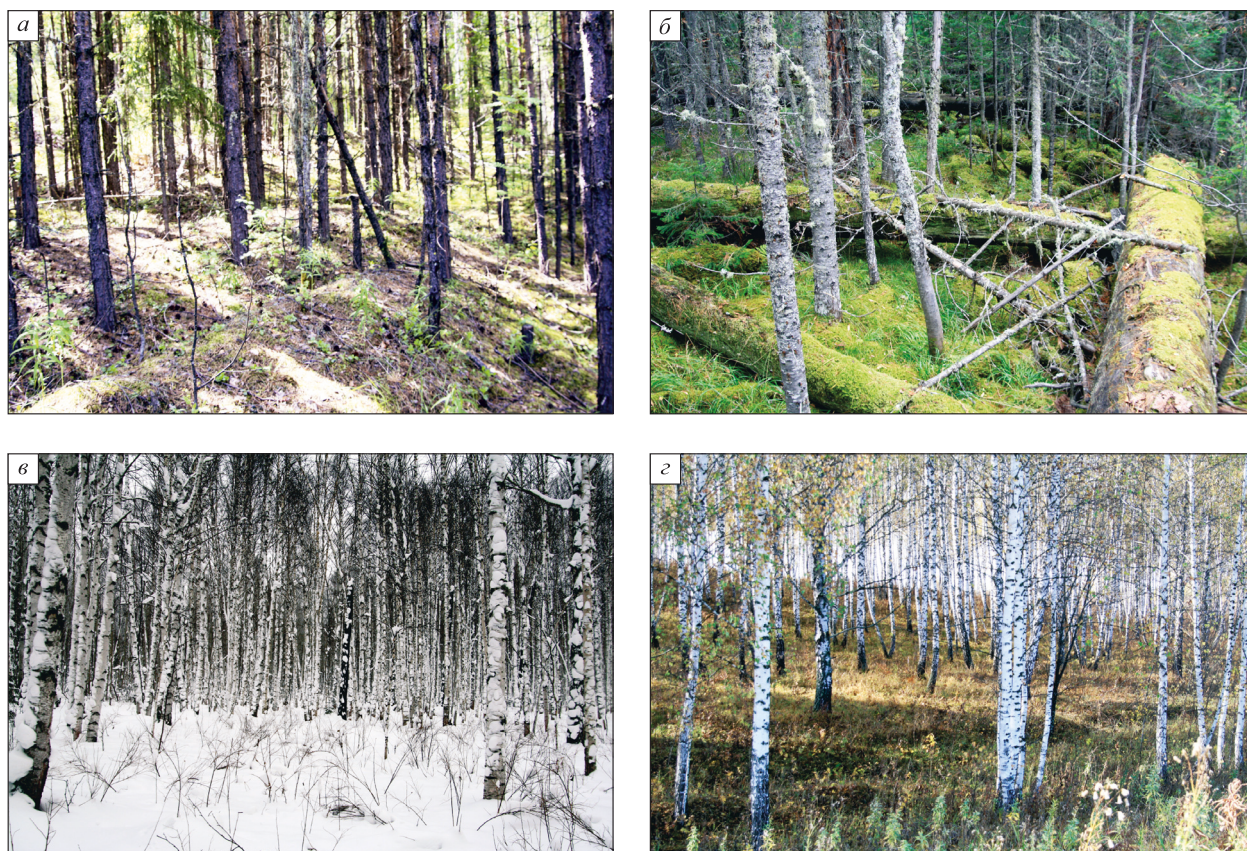


Рис. 2. Типы лесных охотничьих угодий.

а – сосновый жердняк с доминированием защитных функций; *б* – комплексный тип с крупномерной захламленностью – выводковая стация соболя; *в* – естественная кормовая стация лося (вегетативные части смородины (*Ribes* L.)) в комплексном березняке после шелкопряда 50-х годов; *г* – просматриваемый комплексный березняк, не подходящий для охотничьих видов животных.

не может быть более четырех, и также отражает доминирование экологических условий обитания.

Разница в экологических условиях должна визуально различаться охотоустроителем (носителем информации об экологических требованиях значимых охотничьих видов), иначе теряется хозяйственная целесообразность типологического разделения этих угодий, поэтому типов угодий должно быть не более 15–20 в одном хозяйстве.

Некоторые типы лесных охотничьих угодий показаны на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ основной литературы, посвященной классификации лесных охотничьих угодий, продемонстрировал эволюцию классификации природных ресурсов от использования имеющейся информации (материалы лесоустройства) до видовой оценки продуктивности, отображаемой на спутниковых снимках. Любая тематическая интерпретация природной основы не соответствует задачам охотустройства. Животные подвижны, а лесная среда динамична, поэтому классификация охотничьих угодий должна учитывать пространственный и сукцессионный факторы формирования условия обитания.

Предлагается прямое дешифрирование экологических свойств изображения охотничьих угодий по цифровым космическим снимкам, а разработанная классификационная схема динамического состояния позволяет прогнозировать их сукцессионную продуктивность и уровень численности животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Верхне-Вычегодская экспедиция (1930–1931): Краткий отчет Верхне-Вычегодской экспедиции, работавшей в 1930–31 гг. под начальством С. В. Лобачева / Под общ. ред. проф. Б. М. Житкова М.: Центр. тип. НКВМ им. Клина Ворошилова, 1932. 384 с. – (Тр. Север. методол. охотустроит. экспедиции; Вып. 1).

Владышевский Д. В. Экология лесных птиц и зверей (кормодобывание и его биоценотическое значение). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 264 с.

Данилов Д. Н. Охотничьи угодья СССР: Промысловая оценка и устройство угодий. М.: Изд-во Центросоюза, 1960. 284 с.

Данилов Д. Н. Инвентаризация охотничьих угодий // Основы охотустройства / Под. ред. Д. Н. Данилова. М.: Лесн. пром-сть, 1966. С. 20–79.

Ельский Г. М., Шишкин А. С. Оценка охотугодий с использованием микрофотометрирования аэроснимков // Иссл. Земли из космоса. 1985. № 4. С. 58–64.

Клюшев А. Г. Охотничье хозяйство: учебник. Иркутск: Иркут. гос. с.-х. акад., 2003. 512 с.

Козлов В. М. Типология охотничьих угодий с основами охотустройства: учеб. пособ. СПб.: Лань, 2015. 256 с.

Козловский А. А. Лесные охотничьи угодья. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 159 с.

Красный Н. М. Хозяйственная оценка охотничьих угодий // Пути интенсификации охотничьего хозяйства Восточной Сибири: Материалы конф. Иркутск: Иркут. обл. науч.-тех. об-во сел. хоз-ва, 1965. С. 80–89.

Кузякин В. А. Охотничья таксация. М.: Лесн. пром-сть 1979. 199 с.

Леонтьев Д. Ф. Охотничьи угодья: учеб. пособ. СПб.: Лань, 2013. 224 с.

Линейцев С. Н. Принципы организации территории охотничьих угодий в охотхозяйственных предприятиях таежной зоны: автореф. дис. ... канд. с.-х. н.: 06.0203. Иркутск: Иркут. с.-х. ин-т, 1973. 25 с.

Линейцев С. Н., Рассолов А. Г. Оптимизация охотхозяйственного природопользования таежной зоны Сибири. Абакан: Кооп Журналист, 2001. 88 с.

Мартынов Е. Н., Масайтис В. В., Гороховников А. В. Охотничье дело. Охотоведение и охотничье хозяйство: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2022. 464 с.

Русанов Я. С. Основы охотоведения: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1986. 160 с.

Скалон В. Н., Скалон Н. Н. Практические рекомендации по организации охотничьего хозяйства в Сибири. Иркутск, 1958. 50 с.

Соболиный промысел на северо-восточном побережье Байкала: Материалы Баргузинской экспедиции Г. Г. Дупельмайра, 1914–1915 гг. Л.: Госплан Бурят-Монгол. АССР, 1926. 272 с.

Соколов Г. А. Принципы типологии лесных охотничьих угодий // Вопросы лесоведения. Сб. ст. / Отв. ред. акад. А. Б. Жуков. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1970. С. 211–223.

Сорокина Л. И. Типы местообитаний промысловых животных в географическом аспекте // Естественная производительность и продуктивность охотничьих угодий СССР: Материалы Всесоюз. науч.-произв. конф. / Под ред. В. Ф. Гаврина. Киров: Всесоюз. НИИ животн. сырья и пушнины, 1969. Ч. 1. С. 101–103.

Харченко Н. А., Артюховский А. К., Сухорослов М. С. Биология лесных птиц и зверей с основами охотоведения: учеб. для вузов. по спец. «Лесн. и садово-парковое хоз-во». М.: Экология, 1993. 399 с.

Хлебников А. И. Экология соболя Западного Саяна. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 125 с.

Хлебников А. И., Гриценко В. И., Черкашин В. П. Методические рекомендации использования аэрокосмических снимков для оценки лесных охотничьих угодий. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1988. 24 с.

Шило А. А. Экологические основы качественного анализа среды обитания промысловых животных // Естественная производительность и продуктивность охотничьих угодий СССР: Материалы Всесоюз. науч.-произв. конф. / Под ред. В. Ф. Гаврина. Ч. 1. Киров: Всесоюз. НИИ животн. сырья и пушнины, 1969. С. 88–91.

Шишкин А. С. Местообитания животных заповедника «Юганский» // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 1 (34). С. 149–159.

- Шишикин А. С. Ландшафтно-экологическая организация местообитаний лесных охотничьих животных в Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2006. 43 с.
- Шишикин А. С. Организаций исследований техногенных территорий // Сиб. лесн. журн. 2016. № 2. С. 102–119.
- Шишикин А. С., Данилин И. М. Паспортизация охотничьих угодий административных районов (на примере Курагинского района Красноярского края) // Лесн. таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СибГТУ, 1998. С. 264–281.
- Юргенсон П. Б. Охотничьи звери и птицы (прикладная экология). М.: Лесн. пром-сть, 1968. 308 с.
- Юргенсон П. Б. Биологические основы охотничьего хозяйства в лесах. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 173 с.

TPOLOGY OF FOREST HUNTING GROUNDS

A. G. Rassolov, A. S. Shishikin

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: agrassolov.net@gmail.com, shishikin@ksc.krasn.ru

The analysis of the developed classification schemes of forest hunting grounds is given. Previously, forest typology was taken as a basis with a 4-level division (category-class-group of types-type). The authors adhere to this scheme, but give environment-forming arguments and criteria for their selection. An analysis of the main literature on the classification of forest hunting grounds shows the evolution of the classification of natural resources from the use of available information (forest planning materials) to the specific assessment of productivity displayed on satellite images. Any thematic interpretation of the natural basis does not correspond to the tasks of hunting management. Animals are mobile, and the forest environment is dynamic, so the classification of hunting grounds should take into account the spatial and successional factors in the formation of habitat conditions. The proposed scheme takes into account at the level of the range the action of climatic (zonal, altitudinal-zone), population-ecological (forage, protective and nesting) and population dynamics-succession (dynamics of stands) factors. When hunting planning, the already available materials of forest planning and former hunting planning are taken into account, but the thematic interpretation of the original information must be also considered. A direct interpretation of the ecological properties of the image of hunting grounds from satellite images is proposed, and the developed classification scheme of the dynamic state makes it possible to predict their successional productivity and the level of animal abundance. Therefore, one should focus on obtaining direct information about hunting grounds using high-resolution satellite imagery.

Keywords: *forest typology, group classes, class, group types, type, satellite photography.*

How to cite: Rassolov A. G., Shishikin A. S. Typology of forest hunting grounds // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 3–11 (in Russian with English abstract and references).

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 630.43+630.221+630*114.6 (571.51)

ВЛИЯНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ БИОУДОБРЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ПОЧВЫ И ПОДРОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПОСЛЕ РУБОК И ПОЖАРА

Г. И. Антонов, В. А. Сенашова, Г. Г. Полякова, Н. В. Пашенова,
С. В. Жила, И. Д. Гродницкая

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

E-mail: egoan@yandex.ru, vera0612@mail.ru, ggpolyakova@mail.ru, pasnat@ksc.krasn.ru,
getgain@mail.ru, igrod@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

Сохранение целостности лесов после рубок и пожаров предполагает разработку различных методов содействия естественному лесовосстановлению, к которым относится создание экологически чистых и безопасных биоудобрений на основе отходов лесопромышленного комплекса. Использование инновационного биоудобрения в Погорельском бору Красноярской лесостепи положительным образом повлияло на биопотенциал почвы и количество подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) после выборочных рубок. В первые 2 года во всех опытных вариантах отмечено увеличение активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов почвы в 1.5–2 раза по сравнению с контролем. Сразу после внесения биоудобрения в почвенном микробном комплексе возросло количество целлюлозолитиков до 62 тыс. КОЕ/г почвы на участках Пасеки. К концу вегетационного периода как в первый, так и во второй год применения биоудобрения в опытном варианте Пасеки всходов сосны обыкновенной было зарегистрировано в 2–3 раза больше, чем в контрольном. Пожар в мае 2022 г. привел к увеличению общей численности микроорганизмов до 38 млн КОЕ/г почвы и повышению активности ряда гидролитических ферментов в течение вегетационного периода на опытных участках с применением биоудобрения. В конце вегетационного периода 2022 г. наблюдалось отсутствие отклика микроорганизмов на внесение биоудобрения, а в почвенном микробном комплексе преобладали актиномицеты. Также к сентябрю этого года снизились целлюлозоразлагающий потенциал, гумификация и активность гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов (более чем в 2 раза). Биоудобрение существенно стимулировало образование всходов и подроста сосны на послепожарных территориях технологических участков рубки (Пасеке и Волоке) в 2 раза.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., лесовозобновление, опилочно-почвенный субстрат, микопродукт, ферментативная активность, дереворазрушающие базидиомицеты.

DOI: 10.15372/SJFS20230402

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы переработки отходов лесного хозяйства и лесовосстановления после вырубок разного типа в Красноярском крае стоят довольно остро. В рамках государственной программы «Развитие лесного хозяйства» им уделяется осо-

бое внимание. Согласно Постановлению Правительства Красноярского края от 30.09.2013 № 513-п (2013), площади лесовосстановления путем проведения работ по созданию лесных культур сократились на 50 %, а путем проведения мер содействия естественному возобновлению леса – увеличились на 13 %. Смещение

в сторону естественного возобновления вызвано проведением рубок лесных насаждений на территориях с преобладающим типом лесов, для которых характерно естественное восстановление. В настоящее время сохранность лесных культур в целом по Красноярскому краю составляет 91.1 %, приживаемость культур в первый год учета – 87.3 %, в третий – 81.6 %, в пятый – 78.6 %. При этом площадь списания за последние 5 лет увеличилась в 2 раза (с 0.7 тыс. до 1.4 тыс. га). Основная причина списания лесных культур – лесные пожары (более 37.7 %).

В течение нескольких лет сотрудниками лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) ведутся работы по созданию эффективных биоудобрений на основе отходов лесопромышленного комплекса, поддержанию плодородия истощенных почв лесных питомников, повышению иммунитета хвойных пород (Полякова, 2012; Антонов и др., 2019). Показано, что внесение биоудобрений в почву питомника под саженцы хвойных увеличило скорость их роста и развития, а также поддерживало биогенность почвы на протяжении 3–4 лет. В настоящее время проводятся исследования возможности использования биоудобрений на основе опилочно-почвенных субстратов с микопродуктом и мочевиной ($\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$) – ОПСМ+М, для стимуляции естественного лесовозобновления в сосновых вырубках Красноярской лесостепи. Микопродукт был создан путем разложения опилок культурой базидиомицета траметеса разноцветного (*Trametes versicolor* (L.) Lloyd) и показал свою эффективность для стимуляции искусственного лесовозобновления в опытном питомнике Погорельского экспериментального хозяйства ИЛ СО РАН (Пашенова и др., 2009; Антонов и др., 2021).

В ходе исследовательских работ по почвенной биоиндикации в сосняках Погорельского бора в 2011 г. выявлен различный уровень биологической активности почвы после опытных несплошных рубок (Антонов и др., 2014). Отмечено изменение характера почвенных биологических процессов после рубок разной интенсивности и различных способов очистки лесосек от порубочных остатков и прочих лесохозяйственных отходов. Переработка порубочных остатков в щепу аппаратом РМ-4 под сосняками разнотравно-зеленомошными способствовала ускорению разложения измельченной древесно-опилочной массы, скорейшей минерализации и появлению подроста на вырубках. Рекомендо-

вано дальнейшее использование удобрительных композиций на основе измельченных порубочных остатков и опилок, а также мульчирование почвы на технологических участках рубок.

На Красноярскую лесостепь приходится значительная часть пожаров Сибири. Лесной фонд данной территории характеризуется насаждениями пирогенного происхождения (Иванова и др., 2014). Систематическое пирогенное воздействие ведет к изреживанию древесной растительности и, как следствие, к формированию преимущественно разнотравных, бруснично-разнотравных или разнотравно-брусничных насаждений с существенно пониженной продуктивностью (Курбатский, Иванова, 1987). Структура и состав напочвенного покрова во многом зависят от изреживания древостоев и формирования их состава при рубках ухода. Вероятность возникновения горения напочвенного покрова зависит и от его запаса. Актуальной задачей в данных районах является определение путей снижения горимости лесов, в том числе за счет переработки отходов лесного хозяйства и лесовосстановления после вырубок разного типа.

Цель настоящего исследования – оценить эффективность применения инновационного биоудобрения (ОПСМ + М) на участках выборочных рубок до и после пожаров по ряду характеристик микробиологической активности почвы и количеству всходов и подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). В рамках поставленной цели решались следующие задачи: исследование ферментативной активности почвы и численных характеристик почвенного микробного сообщества, а также учет самосева на пробных площадях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В спелом сосняке разнотравно-зеленомошном в 2011 и 2017 гг. были выполнены два приема выборочных рубок. Суммарная интенсивность рубки по запасу составила 29 %. На технологических участках сосняка, поступившего в рубку (Волок и Пасека) в 2020 г. были заложены по 6 экспериментальных площадок – 3 контрольных (К) и 3 опытных (О). На опытные площадки было внесено по 50 кг биоудобрения (ОПСМ + М). Также были заложены подобные 6 экспериментальных площадок – 3 контрольных (К) и 3 опытных (О) – в нетронutom рубкой сосняке, который далее служил фоном (Фон) (рис. 1, а).



Рис. 1. Внешний вид экспериментальных участков в Погорельском бору.

a – при применении биоудобрения (ОПСМ + М); *б* – после пожара 7 мая 2022 г.; *в* – после внесения ОПСМ + М, 14 мая 2022 г.

Каждую пробную площадку с помощью реек делили на квадраты размером 0.5×0.5 м. На каждом квадрате подсчитывали число всходов сосны текущего года и самосева предыдущих лет (суммарное количество 1–3-летнего самосева). Число квадратов в каждом варианте опыта (объем выборки) варьировало от 16 до 48. Учеты количества всходов и самосева проводили в начале опыта (20 мая 2020 г.) и в разные периоды сезонов вегетации 2020–2022 гг. В мае 2022 г. в сосняке Погорельского бора прошел пожар высокой интенсивности. Все экспериментальные участки пострадали в разной степени. Вследствие пожара были повреждены деревья и почвенный покров.

На экспериментальных участках выгорела вся подстилка с внесенным ранее биоудобрением (ОПСМ + М), также погиб весь подрост сосны, стволы сосен прогорели на высоту 6–15 м (рис. 1, б).

На участках с биоудобрением (ОПСМ + М) глубина прогара подстилки, как правило, выше, что, по-видимому, связано с присутствием неразложившихся опилок в составе биоудобрения. В этой связи на сгоревшие опытные участки снова вносили биоудобрение (ОПСМ + М) в прежнем количестве. Были заложены следующие варианты: Фон (К и О), Пасека (К и О) и Волок (К и О). В каждом варианте было по три повторности (рис. 1, в). В течение эксперимента (2020–2022 гг.) при применении биоудобрения (ОПСМ + М) образцы почвы на экспериментальных участках были исследованы на общую биологическую активность: ферментативную активность, общую численность микроорганизмов (ОЧМ) и соотношение таксономических групп микроорганизмов. Для оценки запасов напочвенных лесных горючих материалов на экспериментальных участках применяли общепринятую методику учета горючих материалов (Жила, 2013), согласно которой на каждом экспериментальном участке закладывали по две площадки 25×20 см, а также одну площадку на контроле, всего их было 7. На площадках собирали живой напочвенный покров (травы и кустарнички), опад, который включал такие фракции, как хвоя, кора, шишки, веточки, листья и ветошь, сохранившие свою структуру. На углах заложенной площадки измеряли толщину слоя лесных горючих материалов, а также отдельно учитывали толщину мха. Образцы напочвенных горючих материалов сушили в лабораторных условиях с использованием сушильных шкафов, после чего определяли массу в абсолютно сухом

состоянии. Прогоревшую почву (2022 г.) на микробиологические и ферментативные анализы отбирали через 7 дней после пожара, затем вносили биоудобрение ОПСМ + М. Последующий отбор почвенных образцов проводили в июле и сентябре. Кроме того, в образцах почвы исследуемых участков стандартными методами определяли влажность почвы весовым методом (ГОСТ 28268-89, 1989) и pH (портативным потенциометром Аквилон 410), во время отбора образцов измеряли температуру приземного слоя воздуха (на поверхности почвенного покрова) и почвы (слой 0–10 см), с помощью портативного термометра Hanna Checktemp.

Ферментативную активность почвы определяли методами А. Ш. Галстяна и Т. А. Щербакковой (Хазиев, 2005), активность гидролитических ферментов (протеазы, уреазы, фосфатазы, инвертазы) – с использованием фотоэлектродетектора КФК-3 при компостировании в термостате с температурой 30–38 °С и экспозиции до 24 ч, активность ферментов окислительно-восстановительной группы (пероксидазы и полифенолоксидазы – ПО и ПФО) – колориметрическими методами с предварительным полчасовым компостированием. Единицы измерения ферментативной активности: для протеазы – мг глицина/г почвы; уреазы – мг $N-NH_4$ /г почвы; инвертазы – мг глюкозы/г почвы; фосфатазы – мг P_2O_5 /г почвы; пероксидазы и фенолоксидазы – мг 1,4-бензохинона/г почвы (далее мг/г почвы). По соотношению показателей активности полифенолоксидазы к пероксидазе рассчитывали коэффициент гумификации, характеризующий минерализацию гумуса либо его новообразование (Сулейманов, Шорина, 2012). Целлюлозоразлагающую активность почв измеряли с использованием аппликационных методов (Гаврилова, Герасимова, 2019).

Оценку общей (суммарной) численности и соотношения таксономических групп почвенных микроорганизмов проводили классическими методами (Методы..., 1991; Практикум..., 2005). Для выявления общей численности культивируемых микроорганизмов готовили почвенную суспензию разведения $1 : 10^3$, затем проводили посев на агаризированные питательные среды по 0.05 мл в чашку Петри. Использовали крахмало-аммиачный (КАА), мясопептонный (МПА) и почвенный (ПА) агары, а для выявления грибов – агаризованное неохмеленное пивное сусло (СА). Микроорганизмы культивировали при температуре 25 °С. Колонии бактерий учитывали на 3–5-е сутки, актиномицетов и

грибов – на 7–10-е. Проведен количественный учет колоний неспоровых и споровых бактерий (в том числе актиномицетов), мицелиальных и дрожжевых грибов. Методом Т. Gregersen (1978) устанавливали грампринадлежность бактериальных форм. Численность целлюлолитических микроорганизмов определяли согласно ГОСТ Р 54653-2011 (2011) на среде Гетчинсона (Г) с использованием стерильных обеззоленных бумажных фильтров в качестве единственного источника целлюлозы.

Грибы идентифицировали с помощью справочной литературы (Barnet, Hunter, 1998; Watanabe, 2002) и микроскопирования клеток и колоний. При определении учитывали тип спороношения, строение плодовых тел, размер спор и характер их расположения. Микроскопирование клеток и колоний выполняли при увеличении $\times 1350$ (Olympus BX43 (Япония)).

Состояние самосева (количество всходов и самосева) учитывали в дату начала опыта (20 мая 2020 г.) и в разные периоды сезонов вегетации в 2020 и 2021 гг., а также в 2022 г. после пожара. На каждом участке отдельно учитывали число растений в четырех возрастных группах: 1) всходы (сосна первого года вегетации), 2) сеянцы однолетние (сосна второго года вегетации), 3) сеянцы двухлетние (сосна третьего года вегетации), 4) сеянцы трехлетние (сосна четвертого года вегетации).

Статистический анализ. Обработку результатов по ферментативной активности почв (корреляционно-регрессионный анализ) и численных характеристик микробного сообщества проводили с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007. Погрешности определяли по ошибке среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После рубок непременно изменяются световой и тепловой режимы, гидротермические условия, кислотность, под контролем которых находятся биологические свойства почвы, в том числе и энзимологическая активность (табл. 1).

После внесения удобрительной опилочно-почвенной смеси (ОПСМ + М) на поверхности почвы сохраняется тепло, оптимизируя температурный режим подстилок на пасеке и порубочных остатков на волоке. Как на контрольных, так и на опытных участках температура повысилась к сентябрю в среднем на 3–5 °С. Ко второму году исследований значения pH почвы участков

Таблица 1. Гидротермические характеристики и кислотность почвы в слое 0–10 см на экспериментальных участках в сосняке Погорельского бора

Время сезона	Показатель	Фон		Пасека		Волок	
		К	О	К	О	К	О
До внесения ОПСМ + М, май 2020 г.	$T, ^\circ\text{C}$	4.0	7.8	6.0	8.7	6.6	8.3
	pH	6.55	6.55	6.56	6.56	6.47	6.57
	Влажность, %	21.2	26.4	25.1	23.8	19.2	27.9
Сентябрь 2020 г.	$T, ^\circ\text{C}$	9.2	9.5	8.7	9.1	9.4	9.2
	pH	6.69	6.88	6.60	6.72	6.28	6.24
	Влажность, %	27.7	24.0	26.9	27.2	28.8	42.1
Июнь 2021 г.	$T, ^\circ\text{C}$	10.2	10.4	8.9	9.6	9.4	9.4
	pH	6.53	6.50	6.61	6.80	6.49	6.18
	Влажность, %	22.4	24.0	44.8	27.2	59.1	62.7
Сентябрь 2021 г.	$T, ^\circ\text{C}$	8.5	8.6	8.5	8.6	8.8	9.1
	pH	6.59	6.53	6.67	6.79	6.49	6.53
	Влажность, %	31.5	21.8	33.3	32.6	62.7	26.5
Май 2022 г.	$T, ^\circ\text{C}$	8.5	9.2	8.2	8.2	8.3	9.2
	pH	6.47	6.55	6.43	6.45	6.65	6.46
	Влажность, %	12.8	21.3	23.3	21.4	13.8	21.2
Июль 2022 г.	$T, ^\circ\text{C}$	14.8	15.7	15.9	15.7	15.1	14.9
	pH	6.94	6.92	7.04	6.81	6.91	6.74
	Влажность, %	16.3	16.2	12.9	26.1	15.6	20.5
Сентябрь 2022 г.	$T, ^\circ\text{C}$	9.5	9.6	9.5	9.4	10.1	9.9
	pH	6.30	6.49	6.53	6.35	6.49	6.56
	Влажность, %	34.3	27.4	24.9	32.7	16.3	44.6

возросли. Незначительное подщелачивание почвы также сопровождалось увеличением влажности почвы на волок (табл. 1). После пожара температура в течение сезона оставалась достаточно высокой с пиком в июле, до 15.7–15.9 °С. На участках с внесением ОПСМ + М температура была на 0.1–0.2° ниже, чем в контроле.

Ферментативная активность почвы экспериментальных участков. После внесения биоудобрения (ОПСМ + М) проводились наблюдения за биохимической активностью почвы (табл. 2).

Исследовалась активность окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов в верхнем, наиболее активном слое почвы экспериментальных участков (0–10 см). Разреживание полога, осветление и дополнительное поступление углерода в почву в виде порубочных остатков изменяли активность оксидаз и гидролаз. Внесение биоудобрения заметно увеличило активность уреазы и инвертазы к сентябрю как на Фоне, так и на технологических участках: уреазы – с 0.70–1.36 до 1.19–1.86 мг/г почвы, инвертазы – с 34–44 до 45–48 мг/г почвы (табл. 2).

Таблица 2. Ферментативная активность почвы на экспериментальных участках в 2020–2021 гг., мг/г почвы (приведена стандартная ошибка среднего)

Показатель	Фон	Пасека	Волок	Фон	Пасека	Волок
	Контроль			Внесение ОПСМ + М		
2020 г.						
До внесения ОПСМ + М						
Протеаза	0.95 ± 0.02	0.91 ± 0.07	0.96 ± 0.05	—	—	—
Уреаза	1.92 ± 0.07	1.76 ± 0.11	1.69 ± 0.12	—	—	—
Инвертаза	42.1 ± 3.55	43.3 ± 5.60	44.0 ± 3.20	—	—	—
Фенолоксидаза	0.14 ± 0.03	0.32 ± 0.09	0.14 ± 0.02	—	—	—
Пероксидаза	0.19 ± 0.05	0.16 ± 0.03	0.22 ± 0.09	—	—	—
Коэффициент гумификации	0.93 ± 0.45	1.96 ± 0.34	0.89 ± 0.37	—	—	—
После внесения ОПСМ + М						
Протеаза	1.06 ± 0.26	1.29 ± 0.41	1.20 ± 0.27	0.87 ± 0.10	0.84 ± 0.05	0.97 ± 0.10
Уреаза	0.70 ± 0.13	1.26 ± 0.20	1.36 ± 0.16	1.19 ± 0.29	1.36 ± 0.23	1.86 ± 0.31
Инвертаза	43.9 ± 2.18	34.4 ± 4.61	35.6 ± 2.50	46.6 ± 2.41	48.1 ± 1.74	44.8 ± 1.92
Фенолоксидаза	0.43 ± 0.04	0.31 ± 0.02	0.33 ± 0.05	0.29 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.32 ± 0.04
Пероксидаза	0.31 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.30 ± 0.03	0.31 ± 0.03	0.28 ± 0.02
Коэффициент гумификации	1.40 ± 0.17	1.23 ± 0.12	1.22 ± 0.13	1.01 ± 0.07	1.07 ± 0.08	1.16 ± 0.21
2021 г.						
Июнь						
Протеаза	0.44 ± 0.13	0.60 ± 0.09	0.56 ± 0.05	0.56 ± 0.16	0.29 ± 0.05	0.56 ± 0.16
Уреаза	1.77 ± 0.37	1.74 ± 0.13	1.77 ± 0.20	2.15 ± 0.26	1.44 ± 0.16	2.65 ± 0.05
Фосфатаза	1.30 ± 0.10	1.55 ± 0.07	1.65 ± 0.18	1.07 ± 0.03	1.16 ± 0.22	2.15 ± 0.50
Инвертаза	44.3 ± 0.18	41.6 ± 0.94	39.3 ± 2.48	55.6 ± 6.14	47.5 ± 8.43	48.0 ± 7.80
Фенолоксидаза	0.21 ± 0.01	0.55 ± 0.10	0.32 ± 0.08	0.41 ± 0.01	0.56 ± 0.10	0.70 ± 0.09
Пероксидаза	0.13 ± 0.01	0.34 ± 0.08	0.19 ± 0.05	0.22 ± 0.03	0.32 ± 0.04	0.43 ± 0.11
Коэффициент гумификации	1.60 ± 0.19	1.55 ± 0.13	2.29 ± 0.34	1.99 ± 0.22	1.73 ± 0.11	1.89 ± 0.40
Сентябрь						
Протеаза	1.40 ± 0.14	0.99 ± 0.03	0.87 ± 0.04	0.63 ± 0.03	1.17 ± 0.05	1.05 ± 0.08
Уреаза	1.38 ± 0.33	1.66 ± 0.08	1.54 ± 0.33	1.31 ± 0.25	1.49 ± 0.15	1.21 ± 0.20
Фосфатаза	2.29 ± 0.23	1.59 ± 0.27	1.70 ± 0.04	2.27 ± 0.27	2.37 ± 0.45	3.93 ± 0.60
Инвертаза	33.2 ± 5.59	26.2 ± 4.68	46.6 ± 10.33	65.5 ± 2.60	25.6 ± 5.81	41.2 ± 11.07
Фенолоксидаза	0.56 ± 0.03	0.48 ± 0.08	0.39 ± 0.12	0.31 ± 0.04	0.42 ± 0.04	0.55 ± 0.04
Пероксидаза	0.62 ± 0.07	0.62 ± 0.15	0.53 ± 0.20	0.41 ± 0.04	0.67 ± 0.16	0.90 ± 0.18
Коэффициент гумификации	0.91 ± 0.07	0.81 ± 0.06	0.81 ± 0.15	0.75 ± 0.06	0.81 ± 0.28	0.72 ± 0.21

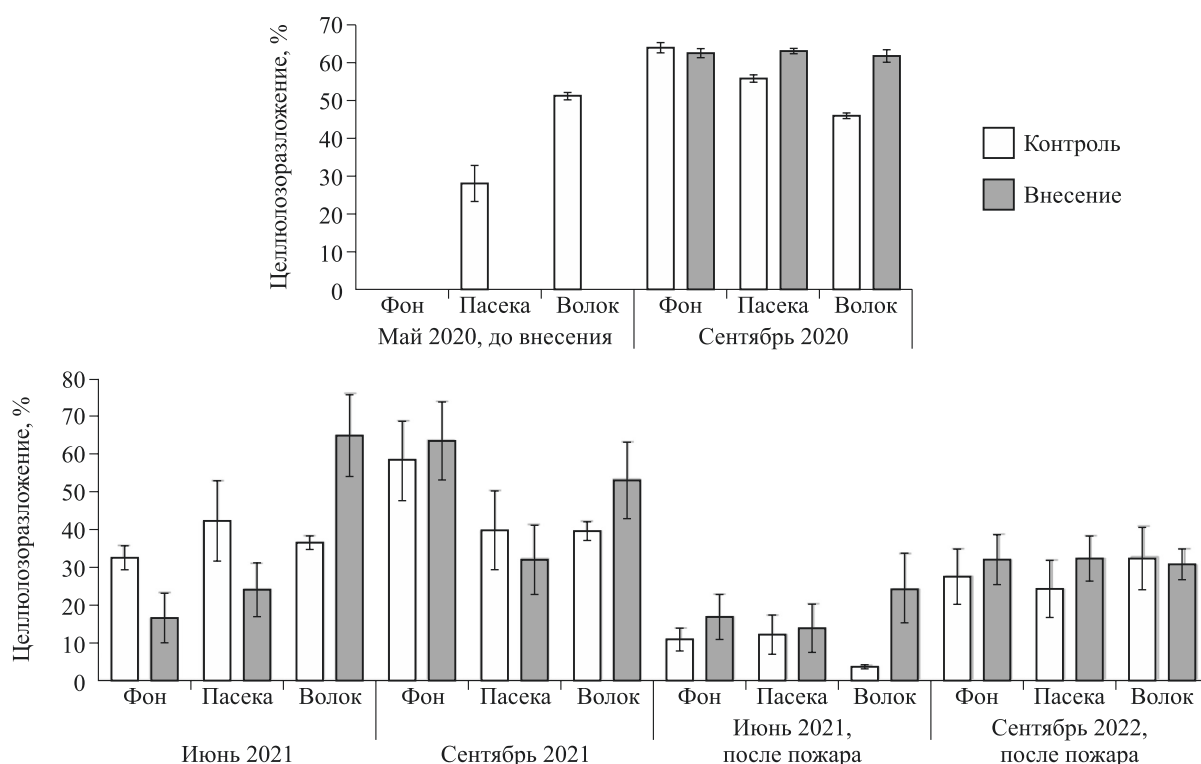


Рис. 2. Способность почвенной микрофлоры к целлюлозоразложению в слое 0–10 см ($n = 3$) на экспериментальных участках Погорельского бора (2020–2022 гг.).

В целом по имеющимся шкалам (Звягинцев, 1978; Гапонюк, Малахов, 1985) энзимологическую активность в верхнем слое почвы исследуемых участков можно считать низкой, а активность гидролитических ферментов была как на восстанавливающихся вырубках с низкой интенсивностью (Фахрутдинов, Ямпольская, 2015). В 2021 г. на участках внесения биоудобрения в июне наблюдалось небольшое повышение активности инвертазы (с 39–44 до 47–55 мг/г почвы), однако в сентябре наибольшее повышение ферментативной активности на технологических участках наблюдали на примере фосфатазы (с 1.6–1.7 до 2.4–3.9 мг/г почвы) (табл. 2).

Способность почвенной микробиоты к целлюлозоразложению до внесения биоудобрения на Волоке в среднем была 51%, на Фоном участке – немного ниже – 47 % и самой низкой – на Пасеке – 28 % (рис. 2). После внесения биоудобрений к концу вегетационного периода достоверное увеличение целлюлозоразлагающего потенциала микробиоты отмечено на Пасеке и Волоке на 8 и 16 % соответственно относительно контроля.

Возможно, это связано с совокупным влиянием как биоудобрения, так и дополнительным осветлением после рубок.

В июне 2021 г. потенциальная целлюлозоразлагающая активность почвы достигала 42 %,

но положительное действие удобрений наблюдалось только на Волоке, где целлюлозоразлагающий потенциал составил 65 %, что на 29 % выше, чем в контроле. К сентябрю биоудобрение положительное действие оказывало на целлюлозоразлагающий потенциал почвенной микробиоты на Волоке (53 %), что выше на 14 % на аналогичных участках без внесения. На пасеке способность к целлюлозоразложению продолжала тренд к снижению и составляла 32 % (рис. 2).

Активность фенолоксидаз была примерно одинаковой в начале и в конце сезона, но коэффициент гумификации – выше в июне на всех участках, так как в сентябре повышается активность пероксидазы (до 0.4–0.9 мг/г почвы), скорей всего по причине поступления дополнительного количества опада в течение сезона (табл. 2).

После применения биоудобрения повышается зависимость от температуры у полифенолоксидаз (возрастание коэффициента детерминации R^2 с 0.35 до 0.68) и уреазы (с 0.29 до 0.63), причем в последнем случае зависимость описывается логарифмом. Прочнее становится зависимость от влажности, описываемая в основном полиномиальными уравнениями, за исключением полифенолоксидазы ($R^2 = 0.56$ после внесения ОПСМ + М). У уреазы она также повышается после применения биоудобрения (R^2 с 0.01 до

Таблица 3. Пирологические характеристики экспериментальных участков через 2 нед после пожара в мае 2022 г.

Участок	Вариант, ОПСМ + М	Температура, °С		Мощность слоя подстилки	Глубина прогорания подстилки	Высота нагара, м	Запас лесных горючих материалов, т/га
		воздуха	почвы				
Фон	Без внесения Внесение	27.0	8.4	0.6	1.5	min 8, max 15	2.79
		27.2	9.1	0.3	1.6		2.75
Пасека	Без внесения Внесение	26.9	10.8	0.7	2.0	min 6, max 8	3.04
		26.7	8.0	0.6	2.3		4.93
Волок	Без внесения Внесение	26.6	15.7	0.5	0.5	min 2, max 10	2.53
		26.3	8.3	0.3	1.6		1.76
Контроль		27.5	12.0	0.5	Не горело		6.01

0.67). Незначительно повышается зависимость активности протеазы и целлюлозоразлагающей способности от влажности ($R^2 = 0.27$ и $R^2 = 0.40$ соответственно). На экспериментальных участках после пирогенного воздействия выявлено снижение запаса лесных горючих материалов до 50 % от допожарных значений. Так, послепожарный запас составил на Волоке от 1.76 до 2.53 т/га, при этом глубина прогорания доходила до 1.6 см. На Пасеке данный показатель варьировал от 3.04 до 4.93 т/га, глубина прогорания составила более 2 см (табл. 3).

После пожара в мае 2022 г. заметно выше была активность лишь фосфатазы после внесения биоудобрения на всех участках (до 1.33–1.43 мг/г почвы) (табл. 4), несколько выше – протеазная активность на Волоке и на Фоновом участке (увеличилась с 0.23–0.28 до 0.32–0.43 мг/г почвы).

Активность инвертазы повысилась только на участке Фон (с 55.5 до 87.2 мг/г почвы).

Несмотря на низкую фенолоксидазную активность, коэффициент гумификации стал выше после внесения биоудобрения на технологических участках почти в 2 раза, и несколько ниже – на Фоне. Способность почвенной микробиоты к целлюлозоразложению после пожара на всех исследуемых участках заметно снизилась, примерно в 4–5 раз относительно предыдущего сезона и составила 3–12 %. Достоверные различия по активности целлюлозолитических ферментов на площадках с внесенным биоудобрением отмечены на Волоке – опытный показатель в 8 раз превышал контрольное значение. В конце вегетационного периода внесение биоудобрения увеличивало активность гидролитических ферментов на всех участках, за исключением Волока, где возрастает лишь активность протеазы (почти в 3 раза) (табл. 4). Причем происходит

это на фоне двукратного повышения активности фенолоксидазы и увеличения коэффициента гумификации до 0.96, что может свидетельствовать о разложении и минерализации доступного материала в биоудобрениях и реакциях поликонденсации гумусовых веществ в верхних органических горизонтах. Отмечена тенденция роста целлюлозоразлагающего потенциала к сентябрю (рис. 2). После пожара заметно снизились зависимости биохимических показателей в течение сезона от температуры, однако повысились от влажности в случае как инвертазы (R^2 с 0.24 до 0.85), так и фосфатазы, протеазы и полифенолоксидазы (R^2 с 0.10 до 0.87).

Микробиологическая активность почвы экспериментальных участков. Микробиологические анализы почвы экспериментальных участков показали, что изначально (до внесения ОПСМ+М) численность микроорганизмов не различалась между участками и колебалась в пределах 3.08–3.48 млн КОЕ/г почвы. В микробное сообщество входили неспоровые и споровые бактерии (в том числе актиномицеты) и грибы. В сентябре 2020 г. в контрольных вариантах эксперимента отмечено достоверное увеличение ОЧМ по сравнению с началом года (рис. 3).

Внесение ОПСМ + М не оказало достоверного воздействия на суммарную численность почвенных микроорганизмов, но вызвало увеличение доли грибов на 4–8 %.

К концу второго года исследования в опытных вариантах участков Волок и Пасека отмечено достоверное увеличение численности по сравнению с контрольными значениями в 1.5 и 2.9 раза соответственно (рис. 3). На участках Фон К и О не выявлено достоверных различий по ОЧМ, но вариант с внесением ОПСМ + М характеризуется меньшей долей грибов (в 1.7 раз) и снижением доли актиномицетов.

Таблица 4. Ферментативная активность на участках рубок с внесением биоудобрения после пожара в 2022 г., мг/г почвы (приведена стандартная ошибка среднего)

Месяц	Показатель	Контроль			Внесение ОПСМ + М		
		Фон	Пасека	Волок	Фон	Пасека	Волок
Май	Гидролазы						
	Протеаза	0.24 ± 0.03	0.31 ± 0.01	0.28 ± 0.09	0.32 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.43 ± 0.07
	Уреаза	1.84 ± 0.30	2.94 ± 0.77	3.22 ± 0.91	1.95 ± 0.13	2.60 ± 0.17	2.11 ± 0.33
	Фосфатаза	1.13 ± 0.19	0.92 ± 0.07	1.03 ± 0.17	1.43 ± 0.01	1.33 ± 0.15	1.35 ± 0.32
	Инвертаза	55.52 ± 6.23	64.63 ± 11.53	80.14 ± 10.52	87.24 ± 12.65	63.86 ± 21.14	69.00 ± 6.17
	Оксидазы						
	Фенолоксидаза	0.09 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.13 ± 0.05	0.31 ± 0.04	0.22 ± 0.02	0.22 ± 0.02
	Пероксидаза	0.17 ± 0.03	0.22 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.22 ± 0.03	0.18 ± 0.02	0.29 ± 0.07
	Коэффициент гумификации	0.52 ± 0.06	1.14 ± 0.23	1.11 ± 0.19	1.44 ± 0.15	1.28 ± 0.30	0.97 ± 0.34
Июль	Гидролазы						
	Протеаза	0.40 ± 0.04	0.38 ± 0.01	0.56 ± 0.12	0.49 ± 0.03	0.39 ± 0.03	0.61 ± 0.04
	Уреаза	1.49 ± 0.27	2.57 ± 0.41	2.31 ± 0.47	2.84 ± 0.39	2.10 ± 0.63	1.66 ± 0.35
	Фосфатаза	1.69 ± 0.23	1.00 ± 0.06	1.26 ± 0.09	1.87 ± 0.14	1.58 ± 0.14	1.65 ± 0.24
	Инвертаза	65.28 ± 9.63	68.87 ± 8.62	77.13 ± 3.97	90.36 ± 4.42	81.71 ± 5.04	76.96 ± 4.07
	Оксидазы						
	Фенолоксидаза	0.17 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.21 ± 0.05	0.29 ± 0.04	0.30 ± 0.02	0.27 ± 0.04
	Пероксидаза	0.28 ± 0.05	0.79 ± 0.17	0.90 ± 0.14	0.66 ± 0.15	0.35 ± 0.07	0.63 ± 0.17
	Коэффициент гумификации	0.65 ± 0.11	0.50 ± 0.16	0.23 ± 0.04	0.50 ± 0.14	0.90 ± 0.23	0.50 ± 0.17
Сентябрь	Гидролазы						
	Протеаза	0.27 ± 0.04	0.58 ± 0.04	0.34 ± 0.02	0.64 ± 0.06	0.53 ± 0.19	0.96 ± 0.06
	Уреаза	2.13 ± 0.33	2.65 ± 0.01	4.21 ± 0.31	3.39 ± 0.61	2.66 ± 0.57	3.24 ± 0.64
	Фосфатаза	1.38 ± 0.12	1.08 ± 0.09	1.40 ± 0.19	1.65 ± 0.17	1.28 ± 0.24	1.08 ± 0.20
	Инвертаза	27.73 ± 1.44	30.22 ± 9.65	26.53 ± 2.28	46.16 ± 1.57	40.00 ± 0.93	27.26 ± 2.70
	Оксидазы						
	Фенолоксидаза	0.37 ± 0.06	0.32 ± 0.01	0.26 ± 0.13	0.36 ± 0.06	0.38 ± 0.02	0.54 ± 0.13
	Пероксидаза	0.56 ± 0.07	1.28 ± 0.17	0.60 ± 0.06	0.94 ± 0.20	0.82 ± 0.10	0.69 ± 0.13
	Коэффициент гумификации	0.71 ± 0.17	0.35 ± 0.15	0.43 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.48 ± 0.07	0.97 ± 0.19

В мае 2022 г. на экспериментальных участках сосняков Погорельского бора прошел пожар, последствия которого сказались на почвенном микробоценозе. Суммарная численность микроорганизмов в почве экспериментальных участков находилась в пределах 8.5–39.06 млн КОЕ/г почвы, при этом максимальные значения ОЧМ отмечены в вариантах Пасека О и Фон К (рис. 3).

Пожар обусловил поступление пирогенного углерода в почву, что способствовало росту численности микроорганизмов-карботрофов, относящихся к различным таксономическим группам. Среди почвенного микробного сообщества доминировали неспоровые бактерии, численность которых достигала 37.2 млн КОЕ/г почвы, а доля от общего числа микроорганизмов – 96 % (табл. 5). По сравнению с сентябрем 2021 г. во

всех вариантах отмечен рост численности спорообразующих бактерий (без учета актиномицетов), их численность находилась в пределах 0.58–4.09 млн КОЕ/г почвы. Все почвенные образцы характеризовались относительно невысокой численностью грибов, которая колебалась от 0.23 до 1.29 млн ОЕ/г почвы (табл. 5).

Грибные организмы были представлены дрожжевыми и гифальными формами. Представители рода *пеницилл* (*Penicillium* Link) доминировали в вариантах Волок К (10.78 %), Фон К (23.46 %) и О (18.56 %). На участке Волок О преобладали микромицеты рода *триходерма* (*Trichoderma* Pers.) (49.26 %). На участке Пасека доминировали представители отдела *зигомикота* (*Zygomycota* Moreau): в контроле – *Umbelopsis* Amos & H. L. Barnett (14.87 %), в опыте – *мукор* (*Mucor* Fresen.) (18.24 %).

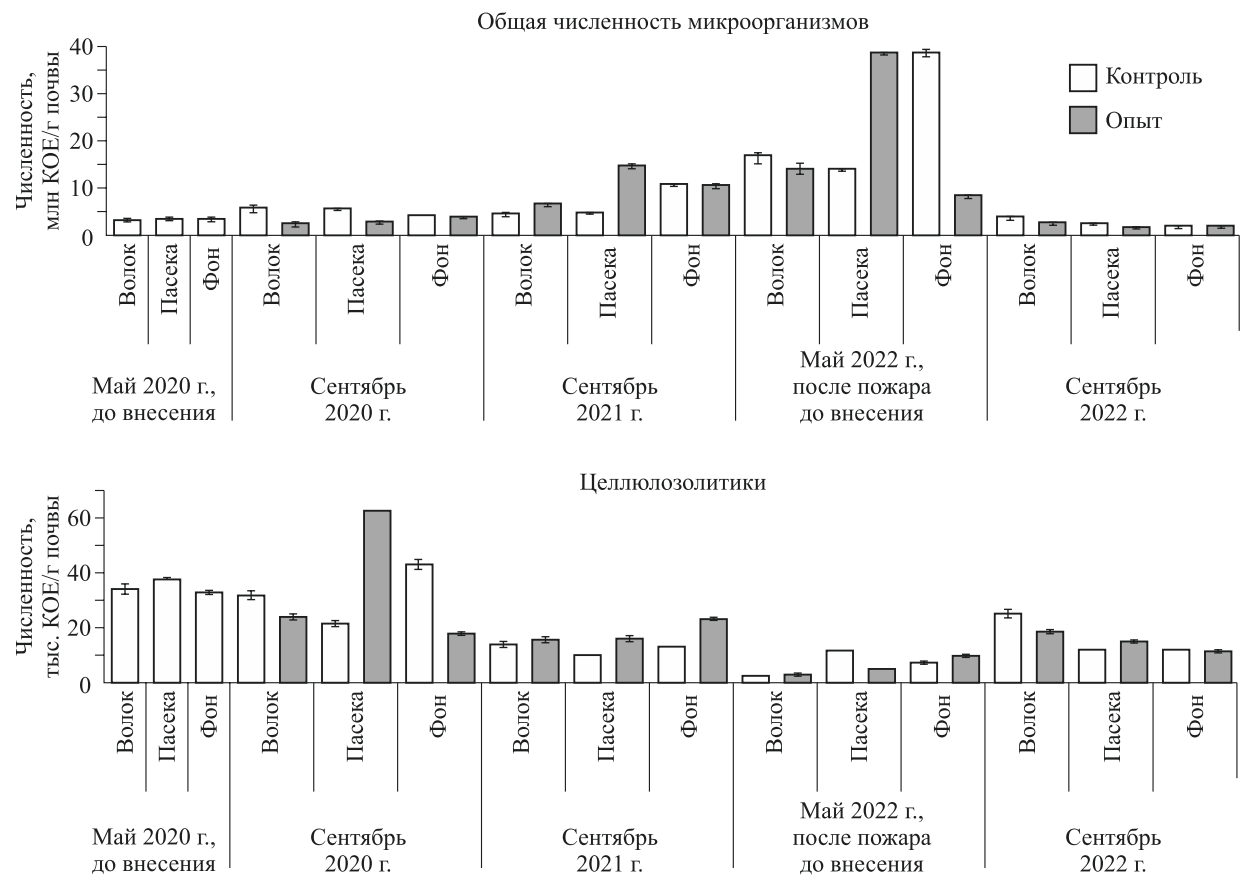


Рис. 3. Общая численность микроорганизмов и целлюлозолитических микроорганизмов на экспериментальных участках Погорельского бора (2020–2022 гг.).

Таблица 5. Соотношение (%) таксономических групп почвенных микроорганизмов на экспериментальных участках сосняка Погорельского бора (2020–2022 гг.) до и после внесения биоудобрения

Группа микроорганизмов	2020 г.									2021 г., сентябрь					
	Май (до внесения ОПСМ + М)			Сентябрь											
	Волок	Пасека	Фон	Волок		Пасека		Фон		Волок		Пасека		Фон	
				К	О	К	О	К	О	К	О	К	О	К	О
Споровые бактерии	9.2	14.5	12.7	6.6	5.6	6.1	3.4	6.4	4.5	22.0	25.2	42.2	2.0	2.4	2.5
Актиномицеты	16.8	16.5	19.6	11.9	18.7	27.4	15.8	18.4	12.3	25.7	5.2	21.1	4.8	9.1	11.4
Неспоровые бактерии	61.4	55.8	57.7	73.0	59.1	54.6	60.6	35.4	65.1	40.2	61.1	25.2	84.0	80.8	81.6
Грибы	12.7	13.2	10.0	8.5	16.5	11.9	20.2	39.8	18.1	12.1	8.5	11.5	9.2	7.7	4.5
2022 г.															
	Май (после пожара, до внесения ОПСМ + М)							Сентябрь							
	Волок	Пасека	Фон	Волок		Пасека		Фон		Волок		Пасека		Пасека К	
				К	О	К	О	К	О	К	О				
Споровые бактерии	24.3	14.4	25.7	1.5	1.5	20.6	13.2	20.3	13.5	12.1	15.0	11.6			
Актиномицеты	1.4	12.6	4.8	1.1	0.3	5.2	53.4	41.5	37.4	31.4	42.5	37.5			
Неспоровые бактерии	72.9	70.7	60.7	96.0	94.9	67.1	18.2	22.0	22.5	24.7	14.9	37.1			
Грибы	1.4	2.3	8.8	1.4	3.3	7.2	15.2	16.3	26.5	31.8	27.7	13.8			

В сентябре 2022 г. отмечено снижение общей численности почвенных микроорганизмов в 4–10 раз (рис. 3), при этом в большинстве случаев преобладали актиномицеты, их доля достигала 53 % (Волок К) (табл. 5).

Во всех вариантах отмечено увеличение доли грибов (в 3–14 раз) относительно начала сезона, при этом также отмечено снижение их видового разнообразия.

Постоянными обитателями почвенного микробиоценоза были микромицеты *Trichoderma* sp., *Penicillium* sp. и не идентифицированные представители отдела зигомикота. Также изучена численность микроорганизмов, обладающих целлюлолитической активностью (рис. 3).

Результаты микробиологических посевов показали, что изначально данный показатель находился в пределах 32.8–37.51 тыс. КОЕ/г почвы, при этом на участке Пасека количество целлюлолитиков (актиномицетов и грибов) было достоверно выше, чем на участке Фон. К сентябрю 2020 г. на участках Волок О и Фон О отмечено снижение численности целлюлолитиков на 9 и 15 тыс. КОЕ/г почвы соответственно относительно начала вегетации.

При этом в варианте Пасека О данный показатель превысил на 25.8 тыс. КОЕ/г почвы и составил 62.36 тыс. КОЕ/г почвы. Следует отметить, что на участках Пасека О и Фон О в сентябре помимо грибов и актиномицетов выделялись грамотрицательные бактерии, обладающие целлюлолитической активностью.

К сентябрю 2021 г. на всех участках с внесением ОПСМ + М отмечено повышение количества целлюлолитиков по сравнению с контрольными вариантами (рис. 3). Максимальное значение пришлось на участок Фон О и составило 23.06 тыс. КОЕ/г почвы. После пожара в мае численность целлюлолитических микроорганизмов упала до минимальных значений за весь период исследования и находилась в пределах 2.18–12.16 тыс. КОЕ/г почвы. Отмечено, что на разных участках доминировали различные таксономические группы. Так, на участках Волок К и О и Пасека К преобладали бактериальные формы (кроме актиномицетов), их доля составила 79; 39 и 57 % соответственно. В варианте Пасека О преобладали актиномицеты (51 %), на участках Фон К и Фон О – грибы (56 и 50 % соответственно).

В сентябре 2022 г. численность целлюлолитиков повысилась в 2–5 раз относительно послепожарных значений, но не достигла исходных данных 2020 г. (рис. 3). При этом бактерии

доминировали во всех контрольных вариантах, их доля достигла 53 % (Волок К). На участке Волок О преобладали актиномицеты (42 %), а Пасека О – грибы (51 %). В варианте Фон О актиномицеты и грибы занимали равные позиции, их доли составляли по 36 %.

Состояние самосева на экспериментальных участках. Учет самосева (1–3-летних) сосны обыкновенной показал неоднозначные результаты. В 2020–2021 гг. на экспериментальных участках сосняка отмечено положительное влияние биоудобрения на лесовозобновление по густоте всходов и подроста сосны. В течение 2 лет наблюдений отмечали более низкую густоту всходов на пасеке по сравнению с волоком (табл. 6). Возможно, это связано с недостаточной освещенностью под пологом сосны на Пасеке. На Волоке, где деревья были убраны при проведении выборочной рубки, световые условия были более благоприятны для всходов и самосева сосны, что сказалось на увеличении их количества.

Отмечено, что на Пасеке количество всходов и самосева в опытном варианте с внесением ОПСМ + М было достоверно больше, чем в контроле ($p < 0.05$), биоудобрение здесь стимулировало естественное лесовозобновление. На Волоке к концу сезона 2020 г. (сентябрь) стимулирующего эффекта не обнаружилось, количество всходов в контрольном варианте было выше, чем в опытном.

Однако на второй год наблюдений на Волоке количество всходов в начале сезона вегетации (июнь 2021 г.) в опытном варианте было существенно выше, чем в контроле. Такая же тенденция сохранилась и в сентябре 2021 г. К тому же подрост сосны по волокам было заметно больше, чем всходов, и это свидетельствует о том, что всходы сосны успешно перешли в категорию подроста на второй год после применения ОПСМ + М. Однако при пожаре 2022 г. весь самосев сгорел, и на участках никаких всходов не осталось (табл. 6).

После закладки новых участков с применением ОПСМ + М в июле и сентябре 2022 г. были зарегистрированы появившиеся всходы сосны как на опытных, так и на контрольных участках. Как показали наши результаты, естественное лесовозобновление на исследуемых участках после пожара было меньше, чем в допожарный период (на волоке в 6 раз относительно июльских наблюдений 2021 г.). При этом выявлено достоверное стимулирующее действие ОПСМ + М на всхожесть семян сосны как на Пасеке, так и на

Таблица 6. Учет всходов и подроста сосны на экспериментальных участках в сосняке Погорельского бора после рубок и пожара (2020–2022 гг.), шт./м² ($n = 9$)

Месяц	Категория самосева	Контроль			Опыт		
		Фон	Пасека	Волок	Фон	Пасека	Волок
2020 г.							
Июль	Всходы	10.1 ± 1.3 ^a	2.3 ± 0.5 ^a	22.9 ± 3.3 ^a	11.5 ± 1.3 ^a	6.2 ± 0.9 ^b	29.7 ± 3.5 ^a
	Подрост	0.7 ± 0.3	1.7 ± 0.6 ^a	19.3 ± 3.9 ^a	Не измеряли	1.3 ± 0.5 ^a	12.9 ± 3.4 ^a
Сентябрь	Всходы	14.7 ± 1.5 ^a	4.4 ± 0.7 ^a	30.2 ± 2.5 ^a	10.7 ± 1.7 ^b	10.2 ± 1.4 ^b	22.6 ± 1.7 ^b
	Подрост	0.4 ± 0.2	1.8 ± 0.5 ^a	18.0 ± 1.9 ^a	Не измеряли	1.4 ± 0.5 ^a	16.2 ± 2.0 ^a
2021 г.							
Июнь	Всходы	0 ^a	0.1 ± 0.08 ^a	0.5 ± 0.2 ^a	0.2 ± 0.09 ^a	0 ^a	2.1 ± 0.5 ^a
	Подрост	9.0 ± 1.2 ^a	3.5 ± 0.6 ^a	43.2 ± 2.9 ^a	7.9 ± 1.5 ^a	9.8 ± 1.4 ^b	33.4 ± 2.8 ^b
Сентябрь	Всходы	Не измеряли	3.2 ± 0.7 ^a	26.7 ± 2.9 ^a	Не измеряли	6.9 ± 1.1 ^b	31.5 ± 2.4 ^a
	Подрост	» »	3.1 ± 0.6 ^a	32.4 ± 2.5 ^a	» »	7.5 ± 1.2 ^b	34.7 ± 2.3 ^a
2022 г. (после пожара и повторного внесения ОПСМ + М)							
Июль	Всходы	4.75 ± 0.27 ^a	1.77 ± 0.13 ^a	3.25 ± 0.25 ^a	3.42 ± 0.18 ^b	3.14 ± 0.15 ^b	4.87 ± 0.20 ^b
	Подрост	Не обнаружено			Не обнаружено		
Сентябрь	Всходы	5.14 ± 0.28 ^a	2.00 ± 0.16 ^a	2.56 ± 0.25 ^a	3.52 ± 0.17 ^b	4.14 ± 0.21 ^b	5.48 ± 0.20 ^b
	Подрост	Не обнаружено			Не обнаружено		

Примечание. Одинаковыми индексами *a* и *b* отмечены варианты эксперимента (опыт, контроль) достоверно не различающиеся между собой ($p < 0.05$ по *t*-критерию) в Фоновом лесу, на Пасеке и на Волоке.

Волоке. Обращает на себя внимание, что после пожара всхожесть на Волоке и Пасеке перестала резко различаться. Так, в июле 2020 г. до пожара количество всходов на Волоке было в 5–10 раз больше, чем на Пасеке, а в июле 2022 г. после пожара – в 1.5–2 раза (табл. 6).

В опытных вариантах Волока и Пасеки зарегистрировано большее количество всходов по сравнению с контрольными, а на фоновых участках в лесу – большее количество всходов отмечено в контроле по сравнению с опытом (табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно полученным результатам, внесение в 2020 г. инновационного биоудобрения (ОПСМ + М) на экспериментальные участки (Пасека, Волок, Фон) сосняков Погорельского бора Красноярской лесостепи вызвало увеличение биологической активности почвы по сравнению с вариантами без внесения ОПСМ + М. Так, в первые 2 года показатели активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов почвы в 1.5–2 раза увеличивались по сравнению с контрольными вариантами. Биоудобрение оказало активизирующее воздействие на почвенную микробиоту всех опытных участков: к концу второго года исследования в отдельных вариантах отмечено достоверное

увеличение численности до 3 раз по сравнению с контрольными значениями. При этом внесение ОПСМ + М в подстилку стимулировало образование всходов сосны, повышало их сохранность на участках Пасеки и Волока.

Пожар в мае 2022 г. полностью уничтожил самосев/подрост сосны на всех экспериментальных участках. Вторичное внесение биоудобрения в пирогенно трансформированную почву способствовало появлению достоверно большего количества всходов в опытных вариантах Волока и Пасеки по сравнению с соответствующими контрольными участками. Наиболее показательные результаты получены при внесении ОПСМ + М на участки без порубочных остатков. Отмечено, что до пожара количество всходов на Волоке было в 6 раз выше, чем на Пасеке, а после пожара на Волоке и Пасеке существенной разницы не обнаружено.

Таким образом, проведенные исследования показывают целесообразность использования ОПСМ + М для активации естественного возобновления сосны обыкновенной после проведения выборочных рубок и пожара.

Работа выполнена в рамках государственного задания FWES 2021–0011 «Снижение рисков возрастающего воздействия болезней и вредителей на лесные экосистемы в условиях глобальных изменений окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов Г. И., Барченков А. П., Пашенова Н. В., Кондакова О. Э., Гродницкая И. Д. Влияние опилочно-почвенных субстратов на рост саженцев сосны и ели в лесопитомнике экспериментального хозяйства «Погорельский бор» // Лесоведение. 2021. № 3. С. 303–317.
- Антонов Г. И., Кондакова О. Э., Семенякин Д. А. Влияние несплошных рубок на почвенный микробный комплекс сосняков Красноярской лесостепи // Живые и биокосные системы. 2014. № 7. 18 с.
- Антонов Г. И., Пашенова Н. В., Гродницкая И. Д. Опилочно-почвенный субстрат для оптимизации плодородия почв. Патент на изобретение № 2681572 от 11.03.2019.
- Гаврилова В. И., Герасимова М. И. Целлюлозолитическая активность почв: методы измерения, факторы и эколого-географическая зависимость // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 23–27.
- Гапонюк Э. И., Малахов С. В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах: Тр. 4-го Всесоюз. совещ. Л.: Гидрометеониздат, 1985. С. 3–10.
- ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Утв. и введен в действие Пост. Гос. комитета СССР по стандартам от 27.09.89 № 2924. Дата введения 01.06.1990. М.: Госстандарт, 1989.
- ГОСТ Р 54653-2011. Удобрения органические. Методы микробиологического анализа. Утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 802-ст. Дата введения 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2011. 24 с.
- Жила С. В. Трансформация фитомассы в светлехвойных насаждениях Нижнего Приангарья под воздействием пожаров: дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2013. 190 с.
- Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
- Иванова Г. А., Конард С. Г., Макрае Д. Д. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири / Отв. ред. М. Д. Евдокименко. Новосибирск: Наука. 2014. 232 с.
- Курбатский Н. П., Иванова Г. А. Пожароопасность сосняков лесостепи и пути ее снижения. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1987. 111 с.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Асеева И. В., Бабьева И. П., Бызов Б. А., Гузев В. С., Добровольская Т. Г., Звягинцев Д. Г., Зенова Г. М., Кожевни П. А., Кураков А. В., Лысак Л. В., Марфенина О. Е., Мирчинк Т. Г., Полянская Л. М., Паников Н. С., Скворцова И. Н., Степанов А. Л., Ужаров М. М. / Под ред. Д. Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- Пашенова Н. В., Лоскутов С. Р., Пермьякова Г. В., Анискина А. А. Влияние отвара чистотела на биоконверсию сосновых опилок культурами базидиальных грибов-кислотрофов // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: Материалы IV Всерос. конф., Барнаул, 21–23 апр., 2009 г. В 2-х кн. / Под ред. Н. Г. Базарновой, В. И. Маркина. Барнаул: Алтай. гос. ун-т, 2009. Кн. 2. С. 39–41.
- Полякова Г. Г. Физиологические механизмы иммунитета хвойных на примере взаимодействия флоры ствола и офиостомовых грибов: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.01.05. Красноярск: СФУ, 2012. 31 с.
- Постановление Правительства Красноярского края от 30.09.2013 № 513-п «Об утверждении государственной программы Красноярского края «Развитие лесного хозяйства». Красноярск: Правительство Красноярского края, 2013.
- Практикум по микробиологии / Под ред. А. И. Нетрусова. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 608 с.
- Сулейманов Р. Р., Шорина Т. С. Влияние нефтяного загрязнения на динамику биохимических процессов чернозема обыкновенного (Оренбургская область) // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 240–243.
- Фахрутдинов А. И., Ямпольская Т. Д. Изменение отдельных микробных и биохимических показателей почв лесных вырубок ХМАО – Югры // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2015. Т. 17. № 6. С. 268–273.
- Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
- Barnet H. L., Hunter B. B. Illustrated genera of imperfect fungi. Fourth Ed. St. Paul, Minnesota: Amer. Phytopathol. Soc. Press, 1998. 218 p.
- Gregersen T. Rapid method for distinction of gram-negative from gram-positive bacteria // Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. 1978. V. 5. N. 2. P. 123–127.
- Watanabe T. Pictorial atlas of soil and seed fungi: Morphologies of cultured fungi and key to species. 2nd Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. 504 p.

INFLUENCE OF INNOVATIVE BIOFERTILIZERS ON SOIL BIOLOGICAL ACTIVITY AND UNDERGROWTH OF SCOTCH PINE AFTER FELLING AND FIRE

G. I. Antonov, V. A. Senashova, G. G. Polyakova, N. V. Pashenova,
S. V. Zhila, I. D. Grodnitskaya

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: egoan@yandex.ru, vera0612@mail.ru, ggpolyakova@mail.ru, pasnat@ksc.krasn.ru,
getgain@mail.ru, igrod@ksc.krasn.ru

Preserving the integrity of forests after logging and fires involves the development of various methods to promote natural reforestation. One of these methods is the creation of environmentally friendly and safe biofertilizers based on waste from the timber industry. The use of innovative biofertilizer in the Pogorelsky Bor (pine forest) of the Krasnoyarsk forest-steppe had a positive effect on the biopotential of soils and the amount of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) undergrowth after selective felling. In the first two years, in all experimental variants, an increase in the activity of hydrolytic and redox enzymes of the soil by 1.5–2 times was noted; they increased compared to the control. Immediately after the introduction of biofertilizer in the soil microbial complex, the amount of cellulolytics increases to 62 thousand CFU/g of soil in the logging areas. By the end of the growing season, both in the first and in the second year of application of biofertilizer in the experimental variant of the logging, sprouts of Scots pine were recorded 2–3 times more than in the control variant of this site. The fire that took place in May 2022 led to an increase in the total number of microorganisms up to 38 million CFU/g of soil and an increase in the activity of a number of hydrolytic enzymes during the growing season in experimental plots using biofertilizer. At the end of the growing season in 2022, there was no response of microorganisms to the application of biofertilizer, and actinomycetes dominated in the soil microbial complex. Also, by September of this year, the cellulose-decomposing potential, humification, and the activity of hydrolytic and redox enzymes decreased by more than 2 times. Biofertilizer significantly stimulated the formation of shoots and undergrowth of pine in the post-fire areas of the technological areas of felling (logging sites and portage) by 2 times.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., forest regeneration, sawdust-soil substrate, mycoproduct, enzymatic activity, wood-destroying basidiomycetes.

How to cite: Antonov G. I., Senashova V. A., Polyakova G. G., Pashenova N. V., Zhila S. V., Grodnitskaya I. D. Influence of innovative biofertilizers on soil biological activity and undergrowth of Scotch pine after felling and fire // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 12–25 (in Russian with English abstract and references).

UDC 581.151 (571.1/5)

ALTITUDINAL-BELT VARIABILITY OF EVAPOTRANSPIRATION OF FOREST ECOSYSTEMS IN THE MOUNTAINS OF SOUTHERN SIBERIA

T. A. Burenina¹, E. V. Fedotova¹, C. F. Zang²

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² South China Normal University
Zhongshan Blvd West, 49P2+J6R, Tianhe District, Guangzhou, Guangdong Province, 510631 Peoples' Republic of China

E-mail: burenina@ksc.krasn.ru, elfed@ksc.krasn.ru, chuanfuzang@163.com

Received 01.02.2023

This work is devoted to the study of evapotranspiration in the landscape complexes of the northern macroslope of the Western Sayan. Article summarizes literature and authors' data on evapotranspiration obtained at experimental watersheds in the basin of the river Kebezh, on one of which in the 70s, as an experiment, 50 % of the forest area in the watershed has been cut down. Calculations of the total evaporation of phytocenoses at the basin level has been made, taking into account the altitudinal zonality. To calculate evapotranspiration at the study sites, field data obtained as a result of silvicultural and geobotanical studies and hydrological observations were used. Based on interpretation of remote sensing images and the use of digital elevation model, classification of landscape-hydrological complexes for the basins of the Kebezh and Taigish rivers was carried out, for which the components of evapotranspiration were calculated. The results showed that evapotranspiration in the dark coniferous taiga of the Western Sayan is an important component of the water balance and a significant proportion is the unproductive consumption of moisture for the evaporation of precipitation intercepted by tree crowns. It has also been established that the structure of evapotranspiration changes along the altitudinal zones in accordance with the vertical differentiation of climatic parameters and vegetation productivity. Estimated evapotranspiration data for various landscape-hydrological complexes made it possible to an indirect estimates of their contribution to the formation of runoff in river basins. This study can serve as a theoretical guide for landscape hydrological studies in the temperate cool zone.

Keywords: precipitation, evapotranspiration, river basins, watersheds, altitudinal zonality of landscape, Western Sayan.

DOI: 10.15372/SJFS20230403

INTRODUCTION

Evaporation is one of the most important components of a moisture cycle. In the water balance of forest ecosystems the evapotranspiration includes evaporation of intercepted precipitation, transpiration and physical evaporation from soil and snow. A. R. Konstantinov (1968) made generalization of data on evaporation in the Russian regions with different climatic and soil conditions.

In summer, transpiration of vegetation is one of the main elements of the water regime in forest ecosystems. It accounts for a significant part (until 50–70 %) of the total moisture spending for evapora-

tion (Rakhmanov, 1962; Antipova, 1990, et al.). The values of physical evaporation and transpiration in the water balance of forest ecosystems for different regions of Russia were calculated by Yu. L. Rauner (1974), V. N. Pautova (1975), A. N. Antipov and N. D. Antipova (1975), A. V. Lebedev (1977, 1982), L. N. Kas'yanova and N. N. Pogodaeva (1979), I. N. Beideman (1983), and other authors.

Along with transpiration, an important element in the evapotranspiration of forest ecosystems is the evaporation of intercepted precipitation by tree crowns. Studies conducted under various geographical conditions indicate that precipitation interception depends on the tree density, composi-

tion and age of stands, precipitation time on crowns, wind regime, temperature and amount of precipitation (Pomeroy et al., 1998; Onuchin, 2001; Chang, 2003; Onuchin, Burenina, 2008).

Evaporation of moisture from snow under forest canopy is significantly different from physical evaporation in open areas. It is known that transporting snow by wind is an important factor in the process of snow accumulation. Blizzards contribute to increased evaporation from the snow surface and the spatial redistribution of solid precipitation (Dyunin, 1961; Grudinin, 1981). Forest ecosystems significantly transform the type of the wind speed profile and create a special microclimate that helps reduce physical evaporation from snow. In the works of V. I. Rutkovsky (1956), E. D. Sabo (1956), S. F. Fedorov (1977), G. V. Grudinin (1981), A. A. Onuchin (2001, 2008) the role of forest vegetation in reducing moisture consumption for evaporation from snow cover is shown.

Physical evaporation from soil in forest ecosystems makes an insignificant contribution to evapotranspiration. It mainly depends on soil moisture. Maxima evaporation from soil is associated with precipitation; minimal – occur in dry periods of the year (Antipov, 1979). According to the results of hydrological studies in the dark coniferous forests of Southern Siberia (Lebedev, Uskova, 1975; Protopopov, 1975; Lebedev, 1982), in the summer months, the moisture evaporates in a forest 8 times less than from the soil in open sites.

Evaluation of total evaporation in the forest is a complex and not always solvable with the required accuracy problem. There are three approaches to evapotranspiration estimating: direct field measurement methods, computational methods, and empirical relationships. A number of calculation methods for determining the total evaporation are based on empirical dependencies (Budyko, 1956, 1971; Budagovsky, 1989; Bondarik, Karpechko 1999). In foreign countries, mainly computational methods were developed (Morton, 1984; Klaassen, 2001; Zhang et al., 2001). Within the framework of the model proposed by M. I. Budyko (1971), various variations of computational methods of evapotranspiration in a river basin are developed taking into account orography and vegetation cover (Donohue et al., 2012; Hou et al., 2022). One of the most common models for studying total evapotranspiration is the Penman-Monteith formula (Monteith, 1965) due to the convenience of calculation and the ease of obtaining the necessary meteorological data. It is modified by many researchers taking into account the factors affecting the evapotranspiration process

(Yang et al., 2007; Zhang et al., 2016). The energy balance method is used to estimate the actual evapotranspiration. Estimation of evaporation from the land surface according to Earth remote sensing data SEBS (Surface Energy Balance Systems), SEBAL and METRIC (Gibson et al., 2013; Leng, 2017) has been repeatedly tested in sub-satellite experiments of various scales and directions, including Russian researchers' studies (Muzylev et al., 2019).

NASA uses the Penman-Monteith method to estimate evapotranspiration from remote sensing data, the source of which is the MODIS medium spatial resolution spectrometer. The climatic characteristics of the studied territory, the types of the underlying surface, as well as the diversity of vegetation cover are taken into account (Mu et al., 2007, 2011; Rasulovala, 2021).

Based on the concept of the connection between evapotranspiration and biometric indicators of forest stands, we tried to answer the question: what are the differences between evapotranspiration for dark coniferous stands and secondary forests of the Western Sayan? The aim of the study is to show the role of evapotranspiration in the structure of the water balance of dark coniferous taiga and evaluate its effect on runoff formation in various altitudinal zones.

This work is of scientific and practical interest, because for a specific territory, an analysis of all components of the water balance obtained both as a result of field measurements and as by calculation methods has been performed. Combining the approaches and the results of previous studies we considered the contribution of the components of evapotranspiration: vegetation transpiration (woody plants, grass-shrub layer), interception of precipitation by tree crowns, evaporation of moisture from the soil and snow. The values of these components will differ significantly in the dark coniferous and deciduous forests of the study area, for each altitudinal zone.

To implement such a methodological approach a considerable volume of data is needed. These data were accumulated for the forest ecosystems of the Western Sayan by the researchers of V. N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in the course of many years of field studies. The results of field studies on vegetation transpiration in experimental catchments obtained by the authors were supplemented with literature data on the components of total evaporation (Antipov, Antipova, 1975, 1979; Antipov, 1979; Kozlova, 1979; Burenina, 1981, 1982; Lebedev, 1982; Antipova, 1990). In addition, in the mountain forests of the Western Sayan, on permanent test

areas, observations were made on the dynamics of reforestation in logging areas of the 60s of the last century. All these conditions determined the choice of the study area – the northern macroslope of the Western Sayan.

In a changing climate, the assessment of the contribution of evapotranspiration to the water balance of river basins makes it possible to consider the effects of both natural and anthropogenic factors on the water content of rivers in the region, which is important not only theoretically, but also practically.

STADY AREA, INITIAL DATA AND METHODS

The investigations were conducted in the mountain coniferous taiga of the northern macro slope in the Western Sayan (Fig. 1).

Western Sayan Mountain Ridge, a wide strip of mountains with elevations above sea level (a. s. l.) of up to 2500 m at South Siberia, stretches from west to east for a distance of 650 km. Western Sayan borders on vast hilly Minusinsk Hollow covered by forest-steppe vegetation. Central Tuvan Hollow occupied by dry steppe is adjacent to this mountain ridge in the south. This region is in moderately continental climate characterized by mild

winter and warm summer seasons. Average annual air temperature is minus 1 °C and precipitation ranges 600 mm to 1200 mm depending on elevation a. s. l. In foothills, snow pack is 60–80 cm deep, whereas snow depth increases to 100–180 cm, depending on slope aspect, at high (Srednesibirskoe upravlenie..., 2023).

All the altitudinal vegetation zones, from forest-steppe to mountain tundra, common in the mountains of southern Siberia can be found on the northern macro slope of Western Sayan. In the lower part of macro slope the light coniferous and coniferous-deciduous forests, dominated by pine (*Pinus* L.), birch (*Betula* L.) and aspen (*Populus tremula* L.) are presented. The zone of dark coniferous taiga (chern taiga) is located between 300 m and 700 m a. s. l. Higher it is replaced by the mountain taiga zone. At 1200–1300 m a. s. l. mountain taiga is replaced by subalpine zone – Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) / Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) open woodlands and alpine meadows. Between 1400 m and 1500 m a. s. l., these open woodlands are replaced by tundra vegetation (Smagin et. al, 1980).

Evapotranspiration was estimated at objects belonging to territorial units of various ranks ranging from elementary catchment (by which we mean the smallest catchment area with a distinct channel, having an unbranched hydrological network and

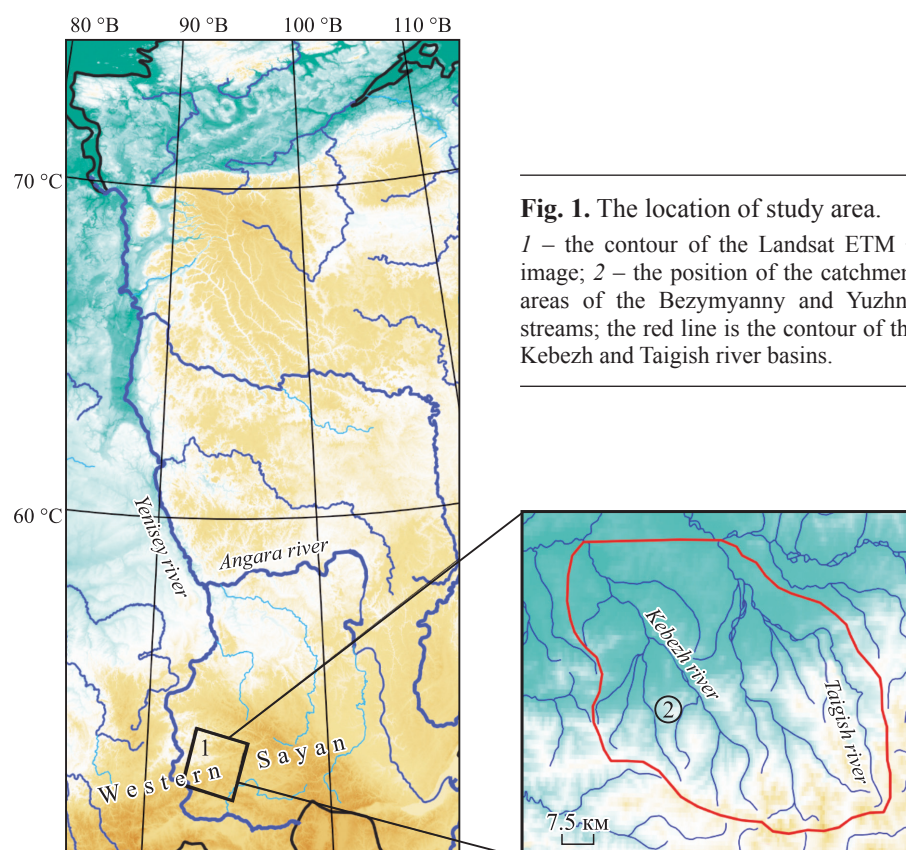


Fig. 1. The location of study area.

1 – the contour of the Landsat ETM + image; 2 – the position of the catchment areas of the Bezymyanny and Yuzhny streams; the red line is the contour of the Kebezh and Taigish river basins.

Table 1. Forestry and inventory characteristics of the sample plots

Test site number	Type of forest stand	Composition	Tree species	Age, years	Growing stock volume, m ³ /ha	Needles phytomass	Shrub and grass phytomass
						t/ha	
1	Siberian pine stand with fern and green moss	9Ps1F + B	Ps F	220 110	364	11.9	4.24
2	Fir stand with fern and green moss	7F3Ps + B	Ps F	150 130	170	13.5	2.30
3	Siberian pine stand with tall grass and fern	9Ps1F	Ps F	190 130	300	12.8	2.92
4	Siberian pine stand with tall grass and fern	9Ps1F	Ps F	230 130	494	13.4	3.30
5	Siberian pine stand with cowberry (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.) and green moss	7Ps3F + B	Ps F	200 110	320	19.3	3.70
6	Siberian pine stand with cowberry, sedge (<i>Carex</i> L.) and green moss	10Ps	Ps	40	16.8	7.7	4.11

Footnote. B – Birch; Ps – Siberian pine; F – Siberian fir.

characterized by uniform surface structure, soil, vegetation) to river basins with dissected hydrographic network and complex terrain. The authors analyzed the results in separate blocks. The first block presents the results obtained in the field at test sites located on the catchments basins of the Southern and Nameless streams. In the second block, the results of calculation of evapotranspiration for the Kebezh and Taigish river basins are presented. The catchments of the Kebezh and Taigish rivers belong to the Yenisei River basin in Southern Siberia and are located at the northern slope of the Western Sayan ridge. The basin areas of these rivers are somewhat equal: Kebezh – 1000 km², Taigish – 750 km².

The observations were carried out at six test sites, which are located within these catchments (Table 1).

In the basin of the Southern Stream Siberian pine forests of II class bonitet are dominated, growing stock volume 320–400 m³/ha, in the upper part of the catchment they are replaced by fir stands, growing stock volume 170–200 m³/ha. At the catchment of the Nameless Stream, Siberian pine forests of II class bonitet, with growing stock volume 300 m³/ha are prevalent.

Hydrological monitoring was accomplished at V. N. Sukachev Institute of Forest Sib. Br. USSR Acad. Sci. field experimental station from 1966 to 1980. All components of the evapotranspiration were calculated using the field data. The moisture consumption for transpiration was calculated by the formula (1) (Lebedev, 1982):

$$T = N \sum_k I_k P_k + \sum_k i_k m_k / 10^4, \quad (1)$$

where T – transpiration for a season, mm; N – number of transpiration hours for the season; I_k , i_k – average transpiration intensity of the trees and of the grass-shrub layer for season, mg/g × hour; P_k – phytomass of needles and leaves of trees, t/ha; m_k – phytomass of the grass-shrub layer, t/ha; k – index of phytocenosis.

In the field, to determine the transpiration rate of vegetation we used the modification of L. A. Ivanov (1951) method. This is a quick way to weigh a cut of a leaf or shoot detached from a plant. The first weighting is carried out immediately after cutting, and the second after 3–5 minutes, which makes it possible to measure transpiration in the state of saturation of the leaf with water in which it was on the plant.

Data on the phytomass of needles and foliage of tree species were obtained by calculation methods (Zamolodchikov et al., 2005; Usoltsev, 2007), using inventory parameters of the forest stands of test sites. The phytomass of the grass-shrub layer was determined according to the methods used in geobotanical studies (Programma..., 1974). The number of transpiration hours was calculated using the dependence of the frequency of precipitation on their total amount (Lebedev, 1982).

The interception of liquid atmospheric precipitation by the canopy was carried out according to the methods (Molchanov, 1970; Protopopov, 1975), with standard precipitation gauges used in the hydro meteorological service of Russia. Two methods

were used to assess the interception of winter precipitation by the canopy: comparing precipitation in precipitation buckets in the forest and in the open area and comparing snow storage in the open site and under the forest canopy.

To estimate accumulation of snow in the forest, we used relative values, so-called snow storage coefficient or snow accumulation coefficient, which is the ratio of snow storage in the forest to that on relatively small open sites in the forest or in deciduous forest (Rutkovsky, 1956; Kolomyts, 1975; Protopopov, 1975; Fedorov, 1977; Golding, Swanson, 1978). This coefficient characterizes capability of forest stand to snow accumulation and enables estimate the amount of solid precipitation intercepted by tree crowns. This coefficient can be expressed in units from zero to one or in percent. Snow measurement was carried out by conventional methods in hydrology (Sabo, 1962) using some amendments to ensure the accuracy of the measurement of snow storage.

Physical evaporation from the soil was determined by the weight method using soil evaporators (Rekomendatsii..., 1976). To assess the physical evaporation from the snow cover, the calculated and experimental methods were used (Kuzmin, 1974). To account for the evaporation of snow moisture by experimental method, snow evaporators with an area of 500 cm² were used. The monoliths of snow in the evaporators were renewing when they began to thaw. The reiteration of determination of moisture evaporation from soil and snow was 5–10 days per month.

For Kebezh and Taigish river basins, quantitative characteristics of evapotranspiration were obtained using calculations taking into account the landscape differentiation of catchments (Burenina et al., 2012a, b). In order to take into account the altitude zonality and landscape differentiation of the Kebezh and Taigish river basins, a satellite image of the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) radiometer and a digital elevation model of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) were used. A Landsat 7 ETM+ image acquisition date was 6 July, 1999. Spatial resolution is 30 m, spectral channels in the visible, near and mid-IR region of the electromagnetic spectrum. Detection of training samples for the classes of forest vegetation was carried out with the involvement of long-term field observation data and inventory data of the Ermakovskiy forestry district. Classification was made using maximum likelihood classification method, as a result, the following types of land cover were identified: dark coniferous (mature primary stands) forests, coniferous-deciduous (secondary stands) forests, clear cuts and burned areas, grass-marsh complexes, dark coniferous open woodlands, shrubs, mountain meadows, yernicks, rocks, water surfaces, roads, built areas.

The digital elevation model SRTM, widely used in scientific research, was obtained as a result of processing radar topographic survey data for most of the globe between 60° N. and 54° S in 2000. Interferometric data processing made it possible to obtain a digital elevation model with a resolution of 1 arc second for the entire covered area. With the help of this DEM, the territories of the Kebezh and Taigish river basins were identified and their altitude differentiation was carried out according to zoning (Smagin et al., 1980). For each high-altitude zone from the classification results of the Landsat 7 ETM+ image, plant classes of dark coniferous, coniferous-deciduous forests, cuttings and burnes, grass-marsh complexes were identified and their area was estimated.

Based on the concept of the interdependence of landscape and hydrologic spatial structure (Glushkov, 1961) we consider that every landscape complex has a certain hydrological content. We thought it possible to use the term «landscape hydrological complexes» (LHC) for our selected classes of the earth's surface.

The components of the evapotranspiration were calculated for each selected type of LHC, and then the average value of these components was determined for the high-altitude zone. Moisture consumption for transpiration along altitudinal belts for each LHC was determined by the formula (Lebedev, 1982), using the long-term average indicators of the intensity of plant transpiration in Siberia and the actual phytomass values of LHC and the number of transpiration hours for year.

For calculation of moisture transpiration, data were used on the transpiration intensity of woody and grass-shrub vegetation obtained for the virgin, secondary stands and logged sites in the forests of Western Sayan. To calculate the moisture consumption for transpiration in the chern taiga, we used the results of our own observations (Burenina, 1981, 1982). For other altitudinal zones – forest-steppe, subtaiga, mountain taiga and tundra – were involved from literature data on the transpiration intensity (Sudachkova, 1963; Pautova, 1975; Antipov, Antipova, 1979, 1980; Kozlova, 1979; Beideman, 1983; Antipova, 1990). The number of transpiration hours was determined by the dependence of the precipitation frequency on total quantity of rains (Lebedev, 1982) during the season for the year 1999.

For calculation of moisture transpiration, data were used on the transpiration intensity of woody and grass-shrub vegetation obtained for the virgin, secondary stands and logged sites in the forests of Western Sayan. To calculate the moisture consumption for transpiration in the chern taiga, we used the results of our own observations (Burenina, 1981, 1982). For other altitudinal zones – forest-steppe, subtaiga, mountain taiga and tundra – were involved from literature data on the transpiration intensity (Sudachkova, 1963; Pautova, 1975; Antipov, Antipova, 1979, 1980; Kozlova, 1979; Beideman, 1983; Antipova, 1990). The number of transpiration hours was determined by the dependence of the precipitation frequency on total quantity of rains (Lebedev, 1982) during the season for the year 1999.

The stock of phytomass was determined by a calculation based on the forest survey characteristics of sample plots, which were used in determining the training samples of the appropriate vegetation classes. Calculations were made according to forming the stand species through the determination of conversion coefficients by the three-parameter equation:

$$Kf = a \times D^b \times H^c, \quad (2)$$

where D and H are the average diameter and height of the stand or element of the forest, and a , b , and c are parameters for the main forest-forming species (Zamolodchikov, 2005). The phytomass was determined through the stem volume per 1 ha and Kf of the strata. In the calculations of moisture transpiration with grass-shrub cover, data were used on phytomass of the grass-shrub layer and undergrowth in logged sites and in secondary and virgin forests (Babintseva, 1965; Burenina, 1981, 1982).

In assessing the interception of precipitation by the forest canopy, we used computational methods based on the dependences of precipitation retention on the taxation and biometric characteristics of forest stands (Onuchin, 1985, 2001; Onuchin, Burenina, 2008). To determine the amount of evaporation from the soil and snow we used the results of experimental studies on the natural evaporation on forest and treeless watersheds (Burenina, 1981, 1982; Lebedev, 1982) and data from scientific reports on field research in mountain taiga of Siberia.

RESULTS AND DISCUSSION

Field studies at the test sites. The interception of liquid atmospheric precipitation by the canopy and grass cover is important for the formation of surface runoff in the summer. Table 2 presents data

from field observations of the interception of rainfall by forest vegetation over nine years (1975–1983).

Interception of liquid atmospheric precipitation by a canopy of fir stands at experimental catchments amounts to 20–38 % of the total precipitation during the season.

The formation of spring runoff is determined, first, by the accumulation of snow during the winter, which in turn depends on the interception of solid precipitation by tree crowns. The interception of solid precipitation by the forest canopy and their subsequent evaporation (sublimation) are a more complex process than the evaporation of liquid precipitation.

Not all precipitation evaporates into the atmosphere; part is blown off the crowns and replenishes snow storage under the forest canopy. The evaporation from tree crowns depends on many factors: by how long snow remains in crowns (i. e. its residence time) and by how much snow drops to the ground. Interception of snow by tree crowns increases with increasing air temperature, because the warm and moist snow becomes more adhesive to the crowns (Miller, 1964; Onuchin, 2001). At the same time, metamorphism of the intercepted snow may increase and the snow may become less solid (Kobayashi, 1987; Gubler, Rychetnik, 1991). Some researchers (Bunnell, 1985; Wheeler, 1987; Schmidt, Gluns, 1991) note that low air temperature-induced wind speed and low snow density contribute to snow interception by the forest canopy, and a warm spell following a snowfall enhances the amount of intercepted snow falling to the ground.

According to the results of study in the dark coniferous forests of the Western Sayan, precipitation interception by the canopy of the forest stands for cold period ranged from 14 to 39 %. Our data

Table 2. Interception of liquid atmospheric precipitation by the forest canopy (ground truth data for 1975–1983 years)

Precipitation of the warm period, mm	Test plot											
	1		2		3		4		5		6	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
754	205	27.2	240	31.8	243	32.2	252	33.4	202	26.8	228	30.3
803	189	23.5	201	25.0	217	27.0	291	36.2	219	27.3	223	27.8
662	162	24.5	137	20.7	116	26.6	175	26.4	187	28.2	167	25.3
1081	277	25.6	270	25.0	313	29.0	299	27.7	291	26.9	290	26.8
714	213	29.8	208	29.1	192	26.9	193	27.0	211	29.6	203	28.5
617	165	26.7	214	34.7	179	29.0	239	38.7	216	35.0	202	32.8
559	181	32.4	170	30.4	193	34.5	195	34.9	247	44.2	197	35.3
776	253	32.6	194	25.0	243	31.3	274	35.3	243	31.3	241	31.1
769	239	31.1	252	32.8	263	34.2	291	37.8	238	30.9	257	33.4

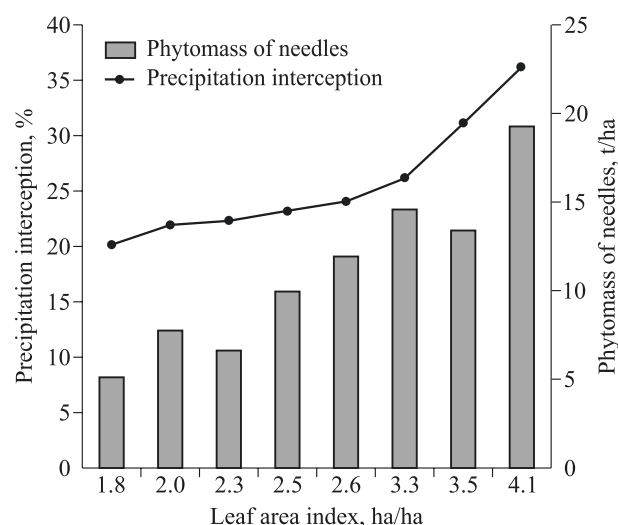


Fig. 2. Precipitation interception dependence on biometric characteristics of forest stands.

are consistent with the results obtained previously A. V. Lebedev (1974) on precipitation gauges installed in the forest and in the open site. Based on our observations and literature data (Protopopov, 1975; Lebedev, 1982), the relationship between the total precipitation interception by the canopy and inventory and biometric characteristics of stands was analyzed. With an increase in the density of the canopy from 0.4 to 0.6, the average value of intercepted precipitation increases by 3–5 %. Precipitation interception by forest canopy is highly dependent on foliage biomass, leaf area index and other easily measurable biometric characteristics of forest stands (Fig. 2).

During the summer transpiration of vegetation is one of the important expendable elements of the water balance in forest ecosystems.

The study results showed that the intensity of transpiration of the main tree species (Siberian pine

and Siberian fir) is changeable, and depends on the daily temperature and air humidity. The average values of the transpiration rate of fir and Siberian pine differ both in years and in locality of study objects (Table 3).

A comparative analysis of our own research and literature data (Sudachkova, 1963; Antipov, Antipova, 1979, 1980; Kozlova, 1979) showed that even for one region the transpiration rate of tree species depends on their age, the absolute height of the terrain and the temperature regime of a concrete season.

The moisture consumption for transpiration by vegetation in the summer is determined not only by the transpiration intensity. Largely, it depends on the productivity of the forest stands. Using the phytomass data for test plots and field data on transpiration intensity in stands, calculations of moisture consumption for transpiration by dark-needle forest stands for five vegetation seasons were made (Fig. 3).

Figure 3 shows that the moisture consumption for transpiration varies significantly for stands of different ages and species composition. In fir forests, moisture consumption for transpiration is higher than in Siberian pine forests. Values of moisture consumption for transpiration vary by year, which is associated with the length of the growing season and weather conditions, on which transpiration intensity depends.

Physical evaporation from soil and snow is a small part of the evapotranspiration in forest phytocenoses. This is especially true for coniferous forests. Experiments of A. V. Lebedev (1982) on the study of physical evaporation from soil under a canopy of dark coniferous forest and from soil monoliths without grass in a glade (open area) showed that under the tree crowns soil evapora-

Table 3. The intensity of transpiration of tree species (average for the growing season) in various stands of the Western Sayan, mg/g hour

Test plot	Composition of stand	Species	1977	1978	1979	1980	Mean
1	9Ps1F + B	Ps	112	128	147	139	132
		F	250	282	199	254	246
2	7F3Ps + B	Ps	124	139	130	142	109
		F	231	291	236	267	256
3	9Ps1F	Ps	129	119	116	112	119
		F	244	193	148	189	194
4	9Ps1F	Ps	131	136	114	121	126
		F	253	230	168	183	209
5	7Ps3F + B	Ps	94	118	124	132	117
		F	163	207	197	196	191
6	10Ps	Ps	112	152	187	162	153

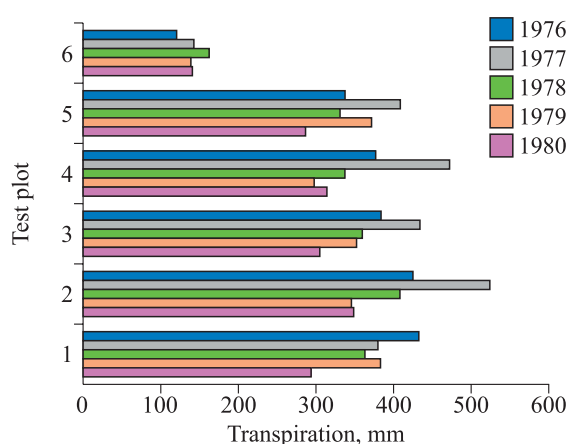


Fig. 3. The change in moisture consumption for transpiration by years.

tion is 8–10 times less than in an open place. Our own data on the evaporation from the soil for each month are based on a series of daily observations (8–10 times for month). The averaged data for all the test plots for the warm period of the year are shown in Table 4.

Observations of evaporation from the snow under the canopy at the test plots showed that from the date of the beginning of the stable snow cover to the end of February, the average daily evaporation was 0.06–0.08 mm per day. Over the years of observations during this period, the evaporation from the snow ranged from 4 to 9 mm, while during the first two months of spring, from 7 to 20 mm evaporated in the test areas. The obtained field data on the components of the evapotranspiration at the test sites were used for water-balance calculations at the experimental catchments (Table 5).

According to table 5, up to 48 % of the evapotranspiration in dark-needle stands is spent on transpiration and almost the same on evaporation of intercepted precipitations by crowns. Less than 10 % of the total consumption of evaporated moisture by the forest phytocenoses is evaporation from the soil and the surface of the snow cover.

At the same time, the transpiration and evaporation of intercepted precipitation vary significantly from year to year (Fig. 4a, b) depending on the amount of annual precipitation. In years with abundant rainfall, transpiration is 22–30 %, and the evaporation of intercepted precipitation is 65–70 % of the evapotranspiration. In years with a small amount of precipitation, the moisture consumption for transpiration increases to 60–65 %, the evaporation of intercepted precipitation 30–35 %.

A close correlation was established between the amount of rainfall intercepted by the forest canopy

Table 4. Average evaporation from soil in the forest

Years	Physical evaporation from soil, mm					
	May	June	July	August	September	Total
1977	2	12	13	4	2	33
1978	3	6	8	6	1	24
1979	2	4	4	3	2	15
1980	1	2	4	3	2	12
Average	2	6	7	4	2	21

Table 5. Elements of the water balance at the catchment of Nameless stream and Southern stream, mm

Years	Annual precipitation	Transpiration	Precipitation interception	Evaporation from soil	Evaporation from snow	Evapotranspiration
Nameless stream						
1966*	1147	243	298	10	24	575
1967	1094	175	339	11	25	550
1968	758	290	258	20	22	590
1969	998	281	284	14	20	598
1970	1089	248	311	12	24	595
1971	779	258	276	20	23	577
1972	1254	226	369	12	18	625
1973	998	253	299	18	24	594
1974	823	370	208	21	19	618
1975**	740	356	199	17	23	595
1976	982	235	304	16	20	575
1977	978	310	277	14	19	620
1978	823	263	290	12	20	585
1979	1009	383	371	10	21	784
1980	1052	294	336	12	21	663
Southern stream						
1966*	1147	232	243	10	35	520
1967	1091	175	339	10	11	535
1968	757	290	220	20	20	550
1969	1004	271	226	10	30	537
1970	1096	248	236	10	36	530
1971	803	248	243	10	15	516
1972	1224	126	398	10	19	553
1973	1026	253	231	10	35	529
1974	837	370	158	10	22	560
1975**	761	335	137	13	20	505
1976	984	262	239	10	25	536
1977	967	288	206	10	20	524
1978	1173	235	275	10	30	550
1979	990	255	242	11	24	532

Footnote. * Literature data (Lebedev, 1974, 1982). ** Authors' data.

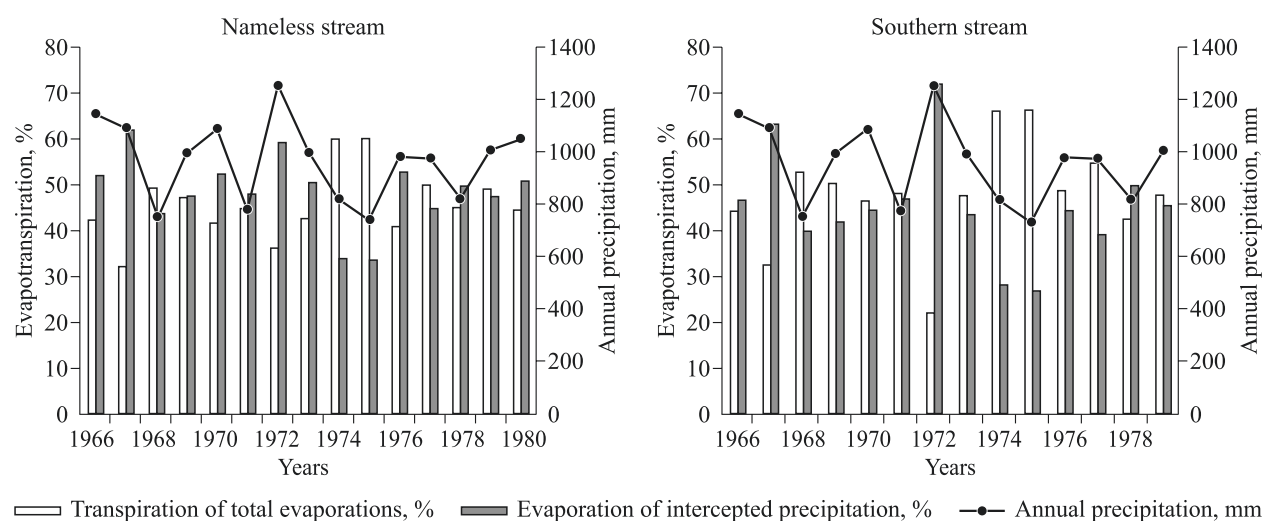


Fig. 4. Correlation of transpiration and evaporation of intercepted precipitation with annual precipitation.

and the annual amount of rainfall. For the basin of the Nameless stream the correlation coefficient is 0.77, for the basin of the Southern stream – 0.72. To compare the evapotranspiration at the experimental catchments, an evaporation coefficient was used that reflects the ratio of evapotranspiration to precipitation.

At the forest watersheds in the mountain taiga from 44 to 80 % of the precipitation is spent for evapotranspiration. The relatively small differences between evapotranspiration in the experimental basins can be explained by the fact that the catchments are in the same climatic conditions with a similar stand in terms of productivity. It should be noted that under the canopy of a dark coniferous forest, a similar microclimate is formed, on which the transpiration of the under crown vegetation largely depends.

Calculations of evapotranspiration for the Kebezh and Taigish river basins. For Kebezh and Taigish river catchments following LHC were allocated: 1 – rock outcrops; 2 – dwarf birch (*Betula nana* L.) sites (yerniks); 3 – bog-grass communities; 4 – grass/small shrub communities; 5 – open dark-needled conifer woodlands; 6 – alpine meadows; 7 – tall and small shrubs sites; 8 – virgin dark-needled conifer forest; 9 – secondary mixed conifer/deciduous stands; 10 – logged sites and fire scars.

Calculations of the evapotranspiration were made taking into account the altitudinal zonality of the vegetation cover in these catchments. Changes in evapotranspiration according to high altitude zones is due to radiation balance of the territories, but within every zone, the evaporation rate depends on the ratio of forest and treeless territories and the productivity of plant communities (Table 6).

The altitudinal zonality of LHC affects the structure of evapotranspiration (Fig. 5). In areas not covered with vegetation, i. e., rock outcrops, moisture evaporation includes only physical evaporation from the snow cover and soil. In the mountain tundra, physical evaporation from snow and soil exceeds the transpiration rate of tundra vegetation.

According to the published data and previous studies (Lebedev, 1982; Burenina, 1982; Burenina et al., 2012a, b), from the snow and soil surface, from 40 to 60 mm evaporate, which is 30 to 60 % of the evapotranspiration in these LHC.

In the forest areas of studied watersheds in the mountain-taiga and chern taiga zones, the moisture expenditure on evaporation from the soil and snow in the stands does not exceed 30–45 mm, which is a small fraction in the overall balance of moisture (6–12 %). In logged sites, burned areas, and other treeless lands, this value reaches 30 % of the evapotranspiration.

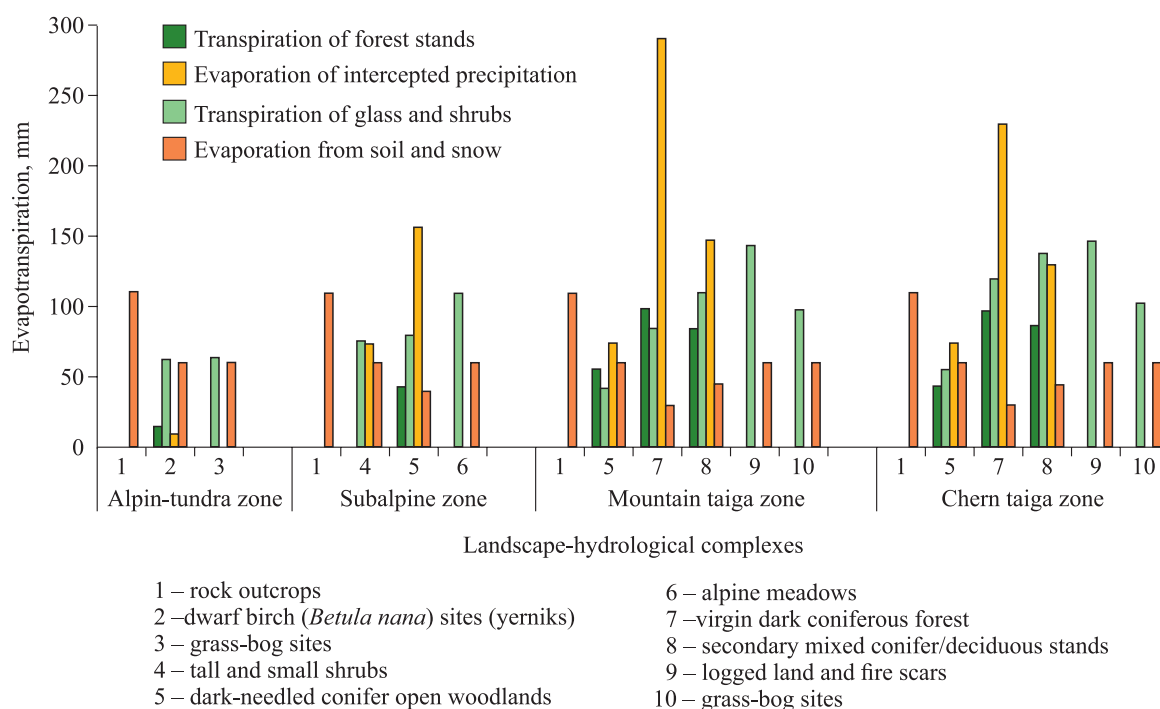
In the mountains, especially in the high-altitude part, the loss of snow moisture to unproductive evaporation occurs owing to wind activity. The magnitude of evaporation in the rock outcrops deposits on the northern slope of the Western Sayan was calculated as the difference between the background of solid precipitation (Olen'ya River weather station) and snow pack in open areas. The long-term average rate of moisture for evaporation obtained from the data of LHC is equal to 110 mm, which is consistent with published data for the mountains of the southeastern Baikal region (Onuchin, Burenina, 2008).

In the subalpine zone, the share of transpiration of plant communities and evaporation of intercepted precipitation in evapotranspiration increases.

Table 6. Differentiation of evaporation according to zonality

Landscape-hydrological complex	Evapotranspiration, mm				
	Transpiration		Evaporation of precipitation intercepted by tree crowns	Evaporation from soil and snow	Total
	Forest stands	Grass and shrubs			
	Mountain tundra				
Rock outcrops	—	—	—	110	110
Dwarf birch sites (yerniks)	—	63	—	60	123
Grass-bog sites	—	65	—	60	125
	Subalpine zone				
Tall and small shrubs	0	79	60	60	199
Dark-needled conifer open woodlands	36	98	102	40	276
Alpine meadows	—	142	—	60	202
	Mountain taiga				
Dark-needled conifer open woodlands	—	76	74	60	210
Virgin dark conifer forest	98	85	250	30	463
Secondary mixed conifer / deciduous stands	84	110	148	45	387
Logged land and fire scars	—	143	—	60	203
Grass-bog sites	—	98	—	60	158
	Chern taiga*				
Open woodlands and shrubs	—	86	84	60	230
Virgin dark-needled conifer stands	97	120	230	30	477
Secondary mixed conifer / deciduous forest	87	138	130	45	400
Logged land and fire scars	—	148	—	60	208
Grass-bog sites	—	103	—	60	163

* Chern taiga is a dark coniferous taiga with aspen in the low mountain zone, which is characterized by a softer and more humid climate than mountain taiga of Siberia and a large variety of herbaceous vegetation.

**Fig. 5.** Structure of evapotranspiration according to vertical differentiation of landscape-hydrological complexes.

The main components of the evapotranspiration in the mountain and chern taiga, as shown by calculations, are the transpiration of phytocenoses and the evaporation of intercepted precipitation by tree crowns. In mountain and chern taiga, plant transpiration and evaporation of intercepted precipitation are the major processes accounting for 80–95 % of the total moisture evaporation. The ratio of moisture transpiration and evaporation of intercepted precipitation varies considerably for dark coniferous stands and secondary coniferous-deciduous forests. The highest values of intercepted precipitation are characteristic for plantations of the mountain taiga zone, where dark coniferous forests predominate. In the chern taiga, significant areas are occupied by secondary deciduous forests, which affects the evaporation of precipitation intercepted by the crowns of trees.

The study showed the possibility to obtain quantitative characteristics of evapotranspiration using of landscape-hydrological analysis in conjunction with satellite images and a digital elevation model. The calculated data on the evapotranspiration for different landscape-hydrological complexes allowed us to indirectly estimate their contribution to the formation of runoff in river basins, since the formation of river flow is the integration of various water-balance ratios characteristic of the landscape complexes of the catchment.

This work is of some scientific interest, because it is based on factual data (ground truth data), but has territorial limitations. The use of GIS technology and remote sensing data of the Earth's surface in the last three decades allows us to move to the study of evapotranspiration at a new level. It is known that the evapotranspiration indicators obtained from the remote sensing data of the Earth MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16 ET) take into account the climatic characteristics of the studied area, the types of the underlying surface, as well as the diversity of vegetation cover (Mu, 2007, 2011; Rasulova, 2021). The use of evapotranspiration time series obtained on the basis of data from the Terra MODIS satellite (MOD16A2) for the territory of the river basin makes it possible to consider the spatial-temporal dynamics of evapotranspiration, taking into account the disturbance of forest cover by logging and fires.

CONCLUSION

Forest hydrological studies at test sites in the experimental catchments have shown that moisture consumption for transpiration of vegetation

and evaporation of intercepted precipitation by tree crowns depends on the species composition and age of the stand, as well as on the phytomass of tree crowns. Fir forest evaporates more moisture than Siberian pine stands.

Evaporation from snow and soil surface makes up a small fraction of the evapotranspiration in both fir and Siberian pine stands. The variability of evapotranspiration by the years is determined by weather conditions: the more rainy days during the growing season, the lower the moisture consumption for transpiration. In years with a rainy summers, transpiration is 22–30 % of the evapotranspiration, and in dry seasons it reaches 65 %. The evaporation of intercepted precipitation depends on the amount of snow and winter air temperatures.

Comparison of evapotranspiration for different landscape-hydrological complexes showed that it varies in accordance with altitudinal differentiation. In high mountainous landscapes, plant communities spend less moisture on transpiration than similar phytocenoses in mountain and chern taiga. Physical evaporation in treeless areas of highlands and mountain tundra exceeds evaporation from soil and snow in forest phytocenoses of mountain and chern taiga due to wind activity.

Thus, evapotranspiration in the dark coniferous taiga of the Western Sayan is an important component of the water balance. At the same time, a significant share in the moisture circulation of forest ecosystems is the unproductive consumption of moisture for the evaporation of rainfall intercepted by tree crowns. The spatial variability of moisture consumption for transpiration is determined primarily by differences in the productivity of phytocenoses, while the variability of moisture consumption for transpiration in the temporal aspect is the effect of weather and climate conditions of each years.

REFERENCES

- Antipov A. N.* Fizicheskoe isparenie (Physical evaporation) // *Geosistemy predgoriy Zapadnogo Sayana* (Geosystems of the foothills of the Western Sayan) / V. V. Bufal, I. A. Khlebovich (Eds.). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1979. P. 109–116 (in Russian).
- Antipov A. N., Antipova N. D.* Transpiratsiya rastitel'nosti taezhnykh biogeotsenozov predgoriy Zapadnogo Sayana (Transpiration of vegetation of taiga biogeocenoses of the foothills of the Western Sayan) // *Dokl. In-ta geogr. Sibiri i DV* (Rep. Inst. Geogr. Sib. and the Far East). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1975. N. 46. P. 55–62 (in Russian).
- Antipov A. N., Antipova N. D.* Transpiratsiya lesnoy rastitel'nosti (Transpiration of forest vegetation) // *Geosistemy*

- predgoriy Zapadnogo Sayana (Geosystems of the foothills of the Western Sayan) / Bufal V. V., Khlebovich I. A. (Eds.). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1979. P. 103–109 (in Russian).
- Antipov A. N., Antipova N. D.* Otsenka transpiratsii rastitel'nosti taezhnykh geosystem (Assessment of transpiration of vegetation of taiga geosystems) // Geogr. i prirod. res. (Geogr. Nat. Res.). 1980. N. 4. P. 115–124 (in Russian with English abstract).
- Antipova N. D.* Transpiratsiya v rastitel'nykh soobshchestvakh yuga Sredney Sibiri (Transpiration in plant communities at the south of Central Siberia): avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 03.00.16 (Cand. Biol. Sci. (PhD) thesis: Ecol.). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. br. USSR Acad. Sci.), 1990. 19 p. (in Russian).
- Babintseva R. M.* Dinamika zhivogo napochvennogo pokrova na vyrubkakh kedrovyykh drevostoev v severnoy chasti Zapadnogo Sayana (Dynamics of the living ground cover in the clearings of Siberian stone pine stands in the northern part of the Western Sayan) // Vozobnovlenie v lesakh Sibiri: Sb. st. (Regeneration in the forests of Siberia: Coll. articles). Krasnoyarsk, 1965. P. 148–162 (in Russian).
- Beideman I. N.* Spravochnik po raskhodu vody rasteniyami v prirodnnykh zonakh SSSR (geobotanicheskaya i ekologicheskaya kharakteristiki) (Reference book on water consumption by plants in natural zones of the USSR (geobotanical and ecological characteristics)). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1983. 257 p. (in Russian).
- Bondarik N. L., Karpechko Yu. V.* Sravnenie metodov opredeleniya srednemnogoletney velichiny ispareniya s lesa (Comparison of methods for determining the average annual value of evaporation from the forest) // Meteorol. i gidrol. (Meteorol. & Hydrol.). 1999. N. 9. P. 98–105 (in Russian with English abstract).
- Budagovsky A. I.* Poluempiricheskaya teoriya transpiratsii i vodnogo rezhima rastitel'nogo pokrova (Semi-empirical theory of transpiration and water regime of vegetation cover) // Vodn. Res. (Water Res.). 1989. N. 6. P. 5–17 (in Russian with English abstract).
- Budyko M. I.* Teplovoy balans zemnoy poverkhnosti (Thermal balance of the Earth's surface). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1956. 255 p. (in Russian).
- Budyko M. I.* Klimat i zhizn' (Climate and life). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 472 p. (in Russian).
- Bunnell F. L., McNay R. S., Shank C. C.* Trees and snow: the deposition of snow on the ground – a review and quantitative synthesis. Integrated wildlife intensive forestry research. Ministries of Environment and Forests. IWIFR-17. Victoria, B. C., 1985. 440 p.
- Burenina T. A.* Dinamika struktury vodnogo balansa na vyrubke srednegornogo poyasa Zapadnogo Sayana (Dynamics of the structure of the water balance in the felling of the mid-mountain belt of the Western Sayan) // Aktual'nye voprosy issledovaniya lesov Sibiri: tez. dokl. Vsesoyuz. konf., Krasnoyarsk, 28–30 sent. 1981 g. (Topical issues in the study of Siberian forests: Abstr. All-Union Conf., Krasnoyarsk, 28–30 Sept., 1981). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. br. USSR Acad. Sci.), 1981. P. 19–20 (in Russian).
- Burenina T. A.* Dinamika vosstanovleniya lesogidrologicheskikh usloviy na eksperimental'noy vyrubke srednegornogo poyasa Zapadnogo Sayana (Dynamics of restoration of forest-hydrological conditions in the experimental clearing of the mid-mountain belt of the Western Sayan) // Srednobrazuyushchaya rol' lesnykh ekosistem Sibiri. Sb. st. (Environment-forming role of Siberian forest ecosystems. Coll. articles). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. br. USSR Acad. Sci.), 1982. P. 106–114 (in Russian).
- Burenina T. A., Fedotova E. V., Ovchinnikova N. F.* Izmenenie struktury vlagooborota v svyazi s vozrastnoy i vosstanovitel'noy dinamikoy lesnykh ekosistem (Change in the structure of the hydrological cycle in connection with the age and recovery dynamics of forest ecosystems) // Sib. Ekol. Zhurn. (Sib. Ecol. J.). 2012a. V. 19. N. 3. P. 435–445 (in Russian with English abstract).
- Burenina T. A., Fedotova E. V., Ovchinnikova N. F.* Change in the structure of the hydrological cycle in connection with the age and recovery dynamics of forest ecosystems // Contemp. Probl. Ecol. 2012b. V. 5. Iss. 3. P. 323–331 (Original Rus. Text © T. A. Burenina, E. V. Fedotova, N. F. Ovchinnikova, 2012, publ. in Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2012. N. 3. P. 435–445).
- Chang M.* Forest hydrology: an introduction to water and forests. 3rd Ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. 595 p.
- Donohue R. J., Roderick M. L., McVicar T. R.* Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model // J. Hydrol. 2012. V. 436–437. P. 35–50.
- Dyunin A. K.* Isparenje snega (Evaporation of snow). Novosibirsk: Izd-vo SO AN SSSR (Sib. Br. USSR Acad. Sci. Publ.), 1961. 117 p. (in Russian).
- Fedorov S. F.* Issledovanie elementov vodnogo balansa v lesnoy zone evropeyskoy territorii SSSR (Study of the elements of the water balance in the forest zone of the European territory of the USSR). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 264 p. (in Russian).
- Gibson L. A., Jarman C., Su Z., Eckardt F. E.* Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System – A South African perspective // Water SA. 2013. V. 39. N. 4. P. 477–484.
- Glushkov V. G.* Voprosy teorii i metody gidrologicheskikh issledovaniy (Questions of theory and methods of hydrological studies). M.: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1961. 416 p. (in Russian).
- Golding D. L., Swanson R. H.* Snow accumulation and melt in small forest openings in Alberta // Can. J. For. Res. 1978. V. 8. N. 4. P. 380–388.
- Grudin G. V.* Snezhny pokrov yuga Minusinskoj kotloviny (Snow cover of the south of Minusinsk hollow). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1981. 160 p. (in Russian).
- Gubler H., Rychetnik J.* Effects of forests near the timberline on avalanche formation // Snow, hydrology and forests in high alpine areas. Wallingford, UK: IAHS Publ., 1991. Iss. 205. P. 19–38.
- Hou Y., Wei X., Vore M., Deri S. J., Pypker T., Giles-Hansen K.* Cumulative forest disturbances decrease runoff in two boreal forested watersheds of the northern interior of British Columbia, Canada // J. Hydrol. 2022. V. 605. Iss. 7. Article number: 127362.

- Ivanov L. A., Silina A. A., Zhmur D. T., Tselnicker Yu. L. Ob opredelenii transpiratsionnogo rashkoda drevostoem lesa (On the determination of transpiration consumption by a tree stand of forest) // Bot. zhurn. (Bot. J.). 1951. N. 1. P. 5–20 (in Russian with English abstract).
- Kasyanova L. N., Pogodaeva N. N. Transpiratsiya i produktivnost' rasteniy Zabaykal'ya (Transpiration and productivity of plants in Zabaykal'e). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1979. 197 p.
- Klaassen W. Evaporation from rain-wetted forest in relation to canopy wetness, canopy cover, and net radiation // Water Resources Res. 2001. V. 37. Iss. 12. P. 3227–3236.
- Kobayashi D. Snow accumulation on a narrow board // Cold Reg. Sci. & Technol. 1987. V. 13. Iss. 3. P. 239–245.
- Kolomyts E. G. Formirovanie i raspredelenie snezhnogo pokrova Sos'vinskogo Priob'ya (Formation and distribution of snow cover in the Sos'va Priob'e) // Sos'vinskoe Priob'e: ocherki prirody i khoz-va (The Sos'va Priob'e: essays on nature and economy). Irkutsk: Irkut. gos. un-t, 1975. P. 158–214.
- Konstantinov A. R. Испарение в природе. Изд. 2-е перераб. и доп. (Evaporation in nature. 2nd ed., revised and updated). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 532 p.
- Kozlova L. N. Vodnyy rezhim rasteniy srednegornyykh pooyasov Khamar-Dabana i Zapadnogo Sayana (Water regime of plants in the mid-mountain belts of Khamar-Daban and the Western Sayan) // Gidroklimaticheskoe vliyaniye lesa (Hydroclimatic influence of the forest). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1979. P. 95–115 (in Russian).
- Kuzmin P. P. O raschetnom i eksperimental'nom sposobakh opredeleniya ispareniya s poverkhnosti snezhnogo pokrova (On computational and experimental methods for determining evaporation from the surface of the snow cover) // Materialy V zakavkazskoy nauch. konf. po izuch. snezhn. pokrova snezhnykh lavin i lednikov Kavkaza. Tr. NIGMI (Proc. V Transcaucasian Sci. Conf. on the study snowy cover of snow avalanches and glaciers of the Caucasus. Proc. NIGMI (Sci. Res. Inst. Hydrometeorol.). 1974. Iss. 58 (64). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. P. 25–43 (in Russian).
- Lebedev A. V. Gidrologicheskiiy rezhim kedrovnikov severnogo sklona khrebt Kulumys (Zapadny Sayan) (Hydrological regime of the Siberian stone pine forests on the northern slope of the Kulumys ridge (Western Sayan)) // Sredobrazuyushchaya rol' lesa. Sb. st. (Environment-forming role of the forest). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. br. USSR Acad. Sci.), 1974. P. 30–43 (in Russian).
- Lebedev A. V. Vodny i teplovoy balansy prirodnykh kompleksov rechnyykh basseynov (Water and heat balances of natural complexes of river basins) // Ekologicheskoe vliyaniye lesa na okruzhayushchuyu sredu. Sb. st. (Ecological impact of the forest on the environment. Coll. articles). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. br. USSR Acad. Sci.), 1977. P. 15–48 (in Russian).
- Lebedev A. V. Gidrologicheskaya rol' gornyykh lesov Sibiri (Hydrological role of the mountain forests of Siberia). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1982. 282 p. (in Russian).
- Lebedev A. V., Uskova P. G. Vysotno-poyasnye zakonomernosti formirovaniya stoka i vodnoy erozii v gornyykh lesakh basseyna Baykala (Altitudinal-belt patterns of runoff formation and water erosion in the mountain forests of the Baikal basin) // Statsionarnye gidrologicheskie issledovaniya v lesakh Sibiri. Sb. st. (Stationary hydrological studies in the forests of Siberia. Coll. articles). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. br. USSR Acad. Sci.), 1975. P. 69–99 (in Russian).
- Leng P., Li Z.-L., Duan S.-B., Tang R., Gao M.-F. A method for deriving all-sky evapotranspiration from the synergistic use of remotely sensed images and meteorological data // JGR Atmospheres. 2017. V. 122. Iss. 24. P. 13263–13277.
- Miller D. H. Interception processes during snowstorms. U. S. For. Serv. Res. Paper PSW-18. Berkeley, CA: Pacific SW. For. & Range Expt. Sta., 1964. 24 p.
- Molchanov A. A. Gidrologicheskaya rol' lesa v razlichnykh prirodnykh zonakh SSSR (Hydrological role of the forest in various natural zones of the USSR) // Gidrologicheskie issledovaniya v lesu. Sb. st. (Hydrological studies in the forest. Coll. articles). M.: Nauka (Science), 1970. P. 5–78 (in Russian).
- Monteith J. L. Evaporation and environment // The state and movement of water in living organisms. Proc. XIXth Symp. Soc. Exp. Biol. Swansea: Cambridge Univ. Press, 1965. P. 205–234.
- Morton F. I. What are the limits of forest evaporation? // J. Hydrol. 1984. V. 74. Iss. 3–4. P. 373–398.
- Mu Q., Heinsch F. A., Zhao M., Running S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data // Rem. Sens. Environ. 2007. V. 111. Iss. 4. P. 519–536.
- Mu Q., Zhao M., Running S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Rem. Sens. Environ. 2011. V. 115. Iss. 8. P. 1781–1800.
- Muzylev E. L., Startseva Z. P., Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Osipov A. I. Ispol'zovanie sputnikovyykh dannyykh o kharakteristikakh podstilayushchey poverkhnosti i meteorologicheskikh kharakteristikakh pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov bol'shogo sel'skokhozyaystvennogo regiona (The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region) // Sovrem. Probl. Distantion. zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current problems in remote sensing of the Earth from space). 2019. V. 16. N. 3. P. 44–60 (in Russian with English abstract and references).
- Onuchin A. A. Vysotno-poyasnye osobennosti transformatsii tverdykh atmosferynykh osadkov gornymi lesami Khamar-Dabana (Altitudinal-zonal features of the transformation of solid atmospheric precipitation by the mountain forests of Khamar-Daban) // Gidrologicheskie issledovaniya v lesakh SSSR (Hydrological studies in the forests of the USSR). Frunze: Ilim, 1985. P. 109–119 (in Russian).
- Onuchin A. A. General appropriateness of snow storage in boreal forests // Izv. RAN. Ser. Geogr. (Proc. Rus. Acad. Sci. Ser. Geogr.). 2001. N. 2. P. 80–86.
- Onuchin A. A., Burenina T. A. Hydrological role of forest in Siberia In: Trends in water resources research / A. B. Prescott, T. U. Barkely (Eds.). N.Y.: Nova Sci. Publ., 2008. P. 67–92.

- Pautova V. N.* Transpiratsiya rasteniy v osnovnykh soobshchestvakh nekotorykh rayonov Vostochnoy Sibiri (Plant transpiration in the main communities of some regions of Eastern Siberia) // *Vodny obmen v osnovnykh tipakh rastitel'nosti SSSR* (Water exchange in the main types of vegetation in the USSR). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1975. P. 62–75 (in Russian).
- Pomeroy J. W., Gray D. M., Shook K. R., Toth B., Essery R. L., Pietroniro A., Hedstrom N.* An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modeling // *Hydrol. Proces.* 1998. V. 12. Iss. 15. Spec. Iss.: East. Snow Conf. P. 2339–2367.
- Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* (Program and methodology of biogeocenological studies) / N. V. Dylis (Ed.) M.: Nauka (Science), 1974. 404 p. (in Russian).
- Protopopov V. V.* Sredoobrazuyushchaya rol' temnokhvoynogo lesa (Environment-forming role of dark coniferous forest). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Science. Sib. Br.), 1975. 328 p. (in Russian).
- Rakhmanov V. V.* Vodookhrannaya rol' lesov (Water protection role of forests). M.: Goslesbumizdat, 1962. 235 p. (in Russian).
- Rasulova A. M.* Raschet evapotranspiratsii na territorii basseyna Ladozhskogo ozera (Calculating evapotranspiration for the lake Ladoga catchment area) // *Tr. Karel. nauch. tsentra RAN* (Proc. Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci.). 2021. N. 9. P. 146–156 (in Russian with English abstract).
- Rauner Yu. L.* Teplovoy balans i summarnoe isparenie oblesennykh territoriy ravninnoy chasti SSSR (Heat balance and total evaporation of forested areas of the flat part of the USSR) // *Issledovanie genezisa klimata. Sb. nauch. tr.* (Studies of the climate genesis. Coll. sci. works). M.: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1974. P. 155–193 (in Russian).
- Rekomendatsii po raschetu ispareniya s poverkhnosti sushy* (Guidelines for calculating evaporation from the land surface). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 96 p. (in Russian).
- Rutkovsky V. I.* Vliyanie lesov na nakoplenie i tayanie snega (Influence of forests on snow accumulation and melting) // *Sneg i talye vody, ikh izuchenie i ispol'zovanie* (Snow and melted waters, their study and the use). M.: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1956. P. 184–205.
- Sabo E. D.* Isparenie so snezhnogo pokrova v rayone Ergeney (Evaporation from the snow cover in the Yergeni region) // *Sneg i talye vody, ikh izuchenie i ispol'zovanie* (Snow and melted waters, their study and the use). M.: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1956. P. 44–51 (in Russian).
- Sabo E. D.* Nekotorye rezul'taty issledovaniya formirovaniya snezhnogo pokrova v lesu (Some results of the study of the formation of snow cover in the forest) // *Snezhny pokrov, ego raspredelenie i rol' v narodnom khozyaystve* (Snow cover, its distribution and its role in the national economy). M.: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1962. P. 98–103 (in Russian).
- Schmidt R. A., Gluns D. R.* Snowfall interception on branches of three conifer species // *Can. J. For. Res.*, 1991. V. 21. N. 8. P. 1262–1269.
- Smagin V. N., Il'inskaya S. A., Nazimova D. I., Novosel'tseva I. F., Cherednikova Yu. S.* Tipy lesov gor Yuzhnoy Sibiri (Types of forests of the mountains of southern Siberia). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Sci. Sib. Br.), 1980. 336 p. (in Russian).
- Srednesibirskoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy* (Central Siberian department for hydrometeorology and environmental monitoring), 2023 (in Russian). <http://meteo.krasnoyarsk.ru>
- Sudachkova N. E.* Transpiratsiya podrosta kedra i pikhty v severnykh otrogakh Zapadnogo Sayana (Transpiration of the Siberian stone pine and fir undergrowth in the northern spurs of the Western Sayan) // *Tr. In-ta lesa i drevesiny SO AN SSSR. T. 60: Fiziologiya drevesnykh rasteniy Sibiri* (Proc. Inst. For. & Timber Sib. Br. USSR Acad. Sci. V. 60. Physiology of woody plants of Siberia). M.: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1963. P. 36–45 (in Russian).
- Usoltsev V. A.* Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoy Evrazii. Metody, baza dannykh i ee prilozheniya (Biological productivity of Northern Eurasia's forests: methods, database and its applications). Yekaterinburg: UrO RAN (Ural Br. Rus. Acad. Sci.), 2007. 636 p. (in Russian with English title, summary and contents).
- Wheeler K.* Interception and redistribution of snow in a subalpine forest on a storm-by-storm basis // *Proc. West. Snow Conf.*, 55th Annual Meeting, 14–16 Apr., 1987, Vancouver, British Columbia, 1987. P. 78–87.
- Yang D., Sun F., Liu Z., Cong Z., Ni G., Lei Z.* Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis // *Water Resources Res.* 2007. V. 43. Iss. 4. W04426. P. 1–12.
- Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Korovin G. N.* Konverсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев (Conversion coefficients phytomass/reserves related to dendrometric parameters and stand composition) // *Lesovedenie* (For. Sci.). 2005. N. 6. P. 73–81 (in Russian with English abstract).
- Zhang L., Dawes W. R., Walker G. R.* Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale // *Water Resources Res.* 2001. V. 37. Iss. 3. P. 701–708.
- Zhang Y., Peña-Arancibia J. L., McVicar T. R., Chiew F. H. S., Vaze J., Liu Ch., Lu H., Zheng H., Wang Y., Liu Y. Y., Miralles D. G., Pan M.* Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. Article number: 19124.

УДК 581.151 (571.1/5)

ВЫСОТНО-ПОЯСНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ГОРАХ ЮЖНОЙ СИБИРИ

Т. А. Буренина¹, Е. В. Федотова¹, Ч. Ф. Занг²

¹ *Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

² *Южно-китайский общедобразовательный университет
бульвар Западный Жонгшан, 49P2+J6R, р-н Тианхэ, Гуанчжоу, провинция Гуандун, 510631
Китайская Народная Республика*

E-mail: burenina@ksc.krasn.ru, elfed@ksc.krasn.ru, chuanfuzang@163.com

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

Статья посвящена изучению эвапотранспирации в ландшафтных комплексах северного макросклона Западного Саяна. Обобщены литературные и авторские данные по эвапотранспирации, полученные на экспериментальных водосборах в бассейне р. Малый Кебеж, на одном из которых в 70-е годы в качестве эксперимента 50 % площади водосбора было пройдено рубкой. Выполнены расчеты суммарного испарения фитоценозов на бассейновом уровне с учетом высотной поясности. Расчет эвапотранспирации на объектах исследования проведен по натурным данным, полученным в результате лесоводственных и геоботанических исследований и гидрологических наблюдений. На основе дешифрирования космических снимков и использования цифровых моделей рельефа проведена классификация ландшафтно-гидрологических комплексов для бассейнов рек Кебеж и Тайгиш, для которых рассчитаны составляющие эвапотранспирации. Показано, что эвапотранспирация в темнохвойной тайге Западного Саяна является важной составляющей водного баланса, значительная доля обеспечивает непроизводительный расход влаги на испарение осадков, перехватываемых кронами деревьев. Установлено, что структура эвапотранспирации изменяется по высотным поясам в соответствии с вертикальной дифференциацией климатических параметров и продуктивности растительности. Расчетные данные эвапотранспирации для различных ландшафтно-гидрологических комплексов позволили косвенно оценить их вклад в формирование стока речных бассейнов. Представленные материалы могут служить теоретическим ориентиром для ландшафтно-гидрологических исследований в умеренно-холодной зоне.

Ключевые слова: *осадки, сток, речные бассейны, водосборные бассейны, высотная зональность ландшафта, Западный Саян.*

Буренина Т. А., Федотова Е. В., Занг Ч. Ф. Высотно-поясная изменчивость эвапотранспирации лесных экосистем в горах Южной Сибири (Burenina T. A., Fedotova E. V., Zang C. F. Altitudinal-belt variability of evapotranspiration of forest ecosystems in the mountains of Southern Siberia) // Сибирский лесной журнал. 2023. № 4. С. 26–40 (на английском языке, реферат на русском).

УДК 630*52:630*174.754

РАНГОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИЙ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ В НОВОМ ОСВЕЩЕНИИ

В. А. Усольцев^{1, 2}, И. С. Цепордей¹

¹ Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

E-mail: usoltsev50@mail.ru; ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2023 г.

Вследствие наблюдаемых климатических сдвигов актуализируется проблема адекватной оценки углероддепонирующей способности лесов и ее возможных климатически обусловленных изменений. Для достижения оптимальной продуктивности растения должна быть обеспечена определенная пропорциональность между его органами, которая зависит в том числе от относительного количества фитомассы в них. В отличие от теорий метаболического масштабирования и адаптивного распределения масс, выполненное исследование связано с концепцией, основанной на негауссовских распределениях. С использованием опубликованных данных о фитомассе 4515 деревьев лесообразующих хвойных родов Евразии изложена новая концепция ранжирования фракций фитомассы на основе модифицированной модели Ципфа – Парето. В связи с тем, что ствол и ветви в архитектонике дерева выполняют одну и ту же функцию, а именно осуществление ксилемного и флоэмного транспорта и поддержание ассимиляционного аппарата дерева в пространстве полога, названные две фракции мы объединяем при ранжировании фитомасс в один общий блок. Поскольку у однолетних сеянцев ветви отсутствуют, и хвоя крепится непосредственно к их стволу (оси побега), объединение фитомасс ствола и ветвей в единый блок позволило рассмотреть динамику распределения фитомасс в растении в полном возрастном диапазоне, от сеянцев до спелых деревьев. Приняв ранжирование фитомасс в последовательности ствол плюс ветви, корни и хвоя, мы установили на начальном этапе роста растений положительную связь с рангом фитомасс. По мере роста растения названная положительная связь меняет знак и становится отрицательной. Представленная закономерность подтверждена статистически на уровне $p < 0.999$. Смена знака коэффициента конкуренции за ресурс происходит у всех родов в довольно узком возрастном диапазоне (от 2 до 7 лет).

Ключевые слова: *Pinus L., P. sibirica Du Tour, P. koraiensis Siebold & Zucc., Abies Mill., Picea A. Dietr., Larix Mill., Cryptomeria D. Don., теории распределения ассимилятов в дереве, модель Ципфа – Парето, коэффициент конкуренции за ресурс, возрастная смена знака коэффициента конкуренции за ресурс.*

DOI: 10.15372/SJFS20230404

ВВЕДЕНИЕ

В связи с наблюдаемыми климатическими сдвигами, актуализируется проблема адекватной оценки углероддепонирующей способности лесов и ее возможных климатически обусловленных изменений. С выходом на глобальный уровень моделирования биологической продуктивности лесов всё в большей степени начинает проявляться принцип несовместимости: чем

глубже анализируется реальная сложная экосистема, тем неопределеннее наше понимание ее поведения (Заде, 1974; Розенберг, 1980; Комаров, 2007). Богатство растительного мира на фоне непрерывно изменяющейся внешней среды затрудняет получение обобщающих закономерностей. основополагающий отличительный признак стохастических закономерностей: чем больше их обобщают, тем в большей степени результат обобщения отдаляется от понятия «за-

кон» (Assman, 1961; Шмитхюзен, 1966; Антанайтис и др., 1986; Møller, Jennions, 2002; Dhar, Giuliani, 2010; Усольцев, 2016).

В подобной ситуации особое место занимают аллометрические соотношения между количественными характеристиками организмов (Snell, 1892; Dubois, 1897; Thompson, 1917; Мина, Клевезаль, 1976; Кофман, 1986; Воробейчик, 2001), имеющие в двойных логарифмических координатах общий вид

$$\ln Y = \ln a + b \ln X, \quad (1)$$

где Y – масса того или иного органа особи; X – масса всей особи или ее размер; b – экспонента масштабирования.

Для достижения оптимальной продуктивности растения должна быть обеспечена определенная пропорциональность между его составными органами, которая зависит в том числе от относительного количества фитомассы в этих органах (Poorter et al., 2012). Известно несколько теорий распределения ассимилятов в органах растений (Davidson, 1969; Рачко, 1979; Waring, 1980; Oliver, Larson, 1990; Palumets, 1991; Nilsson, Albrektson, 1993; Liu et al., 2020; Delerue et al., 2022; Deng et al., 2023). В основу одной из них, известной как «теория метаболического масштабирования» (MST), положен фракталоподобный дизайн системы водного транспорта в сосудах. Она постулирует, что в соотношениях листва : ствол и листва : корни оптимальной является экспонента b , равная $3/4$ (West et al., 1997; Enquist, Niklas, 2002). Поскольку коэффициент детерминации в названных соотношениях варьировал в диапазоне от 0.97–0.99, высказано предположение, что при условии точного определения регрессионных коэффициентов модели (1) можно объяснить изменчивость распределения фитомассы во всем растительном царстве на 97–99 % (McCarthy et al., 2007).

Затем была предложена альтернатива MST-моделям, которую назвали теорией адаптивного распределения масс (АРТ) (Poorter et al., 2012). В ходе онтогенеза изменяется физиологическая активность органов, и распределение масс благодаря соответствующим адаптациям корректируется согласно изменениям в размерах растений. В результате вместо стабильного значения, равного $3/4$ по MST-модели, экспонента масштабирования b согласно АРТ-модели по мере увеличения массы растения снижается в соотношении листва : ствол с 0.90 до 0.58 и в соотношении листва : корни – с 1.01 до 0.67 (Poorter et al., 2015). Закономерности изменения экспоненты

b согласно АРТ-модели не относятся к всеобщим: например у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (Усольцев, 2016) в соотношении хвоя : ствол с увеличением размера дерева она вначале снижается с 1.37 до 0.73, а затем увеличивается с 0.73 до 0.85. В соотношении хвоя : корни экспонента b вначале снижается с 1.21 до 0.77, а затем возрастает с 0.77 до 1.28.

Наше исследование связано с иным подходом, основанным на «негауссовских распределениях» (Ivancheva, 2001; Соловьев и др., 2012). Они используются в задачах распределения ресурсов при максимизации общей полезности, причем не только в биологических и экологических, но также в политических и экономических системах (Суховольский, 2004; Benguigui, Blumenfeld-Lieberthal, 2007; Delong, 2011). Одно из таких распределений описывается уравнением Ципфа – Парето, или свободной конкуренции (Mandelbrot, 1961; Суховольский, 1996, 1997; Benguigui, Blumenfeld-Lieberthal, 2007; Подлазов, 2009; Delong, 2011; Соловьев и др., 2012; Суховольский и др., 2013, 2022; Комаров и др., 2017; Komarov et al., 2017). Применительно к древесным растениям уравнение имеет вид

$$\ln P_j = a - b \ln i, \quad (2)$$

где P_j – фитомасса j -й фракции (ствол, корни, ветви, листва или хвоя), кг; i – ранг фракции, т. е. ее порядковый номер в убывающем ряду: ствол, корни, ветви, листва или хвоя; b – коэффициент конкуренции за ресурс.

Установлено, что коэффициент конкуренции за ресурс (по модулю) с возрастом увеличивается (Суховольский, Иванова, 2015; Суховольский и др., 2022). Показано как его увеличение с возрастом дерева для сосны, березы (*Betula* L.) и осины (*Populus tremula* L.), так и снижение для ели (*Picea* A. Dietr.) (Соловьев и др., 2012). Регрессионный анализ коэффициента b с возрастом у 6 древесных видов показал отсутствие связи или слабую связь ($R^2 = 0.1$ – 0.4) (Комаров и др., 2017; Komarov et al., 2017). Видимо, следует согласиться с мнением О. Г. Чертова с соавт. (2007): «Правило перераспределения полного прироста биомассы дерева в приросты различных органов зависит от возрастного статуса дерева. ...Задача перераспределения прироста является хорошо известной в моделировании лесных сообществ, однако она окончательно не решена» (с. 156).

Во всех упомянутых случаях наибольшая доля фитомассы приходится на ствол, а наименьшая – на ассимиляционный аппарат. Однако у сеянцев порядок обратный, а именно, наи-

большая доля фитомассы приходится на хвою и наименьшая – на ствол (Фрейберг и др., 1998; Якимов и др., 2004; Данилов и др., 2009; Воробьев, Хамитов, 2015; Острошенко и др., 2015; Мамаев, Жемкова, 2019; Мухортов, Антропова, 2019; Оплетаев и др., 2021). Это означает, что на каком-то возрастном этапе происходит смена порядка ранжирования фракций фитомассы. А. С. Комаров с соавт. (2017; Komarov et al., 2017) полагают, что установление возраста, при котором происходит смена названных ранжирований, является приоритетным направлением дальнейших исследований в плане развития теории распределения ассимилятов в растениях.

Цель настоящего исследования – выполнить анализ рангового распределения фракций фитомассы у основных древесных видов Евразии и установить, меняется ли знак коэффициента конкуренции с возрастом в модели рангового распределения масс, и если названный знак меняется, то в каком возрасте деревьев это происходит.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу для решения поставленной задачи составила авторская база данных о фитомассе деревьев лесообразующих видов Евразии (Usoltsev, 2020), а также были привлечены данные о фитомассе семян, опубликованные в печати (Фрейберг и др., 1998; Якимов и др., 2004; Данилов и др., 2009; Воробьев, Хамитов, 2015; Острошенко и др., 2015; Мамаев, Жемкова, 2019; Мухортов, Антропова, 2019; Оплетаев и др., 2021). Насколько нам известно, данных по фракционному составу фитомассы семян лиственных видов в литературе практически нет, и мы ограничиваемся здесь шестью хвойными родами как совокупностями викарирующих видов. Характеристика совокупных исходных данных в количестве 4515 модельных деревьев дана в табл. 1.

Не вдаваясь в концептуальную подоплеку модели (2), детально изложенную предыдущи-

Таблица 1. Характеристика исходных данных о 4515 модельных деревьях

Порядковый номер рода	Виды	Число наблюдений	Возраст, лет	Высота, м	Фитомасса, кг			
					Листвы (хвои)	ветвей	ствола	корней
Двуххвойные сосны								
1	С. обыкновенная, с. Массона (<i>P. massoniana</i> Lamb.), с. густоцветковая (<i>P. densiflora</i> Siebold et Zucc.), с. Тунберга (<i>P. thunbergii</i> Parl.)	2180	1-430	0.05-37	0.00021-63	0.0011-244	0.00006-1781	0.00013-103
Ель								
2	Е. обыкновенная (<i>P. abies</i> (L.) H. Karst.), е. сибирская (<i>P. obovata</i> Ledeb.), е. Шренка (<i>P. schrenkiana</i> Fisch. & C. A. Mey.), е. аянская (<i>P. jezoensis</i> (Siebold & Zucc.) Carrière)	890	3-250	0.04-44	0.0002-222	0.001-360	0.00016-454	0.00019-350
Пихта (<i>Abies</i> Mill.)								
3	П. сибирская (<i>A. sibirica</i> Ledeb.), п. белая (<i>A. alba</i> Mill.), п. белокорая (<i>A. nephrolepis</i> (Trautv. ex Maxim.) Maxim.), п. сахалинская (<i>A. sachalinensis</i> (F. Schmidt) Mast.), п. Вича (<i>A. veitchii</i> Lindl.)	540	4-227	0.15-33	0.0004-117	0.00001-465	0.0002-2133	0.0006-315
Лиственница (<i>Larix</i> Mill.)								
4	Л. сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.), л. европейская (<i>L. decidua</i> Mill.), л. Сукачева (<i>L. sukaczewii</i> Dylis), л. Каяндера (<i>L. cajanderi</i> Mayr.), л. Гмелина (<i>L.gmelinii</i> (Rupr.) Kuzen.), л. Кемпфера (<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carrière), л. ольгинская (<i>L. olgensis</i> A. Henry)	535	1-420	0.04-34	0.00001-76.6	0.004-448	0.000001-3386	0.000002-768
Пятихвойные сосны <i>Haploxylon</i> (Koehne) Pilg.								
5	Кедр сибирский (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour.), к. корейский (<i>P. koraiensis</i> Siebold & Zucc.)	150	4-205	0.15-27	0.0012-47.7	0.0001-135	0.0007-724	0.0008-45
Криптомерия (<i>Cryptomeria</i> D. Don)								
6	<i>К. японская</i> (<i>C. japonica</i> (Thunb. ex L. f.) D. Don.)	220	2-215	0.9-42	0.04-87.7	0.03-174	0.11-2232	0.13-146

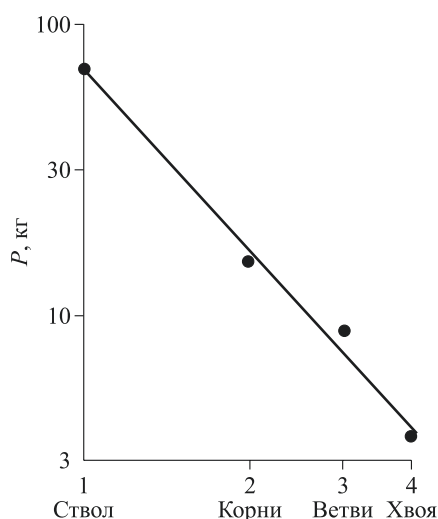


Рис. 1. Распределение фракций фитомассы дерева диаметром 16 см в 170-летнем насаждении сосны обыкновенной в убывающем ряду: ствол, корни, ветви и хвоя (Иванчиков, 1971).

Показана расчетная линия регрессии ($\ln P = 4.2164 - 2.1181 \ln i$; $R^2 = 0.984$) на фоне экспериментальных данных.

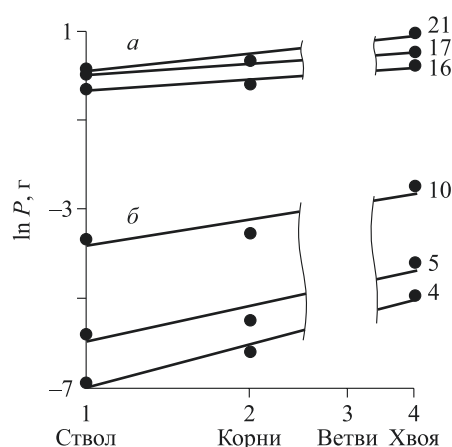


Рис. 2. Распределение фракций фитомассы семян кедров сибирского (а) (Воробьев, Хамитов, 2015) и лиственницы Сукачева (б) (Оплетаев и др., 2021) в возрастающем ранжированном ряду: ствол, корни и хвоя.

Цифрами показана высота растения, см.

ми исследователями (Суховольский, 1996, 1997, 2004; Суховольский, Иванова, 2015; Комаров и др., 2017; Komarov et al., 2017; Суховольский и др., 2022), покажем распределение фитомассы 170-летнего дерева с диаметром ствола 16 см в убывающей последовательности: ствол, корни, ветви, хвоя (рис. 1).

В данном случае коэффициент детерминации составил 98 %, хотя материалы базы данных (Usoltsev, 2020) свидетельствуют о наличии также меньших его значений, когда, например, хвоя и ветви в 45-летнем сосняке у некоторых деревьев меняются местами в ранжированном ряду (Казимиров и др., 1977).

Аналогичные графики с сохранением ранжирования, показанного на рис. 1, выполнены для распределения фракций фитомассы семян кедров сибирского (Воробьев, Хамитов, 2015) и лиственницы Сукачева (Оплетаев и др., 2021) (рис. 2).

Констатируем два основных отличия закономерностей, показанных на рис. 1 и 2. Во-первых, в отличие от убывающей последовательности фракций фитомассы сосны в возрасте 170 лет в ряду: ствол, корни, ветви, хвоя, та же последовательность в возрасте семян является возрастающей. Во-вторых, масса ветвей, соответствующая на рисунках рангу 3, на рис. 2 отсутствует, так как хвоя примыкает непосредственно к стволу семени.

Если по рис. 1 возможно восстановить фитомассу любой фракции в случае ее отсутствия в

исходных данных, то рис. 2 в отношении массы ветвей может ввести в заблуждение: массу ветвей по рис. 2 в данном случае восстановить невозможно по причине ее отсутствия в реальности. Но спустя 3–4 года, по мере роста растения, хвоя начинается крепиться не к стволу, а к нарождающимся ветвям, и ранжирование фракций фитомассы приобретает иной вид (рис. 3).

Аналогичное «проседание» массы ветвей в ранжированном ряду показано на примере 5-летних семян В. Д. Стакановым (1990). Лишь спустя 10–15 лет масса ветвей встраивается в ранжированный ряд, как показано на рис. 1. Если ствол и ветви в архитектонике дерева вы-

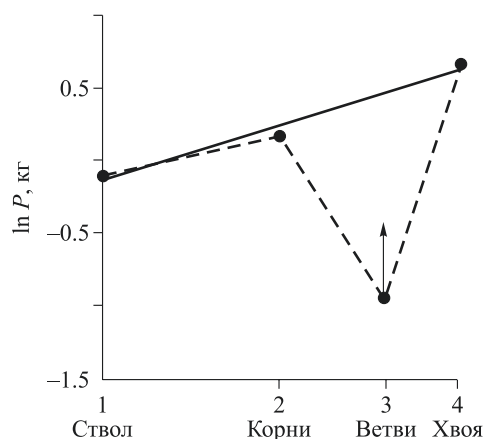


Рис. 3. Распределение фракций фитомассы 4-летних семян пихты цельнолистной (*Abies holophylla* Maxim.) (Острошенко и др., 2015) в возрастающем ранжированном ряду: ствол, корни, ветви и хвоя.

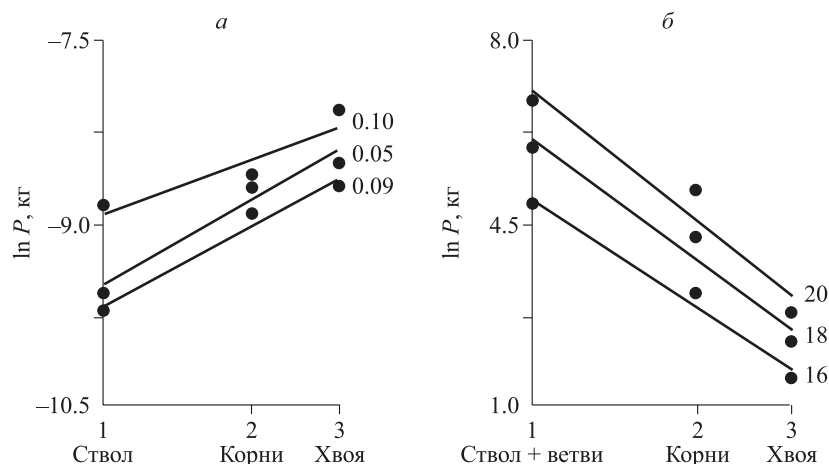


Рис. 4. Распределение фракций фитомассы сосны обыкновенной по рангам. *а* – у однолетних сеянцев (Мухортов, Антропова, 2019; Мамаев, Жемкова, 2019), *б* – у деревьев в возрасте 170 лет (Иванчиков, 1971). Цифрами показана высота растений, м.

полняют одни и те же функции, а именно осуществление ксилемного и флоэмного транспорта и поддержание ассимиляционного аппарата дерева в пространстве полога, то имеет смысл эти фракции рассматривать в плане ранжирования совокупно. Тогда можно показать смену возрастающей последовательности: ствол, корни и хвоя в возрасте сеянцев, убывающей последовательностью: ствол плюс ветви, корни и хвоя – в спелом возрасте (рис. 4, *а*, *б*).

Сказанное находится не только в рамках АРТ-модели, предполагающей, что фитомасса распределяется в приоритетном порядке на строительство органов растения, ответственных за потребление наиболее ограниченного ресурса (Poorter et al., 2012, 2015) и не только в рамках модели свободной конкуренции при распределении ресурсов (Суховольский и др., 2022), но и соответствует концепции имитационной модели распределения фракций фитомассы у деревьев. При разработке подобной имитационной модели Я. К. Палуметс (1990) выделил три блока по приоритетам в получении ассимилятов: хвоя, корни и ствол. Согласно его концепции, фитомасса ствола (и ветвей) является мерой избытка ассимилятов, которые остаются после удовлетворения потребностей хвои и корней.

Как было упомянуто выше, коэффициент b в модели 2 изменяется с возрастом. Если в возрастном диапазоне эксплуатационных лесов коэффициент b изменяет лишь свое значение (Суховольский, Иванова, 2015; Суховольский и др., 2022), то в возрастном диапазоне от сеянцев до спелых деревьев он меняет также и знак (рис. 4). Поэтому применительно к совокуп-

ности деревьев того или иного вида модель 2 должна быть дополнена не только независимой переменной возраста растения (A , лет), но и комбинированной переменной, учитывающей совместное действие возраста и ранга дерева и представленной произведением $(\ln A) \times (\ln i)$. В 3D-интерпретации подобная структура модели представляет в координатах фитомасса – возраст – ранг дерева пропеллерообразную поверхность, подобную тем, что ранее были нами показаны для распределений фитомассы деревьев и древостоев в координатах фитомасса – температура – осадки (Цепордей, Усольцев, 2022).

Из рис. 2 и 4 следует, что фитомасса фракций связана с размером дерева. Поэтому модель 2 применительно к совокупности деревьев того или иного вида необходимо кроме возраста растения дополнить еще одной независимой переменной, а именно высотой растения. Высота растения в данном случае более предпочтительна в качестве независимой переменной по сравнению с диаметром ствола, поскольку последний замеряется у сеянцев у основания стволика, а у основной массы деревьев, представленных в базе данных, – на высоте груди.

Поскольку одна из целей исследования состоит в нахождении возраста, при котором происходит смена знаков коэффициента b в модели 2, было бы некорректно при нахождении упомянутой смены знака включать в модель некоторое среднее значение высоты растения, поскольку она, как и фитомасса, изменяется с возрастом. Имеются зависимости двух искомых переменных от одной и той же независимой переменной.

Их раздельное описание приводит к тому, что полученные оценки не будут сбалансированными. Регрессионные зависимости, объединенные в одну логически непротиворечивую концепцию, образуют систему связанных уравнений, основным достоинством которой является внутренняя согласованность оценок (Wagren, 1971). Частным случаем связанных уравнений является их рекурсивная система, в которой зависимая переменная первого уравнения является одной из независимых переменных второго уравнения (Фёрстер, Ренц, 1983). Применение рекурсивной системы уравнений показано на примере составления таблиц биологической продуктивности древостоев (Усольцев, 1988). В нашем случае первое из упомянутых уравнений представлено зависимостью высоты дерева от его возраста (Усольцев, 1985):

$$\ln H = a + b_1 \ln A - b_2 (\ln A)^2, \quad (3)$$

а в качестве второго модифицируем зависимость (2) к виду:

$$\ln P = a + b_1 (\ln i) + b_2 (\ln H) + b_3 (\ln A) - b_4 (\ln A) \times (\ln i). \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Путем регрессионного анализа получены численные значения моделей (3) и (4), показанные в табл. 2 после введения поправок на логарифмическое преобразование (Baskerville, 1972).

Все регрессионные коэффициенты моделей 3 и 4 значимы на уровне $p < 0.999$. Коэффициенты детерминации моделей 3 изменяются по родам в диапазоне от 0.65 до 0.95 и моделей 4 – от 0.90 до 0.97.

Для наглядности полученных закономерностей изменения показателей фитомассы от объясняющих ее варьирование переменных, представим модели 4 в графической 3D-интерпретации. Для этого модели 3 протабулированы по задаваемым значениям возраста в диапазоне от 1 до 250 лет, а затем протабулированы модели 4 по задаваемым значениям возраста (1–250), ранга фракции (1–3) и расчетных значений высоты дерева, полученных посредством табулирования моделей 3. По значениям итоговой двухвходовой таблицы для каждого древесного рода (подрода) построены пропеллерообразные 3D-поверхности, наглядно представляющие зависимость фитомассы дерева от ее ранга в ряду распределения и от возраста дерева (рис. 5).

Полученные закономерности и их графическая интерпретация на рис. 5 показали, что на статистически значимом уровне ($p < 0.999$) положительная связь фитомассы деревьев с рангом фитомасс в последовательности: ствол (плюс ветви), корни и хвоя, наблюдаемая в возрасте сеянцев, к возрасту спелости меняет знак, и становится очевидной отрицательная связь фитомасс с их рангом в той же последовательности. Тем самым была решена первая из поставленных задач исследования

Для выполнения второй задачи исследования из двухвходовой таблицы, полученной та-

Таблица 2. Регрессионные коэффициенты и показатели адекватности по родам

Коэффициенты и показатели адекватности	Двухвойные сосны	Ель	Пихта	Лиственница	Пятихвойные сосны	Криптомерия
Модель 3						
a	–3.0046	–6.8611	–6.2890	–2.1334	–5.7100	–0.1189
b_1	2.3749	4.0010	3.9572	2.1016	3.2788	0.9238
b_2	–0.2267	–0.3939	–0.4769	–0.2280	–0.3036	–0.0442
R^2	0.820	0.649	0.849	0.878	0.953	0.657
SE	0.41	0.56	0.48	0.55	0.37	0.42
Модель 4						
a	–3.2256	–3.8637	–3.2520	–4.4464	–3.4195	–2.6745
b_1	1.0727	1.9086	1.5395	0.4709	1.7059	0.7458
b_2	2.3324	2.0374	2.3347	2.5272	2.1958	2.0738
b_3	0.3391	0.7128	0.3989	0.5671	0.5128	0.4788
b_4	–0.9598	–0.9607	–0.8533	–0.8334	–0.9163	–0.7273
R^2	0.900	0.916	0.958	0.965	0.970	0.914
SE	0.84	0.67	0.63	0.83	0.67	0.58

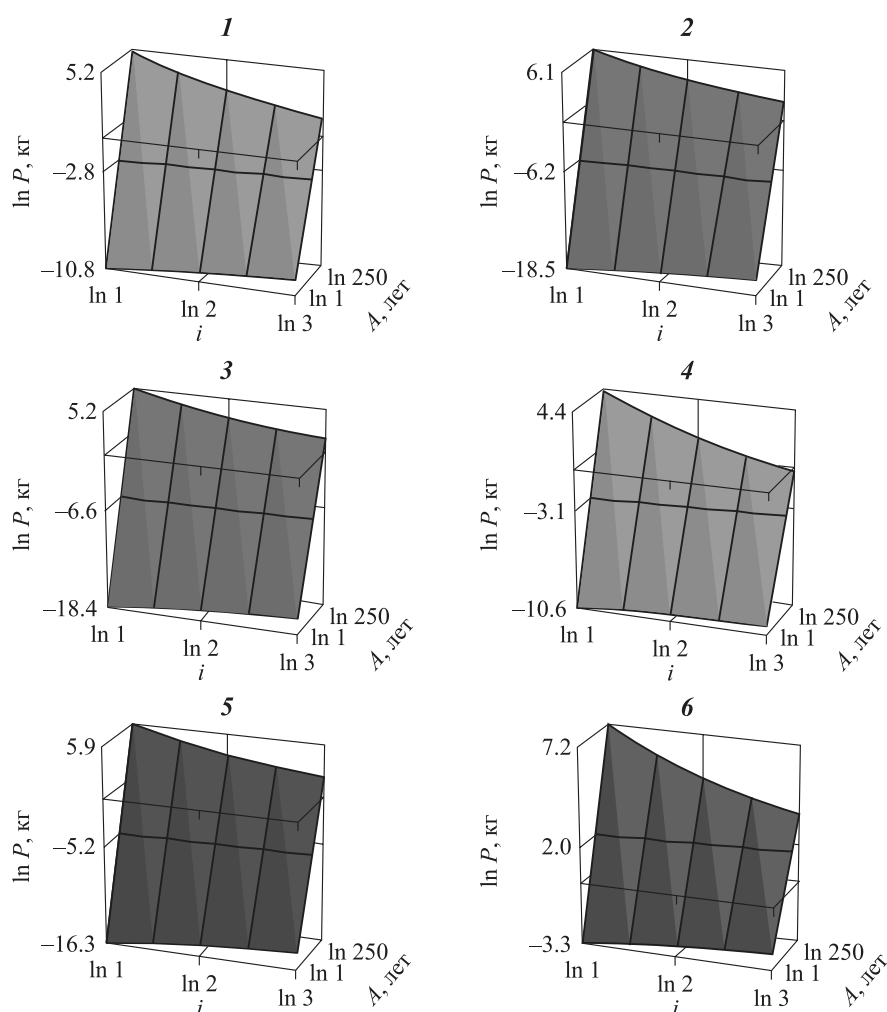


Рис. 5. Диаграммы, показывающие смену положительной связи фитомассы с ее рангом у однолетних сеянцев отрицателью в возрасте деревьев 250 лет.

1–6 – роды (см. табл. 1).

булированием рекурсивной системы моделей 3 и 4, были взяты значения фитомассы в узком диапазоне возраста, в котором происходит смена знака регрессионного коэффициента b_1 модели 4, и для названного диапазона построены пропеллерообразные 3D-поверхности, наглядно показывающие, в каком именно возрасте растения происходит смена знака регрессионного коэффициента b_1 модели 4 (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что смена знака коэффициента b_1 модели 4 происходит у всех родов в довольно узком возрастном диапазоне в интервале от 2 до 7 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе опубликованных данных о фитомассе деревьев хвойных лесобразующих родов Евразии изложена новая

концепция ранжирования фракций фитомассы на основе модифицированной модели Ципфа – Парето.

На статистически значимом уровне ($p < 0.999$) установлено, что положительная связь фитомассы деревьев с рангом фитомасс в последовательности: ствол (плюс ветви), корни и хвоя, – наблюдаемая в возрасте сеянцев, к возрасту спелости меняет знак, и становится очевидной отрицательная связь фитомасс с их рангом в той же последовательности.

Упомянутая смена знака коэффициента конкуренции за ресурс происходит у всех родов в довольно узком возрастном диапазоне в интервале от 2 до 7 лет.

Вместе с тем следует отметить недостаток используемых исходных данных. Сеянцы представлены у всех родов в возрасте 1–2 года (у кедра сибирского и пихты цельнолистной –

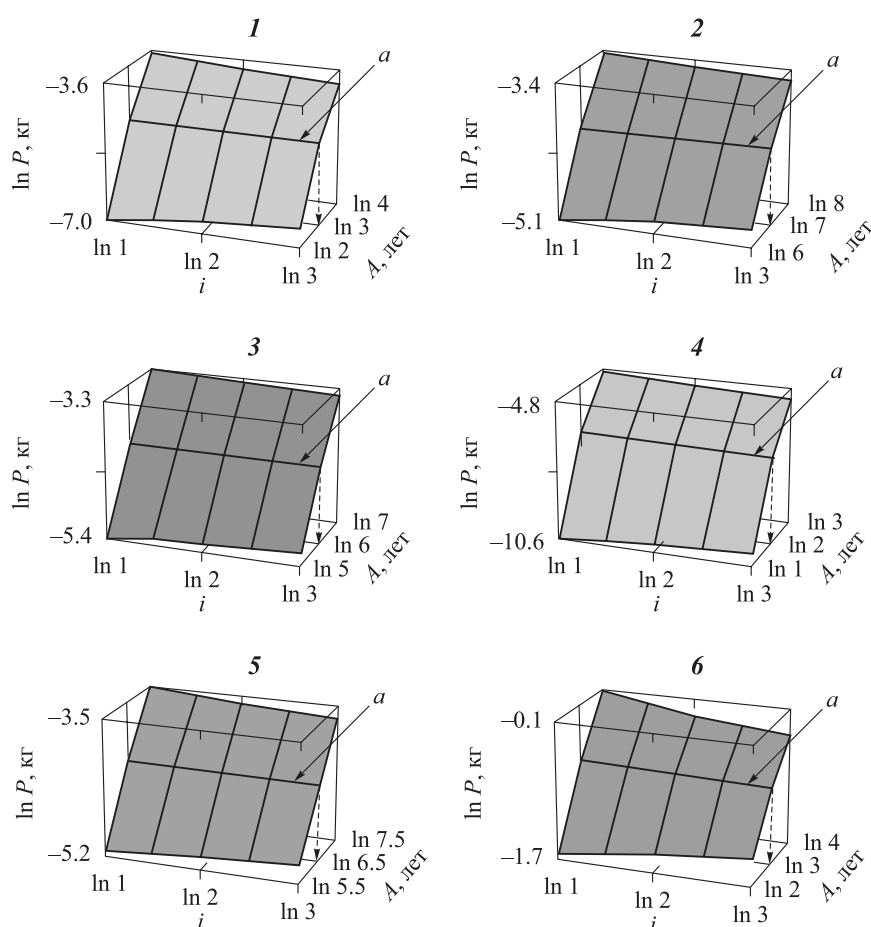


Рис. 6. Диаграммы, показывающие в каком возрасте дерева происходит смена знака регрессионного коэффициента b_1 модели 4.

a – линия, параллельная оси $(\ln i)$, показывает, в каком возрасте (пунктирная стрелка) значения всех фракций фитомассы равны между собой.

4 года), и между этими данными и материалами исходной базы (Usoltsev, 2020) имеется примерно 10–20-летний пробел, вызванный отсутствием фактических данных. По мере заполнения названного пробела фактическими данными возраст смены знака коэффициента конкуренции за ресурс в разработанной модели, а также коэффициент, особенно для семян, должны корректироваться.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антанайтис В. В., Тябера А. П., Шяпетене Я. А. Законы, закономерности роста и строения древостоев: Метод. пособ. Каунас: Литов. с.-х. акад., 1986. 157 с.
- Воробейчик Е. В. Статическая аллометрия в случае существенно неоднородных выборок: опасность артефакта // Сиб. экол. журн. 2001. Т. 8. № 5. С. 631–636.
- Ворожьев В. Н., Хамитов Р. С. Влияние состояния филотаксиса на показатели роста семян кедр сибирского // Вестн. Иркут. гос. с.-х. акад. 2015. Вып. 69. С. 46–52.
- Данилов Ю. И., Попова А. А., Бурцев Д. С. Использование компостов из твердых бытовых отходов в питомниках для удобрения посевов сосны и ели // Лес-2009: Материалы X Междунар. науч.-тех. конф. Брянск: БГИТА, 2009. С. 1–4.
- Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня: сб. перевод. ст. М.: Знание, 1974. С. 5–49.
- Иванчиков А. А. Биологическая и хозяйственная продуктивность сосняков Карелии // Лесные растительные ресурсы Южной Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1971. С. 78–85.
- Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 304 с.
- Комаров А. С. Смена парадигмы математического моделирования в экологии // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / ред. В. Н. Кудеяров. М.: Наука, 2007. С. 13–19.
- Комаров А. С., Гинжур Л. К., Шанин В. Н., Быховец С. С., Бобкова К. С., Кузнецов М. А., Манов А. В., Осипов А. Ф. Особенности распределения биомассы бо-

- реальных видов деревьев по фракциям // Изв. РАН. Сер. биол. 2017. № 6. С. 656–664.
- Кофман Г. Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 211 с.
- Мамаев А. А., Жемкова Е. С. Влияние субстратов на рост семян сосны горной с ЗКС в Ботаническом саду-институте ПГТУ // Междунар. журн. гуман. и естеств. наук. 2019. № 1. С. 112–114.
- Мина Н. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. М.: Наука, 1976. 291 с.
- Мухомтов Д. И., Антропова А. В. Рост и развитие семян сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности сложения // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: Междунар. сб. науч. ст. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-т, 2019. С. 42–53.
- Оплетаев А. С., Залесов С. В., Башегуров К. А., Осипенко А. Е., Жигулин Е. В. Влияние способа полива на рост и фитомассу семян лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) // Междунар. науч.-иссл. журн. 2021. № 11 (113). Ч. 1. С. 160–165.
- Острошенко В. В., Острошенко Л. Ю., Острошенко В. Ю. Влияние корневой подкормки стимуляторами роста одно-двухлетних семян пихты почкочешуйной *Abies nephrolepis* (Trautv.) на их дальнейший рост // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 10. С. 160–167.
- Палуметс Я. К. Опыт моделирования распределения фитомассы ели // Лесоведение. 1990. № 3. С. 43–48.
- Подлазов А. В. Закон Ципфа и модели конкурентного роста // Новое в синергетике. Нелинейность в современном естествознании / Ред. Г. Г. Малинецкий. М.: Либроком, 2009. С. 229–256.
- Рачко П. Имитационная модель динамики роста дерева как элемента биогеоценоза // Пробл. кибернетики. 1979. Вып. 52. С. 73–111.
- Розенберг Г. С. Математическое моделирование фитотических систем // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1980. Т. 85. Вып. 2. С. 79–88.
- Соловьев В. А., Нян Ч. Т., Шорохова Е. В. Распределение углерода по фракциям фитомассы различных древостоев и лесного массива // Изв. СПбГЛТА. 2012. Вып. 198. С. 33–40.
- Стаканов В. Д. Распределение органического вещества в различных частях деревьев сосны обыкновенной // Лесоведение. 1990. № 4. С. 25–32.
- Суховольский В. Г. Распределение фитомассы деревьев по фракциям и оценка биопроductивности деревьев и насаждений // Лесоведение. 1996. № 1. С. 30–40.
- Суховольский В. Г. Свободная конкуренция фракций дерева за ресурсы и аллометрические соотношения // Журн. общ. биол. 1997. Т. 58. № 5. С. 80–88.
- Суховольский В. Г. Экономика живого: Оптимизационный подход к описанию процессов в экологических сообществах и системах. Новосибирск: Наука, 2004. 140 с.
- Суховольский В. Г., Иванова Ю. Д. Оценка чистой первичной продукции лесных насаждений с использованием модели распределения фитомассы по фракциям // Лесоведение. 2013. № 5. С. 20–28.
- Суховольский В. Г., Иванова Ю. Д. Рост лесных насаждений как аналог процесса производства в экономических системах: У2Е-модель // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 20–31.
- Суховольский В. Г., Иванова Ю. Д., Ковалев А. В. Рост насаждений кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour разных бонитетов: оценка влияния регулирующих факторов // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. 40. № 5. С. 388–394.
- Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. ун-та, 1985. 191 с.
- Усольцев В. А. Принципы и методика составления таблиц биопроductивности древостоев // Лесоведение. 1988. № 2. С. 24–33.
- Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесобразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 384 с.
- Фёрстер Э., Рёнь Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Руководство для экономистов. М.: Финансы и статистика, 1983. 302 с. (пер. с нем.).
- Фрейберг И. А., Ермакова М. В., Стеценко С. К. Модификации морфологии и фитомассы семян сосны обыкновенной под влиянием пестицидов // Леса Урала и хоз-во в них. 1998. Вып. 20. С. 166–170.
- Цепордей И. С., Усольцев В. А. Всеобщий характер действия закона Либиха – Шелфорда на биологическую продуктивность лесобразующих видов в климатических градиентах Евразии // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер: Лес. Экол. Природопольз. 2022. № 4 (56). С. 5–18.
- Чертков О. Г., Комаров А. С., Зудин С. Л., Михайлов А. В. Базовая модель роста дерева, основанная на экологических параметрах // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. С. 147–156.
- Шмитхюзен И. Общая география растительности. М.: Прогресс, 1966. 310 с. (пер. с нем.).
- Якимов Н. И., Поплавская Л. Ф., Сероглазова Л. М. Влияние состава субстрата на рост и развитие семян сосны с закрытой корневой системой // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 1. Лесн. хоз-во. 2004. Вып. 12. С. 189–192.
- Assmann E. Waldertragskunde: Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München, Bonn, Wien: BLV Verlagsgesellschaft, 1961. 492 p.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. N. 1. P. 49–53.
- Benguigui L., Blumenfeld-Lieberthal E. A dynamic model for city size distribution beyond Zipf's law // Phys. A: Statistical mechanics and its applications. 2007. V. 384. Iss. 2. P. 613–627.
- Davidson R. L. Effect of root/leaf temperature differentials on root/shoot ratios in some pasture grasses and clover // Ann. Bot. (N. S.). 1969. V. 33. N. 3. P. 561–569.
- Delerue F., Scattolin M., Atteia O., Cohen G. J., Franceschi M., Mench M. Biomass partitioning of plants under soil pollution stress // Comm. Biol. 2022. V. 5. N. 1. Article number: 365.
- Delong V. A. Zipf's law and zeta distribution. BSc Thesis. Czech Tech. Univ. Prague, 2011. 60 p.
- Deng C., Ma F., Xu X., Zhu B., Tao J., Li Q. Allocation patterns and temporal dynamics of Chinese fir biomass in Hunan Province, China // Forests. 2023. V. 14. N. 2. Article number: 286.

- Dhar P. K., Giuliani A. Laws of biology: why so few? // Syst. Synth. Biol. 2010. V. 4. N. 1. P. 7–13.
- Dubois E. Sur le rapport du poids de l'encéphale avec la grandeur du corps chez les mammifères // Bull. Soc. d'Anthrop. Paris. 1897. V. 8. P. 337–376.
- Enquist B. J., Niklas K. J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants // Science. 2002. V. 295. N. 5559. P. 1517–1520.
- Ivancheva L. E. The non-Gaussian nature of bibliometric and scientometric distributions: A new approach to interpretation // J. Amer. Soc. Inf. Sci. Technol. 2001. V. 52. Iss. 13. P. 1100–1105.
- Komarov A. S., Ginzul L. K., Shanin V. N., Bykhovets S. S., Bobkova K. S., Kuznetsov M. A., Manov A. V., Osipov A. F. Pattern of biomass partitioning into fractions of boreal trees // Biol. Bull. 2017. V. 44. Iss. 6. P. 626–633 (Original Rus. Text © A. S. Komarov, L. K. Ginzul, V. N. Shanin, S. S. Bykhovets, K. S. Bobkova, M. A. Kuznetsov, A. V. Manov, A. F. Osipov, 2017, publ. in Izv. Akad. Nauk. Ser. Biol. 2017. N. 6. P. 656–664).
- Liu R., Yang X., Gao R., Hou X., Huo L., Huang Z., Cornelissen J. H. C. Allometry rather than abiotic drivers explains biomass allocation among leaves, stems and roots of *Artemisia* across a large environmental gradient in China // J. Ecol. 2020. V. 109. Iss. 2. P. 1026–1040.
- Mandelbrot B. Final note on a class of skew distribution functions: Analysis and critique of a model due to H. A. Simon // Inform. & Control. 1961. V. 4. N. 2–3. P. 198–216.
- McCarthy M. C., Enquist B. J., Kerkhoff A. J. Organ partitioning and distribution across the seed plants: assessing the relative importance of phylogeny and function // Int. J. Plant Sci. 2007. V. 168. N. 5. P. 751–761.
- Møller A. P., Jennions M. D. How much variance can be explained by ecologists and evolutionary biologists? // Oecologia. 2002. V. 132. N. 4. P. 492–500.
- Nilsson U., Albrektson A. Productivity of needles and allocation of growth in young Scots pine trees of different competitive status // For. Ecol. Manag. 1993. V. 62. P. 173–187.
- Oliver C. D., Larson B. C. Forest stand dynamics. Biol. Res. Manag. Ser. New York: McGraw-Hill, 1990. 467 p.
- Palumets J. K. Analysis of phytomass partitioning in Norway spruce. VIII Scripta Bot. Tartu: Univ. Press., 1991. 95 p.
- Poorter H., Jagodzinski A. M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V. A., Buckley T. N., Reich P. B., Sack L. How does biomass distribution change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // New Phytol. 2015. V. 208. Iss. 3. P. 736–749.
- Poorter H., Niklas K. J., Reich P. B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control // New Phytol. 2012. V. 193. N. 1. P. 30–50.
- Snell O. Die Abhängigkeit des Hirngewichtes von dem Körpergewicht und den geistigen Fähigkeiten // Arch. für Psychiatrie und Nervenkrankheiten. 1892. V. 23. P. 436–446.
- Thompson D. A. On growth and form. Cambridge Univ. Press, 1917. 793 p.
- Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural St. For. Engineer. Univ.; Bot. Garden, Ural Br. Rus. Acad. Sci., 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9647>
- Waring R. H. Site, leaf area and phytomass production in trees In: Mountain environments and subalpine tree growth: Proc. IUFRO. Workshop, Nov., 1979, Christchurch, New Zealand. Wellington, New Zealand: NZ For. Serv., For. Res. Inst., 1980. P. 125–136.
- Warren W. G. Record of preplanned and spontaneous discussions concerning the paper by Furnival G. M. and Wilson R. W. «Systems of equations for predicting forest growth and yield» // Stat. Ecol. 1971. V. 3. P. 56–57.
- West G. B., Brown J. H., Enquist B. J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology // Science. 1997. V. 276. N. 5309. P. 122–126.

RANK DISTRIBUTION OF A TREE PHYTOMASS FRACTIONS IN NEW INTERPRETATION

V. A. Usoltsev^{1, 2}, I. S. Tsepordey¹

¹ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta Str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Due to the observed climatic shifts, the problem of an adequate assessment of the carbon depositing capacity of forests and its possible climate-related changes is being actualized. To achieve optimal plant productivity, a certain proportionality between its constituent organs must be ensured, which depends, among other things, on the relative amount of biomass in these organs. In contrast to the theories of metabolic scaling and adaptive mass distribution, the study performed is associated with a concept based on non-Gaussian distributions. Using published data on biomass of 4515 trees of forest-forming coniferous genera of Eurasia, a new concept of ranking biomass fractions based on a modified Zipf-Pareto model is presented. Since the stem and branches of the tree perform the same function in its architectonics, namely, the implementation of xylem and phloem transport and the maintenance of the assimilation apparatus of the tree in the canopy space, we combine these two components into one common block when ranking biomasses. Since the 1-year-old seedling has no branches, and the needles are attached directly to its stem (the axis of the initial sprout), combining the biomasses of the stem and branches into a single block allowed us to consider the dynamics of the distribution of biomasses in the plant in the total age range, from seedlings to mature trees. Having accepted the ranking of biomasses in the sequence: stem plus branches, roots and needles, we established a positive relationship of the biomass with its rank at the initial stage of plant growth. As the plant grows, the named positive relationship changes its sign and becomes negative one. The presented regularity is confirmed statistically at the level of $p < 0.999$. The change of the sign of the coefficient of competition for a resource occurs in all the genera in a fairly narrow age range between 2 and 7 years.

Keywords: *Pinus L., P. sibirica Du Tour, P. koraiensis Siebold & Zucc., Abies Mill., Picea A. Dietr., Larix Mill., Cryptomeria D. Don., theories of assimilate distribution in a tree, the Zipf-Pareto model, the coefficient of competition for a resource, the age change of the sign of the coefficient of competition for a resource.*

How to cite: Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Rank distribution of a tree phytomass fractions in new interpretation // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 41–51 (in Russian with English abstract and references).

УДК 630.165 (571.151)

ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЕМЯН КЕДРА СИБИРСКОГО НА ЛЕСОСЕМЕННЫХ ОБЪЕКТАХ В РЕСПУБЛИКЕ АЛТАЙ

Л. И. Бородинцева¹, В. В. Тараканов^{1, 2}, Т. В. Гончарова^{2, 3}

¹ Западно-Сибирское отделение Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН
630082, Новосибирск, ул. Жуковского, 100/1

² Новосибирский государственный аграрный университет
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160

³ Центр защиты леса Новосибирской области – филиал Российского центра защиты леса
630015, Новосибирск, ул. Гоголя, 221

E-mail: altay-lss@yandex.ru, tarh012@mail.ru, tato4ka0909@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023 г.

Приведены результаты исследования семенной продуктивности и посевных качеств семян на лесосеменных объектах кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в Пыжинском участковом лесничестве Турочакского лесничества Республики Алтай. Объектами исследований были лесосеменные плантации первого порядка (ЛСП) и постоянные лесосеменные участки улучшенного происхождения, созданные в 1980–1988 гг. саженцами плюсовых деревьев на площади 22,8 га. Семенная продуктивность и качества семян оценивались в средний по урожайности год общепринятыми методами. Средняя урожайность семян составила 31 кг/га, при варьировании по объектам от 8 до 73 кг/га, размеры шишек – 7.0×5.4 см, при варьировании от 4.5×4.0 до 9.0×6.0 см. Установлено, что основной вклад в изменчивость урожайности вносит возраст, который составлял на момент исследований 27–34 года. Выход семян из шишек и жизнеспособность семян несколько снижены в сравнении с естественными насаждениями. Наиболее высокой урожайностью (73 кг/га) и жизнеспособностью семян (87 %) отличается самая большая по возрасту лесосеменная плантация закладки 1980 г. На основе этого сделан прогноз о достижении ЛСП семенной продуктивности, свойственной спелым кедровникам Алтая (150 кг/га), к 50 годам. Наименее изменчивыми признаками являются размеры шишек и семян и индексы их формы (коэффициенты вариации около 9–10 %). Промежуточными и довольно нестабильно воспроизводимыми на различных объектах являются коэффициенты вариации жизнеспособности семян (5–58 %). Очевидно, это обусловлено различиями в эффективности опыления вследствие разного возраста древостоев. Наибольшей изменчивостью (от 30 до 200 % и более) отличаются весовые и счетные показатели.

Ключевые слова: *Pinus sibirica* Du Tour; лесосеменные плантации первого порядка, постоянные лесосеменные участки улучшенного происхождения, урожайность, жизнеспособность семян.

DOI: 10.15372/SJFS20230405

ВВЕДЕНИЕ

В России с середины 70-х годов XX в. по настоящее время осуществляется создание объектов постоянной лесосеменной базы на генетико-селекционной основе с целью производства селекционно улучшенных семян лесообразующих пород. Важнейшим лесообразователем в Сибири, в частности на Алтае, вовлеченным в программы по селекции, является кедр сибир-

ский (Ирошников, 1982; Горошкевич, 2000; Кузнецова, 2007; Матвеева и др., 2017).

За прошедшее время в Республике Алтай отобрано 456 плюс-деревьев этой ценной породы. Плюсовые деревья отбирали по трем признакам (направлениям): 1) семенная продуктивность, 2) скорость роста, 3) смолопродуктивность. Вегетативным потомством плюс-деревьев создано более 50 га лесосеменных плантаций (ЛСП) и архивов клонов, а также 6,2 га постоянных ле-

сосеменных участков (ПЛСУ) на улучшенной генетической основе (Кальченко и др., 2011; Ильичев, 2012; Ильичев, Тараканов, 2013; Ильичев, Тюменцев, 2014; Ильичев, Шуваев, 2016; Кальченко, Карасева, 2020). В связи с необходимостью лесовосстановления, а также запретом на рубку и подсочку кедровых насаждений на современном этапе, особенно актуален вопрос о семенной продуктивности созданных объектов. Это относится и к ЛСП, на которых сконцентрированы потомства плюсов-деревьев, отобранных на другие целевые признаки (интенсивность роста и смолопродуктивность). Вопрос о семенной продуктивности производственных лесосеменных объектов кедр на Алтае практически не освещён в литературе.

Цель исследований заключалась в оценке семенной продуктивности и качества семян на клоновых ЛСП первого порядка и ПЛСУ кедр сибирского, созданных в Республике Алтай.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лесосеменные объекты кедр сибирского сосредоточены на крупнейшем в Сибири лесном селекционном питомнике близ с. Усть-Пыжа в Турочакском районе Республики Алтай. Окружающие насаждения кедр растут по II классу бонитета.

Полевые исследования проведены в августе 2011 г. Объектами изучения были клоновые лесосеменные плантации первого порядка и постоянные лесосеменные участки улучшенного происхождения, созданные в 1980–1988 гг. саженцами плюсовых деревьев на площади 22.8 га: ЛСП-1980 (5.0 га); ЛСП-1981 (2.5 га); ЛСП-1984 (7 га); ЛСП-1986 (9.93 га); ЛСП-1988 (3.2 га); ПЛСУ-1984 (0.7 га) и ПЛСУ-1987 (0.8 га). ПЛСУ представляют собой бывшие ЛСП, для которых утеряны схемы размещения/смещения клонов, в связи с чем их перевели в категорию ПЛСУ. Деревья при посадке размещали по схеме 6 × 8 м (208 шт./га). Прививка, выращивание и посадка привитых саженцев осуществлялись общепринятыми способами и подробно описаны в литературе (Ильичев, 2012).

Учет ожидаемого урожая на лесосеменных объектах кедр сибирского проводили по методике Т. П. Некрасовой (1961) на стандартных пробных площадях по 0.25 га. Признаки семенной продуктивности и качество семян с лесосеменных объектов исследовали в августе по смешанным образцам из 10 зрелых шишек случайной выборки.

В лабораторных условиях общепринятыми методами для каждой шишки оценивали ее размеры и размеры семян (длину, ширину); их количество и массу; число полнозерных и пустых, а также жизнеспособных и нежизнеспособных. Измерения семян проводили из расчета 25 шт. семян на 1 шишку. Жизнеспособность определяли по ГОСТ 13056.7-93 (1995) с применением индигокармина 0.05%-й концентрации на свету при комнатной температуре в течение 2 ч. Посевные качества определяли по ГОСТ 14161-86 (1986). Математическую обработку материала проводили с использованием стандартных методов математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В 2011 г. на лесосеменных объектах кедр сибирского старше 20 лет наблюдался средний урожай шишек. Биологический возраст привитых деревьев на момент исследований составил от 27 до 34 лет. Средняя поврежденность шишек, преимущественно шишковой огневкой (*Dioryctria abietella* (Denis & Schiffermüller)), достигала 10 %. Отличие в урожайности ПЛСУ и ЛСП соответствующих возрастов было незначительным. В среднем на пробной площади насчитывалось 20 плодоносящих деревьев, или 71 % от общего числа (табл. 1).

Среднее число шишек составило около 21 шт./дер., или 1770 шт./га, урожайность семян – 31 кг/га, пока уступает урожайности спелых кедровников Алтая, которая составляет более 150 кг/га (Титов, 2020), но уже сопоставима со средней урожайностью кедровников Бурятии, которая составляет около 32 кг/га (Традиционное природопользование..., 2007). Выход семян также снижен в сравнении с естественными кедровниками – 25 % против 47 % (Данченко и др., 2016). Жизнеспособность семян варьирует по ЛСП в пределах 51–87 % (от 3-го до 1-го класса качества согласно ГОСТ 13056.7-93 (1995), составляя в среднем около 70 %). Очевидно, сниженные показатели урожайности и качества семян обусловлены относительно небольшим возрастом деревьев, повреждением части шишек энтомофагами и недостаточным опылением. Более низкая жизнеспособность семян характерна для ПЛСУ. При этом масса 1000 шт. полнозерных семян на всех объектах довольно высока – 254 г (табл. 1–3).

Нельзя не отметить существенную связь многих показателей – числа плодоносящих деревьев, массы семян и шишек на дереве и на

Таблица 1. Общая характеристика урожая на лесосеменных объектах кедр сибирского Республики Алтай

Показатель	ЛСП-1980	ЛСП-1981	ЛСП-1984	ЛСП-1986	ЛСП-1988 (1.0 га)	ЛСП-1988 (2.2 га)	ПЛСУ-1984	ПЛСУ-1987	Лимиты
Количество плодоносящих деревьев, шт./га	120	128	88	56	56	36	92	52	36–128
Доля плодоносящих деревьев, %	95	84	70	100	82	43	40	57	40–100
Среднее число шишек на 1 плодоносящем дереве, шт.	30	28	20	22	17	15	18	16	15–30
Количество шишек: шт./га	3600	3584	1760	1232	952	540	1656	832	540–3600
шт./кг сырья	11	13	12	13	13	15	18	15	11–18
Масса шишек, кг/га: всех	327	276	147	95	73	36	92	55	36–327
здоровых	294	248	132	86	66	32	83	50	32–294
Урожайность семян, кг/га	74	62	33	21	16	8	21	12	8–74
Масса 1000 семян, г	292	248	278	264	284	243	214	209	209–292
Выход полнозерных семян из шишек, %	27	23	25	24	31	20	15	15	15–31
Общий урожай семян на обследованных объектах, кг	368	155	23	213	16	18	15	10	818*

* Сумма.

Таблица 2. Изменчивость признаков шишек и семян на лесосеменных плантациях кедр сибирского ($X \pm m$)

Признак	ЛСП-1980	ЛСП-1981	ЛСП-1984	ЛСП-1986	ЛСП-1988		Среднее	
					1.0 га	2.2 га	$X \pm m$	$CV, \%$
Размер шишек, см: длина (ДШ)	7.7 ± 0.1	7.0 ± 0.2	7.6 ± 0.1	7.2 ± 0.2	7.7 ± 0.2	6.3 ± 0.4	7.2 ± 0.1	12.2
ширина (ШШ)	5.6 ± 0.1	5.3 ± 0.2	5.6 ± 0.1	5.9 ± 0.1	5.6 ± 0.1	5.1 ± 0.1	5.5 ± 0.1	7.0
ШШ/ДШ	0.7 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.8 ± 0.0	9.9
Размер семян, см: длина (ДС)	1.2 ± 0.0	1.1 ± 0.0	1.3 ± 0.0	1.2 ± 0.0	1.2 ± 0.0	1.2 ± 0.0	1.2 ± 0.0	8.3
ширина (ШС)	0.8 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.9 ± 0.0	0.9 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.9 ± 0.0	9.4
ШС/ДС	0.7 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.7 ± 0.0	0.7 ± 0.0	10.2
Масса семян, г/шишку: всех	28.7 ± 1.3	22.4 ± 2.3	25.0 ± 1.7	24.9 ± 2.1	27.2 ± 2.2	18.8 ± 3.2	24.4 ± 1.0	31.2
пустых	1.4 ± 0.2	3.3 ± 0.5	2.1 ± 0.4	5.1 ± 0.8	1.9 ± 0.2	4.5 ± 0.7	3.1 ± 0.3	69.4
Число семян, шт./шишку: всех	98.3 ± 3.8	90.2 ± 7.5	89.6 ± 3.6	94.5 ± 5.0	95.5 ± 5.7	77.5 ± 5.5	90.8 ± 2.2	19.2
пустых	87.9 ± 3.3	62.4 ± 6.9	73.6 ± 5.6	58.3 ± 8.7	81.0 ± 5.9	42.6 ± 9.8	67.2 ± 3.5	40.1
полнозерных	10.4 ± 1.6	27.6 ± 3.5	16.0 ± 2.8	36.1 ± 6.3	14.5 ± 2.1	34.9 ± 6.4	23.8 ± 2.2	72.4
с живым зародышем	85.7 ± 3.4	58.6 ± 6.8	70.9 ± 5.6	57.0 ± 8.5	79.9 ± 5.9	42.6 ± 9.8	65.4 ± 3.4	40.6
с погибшим зародышем	1.4 ± 0.2	2.0 ± 0.2	1.3 ± 0.5	0.5 ± 0.3	0.7 ± 0.5	0.0	0.9 ± 0.2	126.4
без зародыша	0.8 ± 0.3	1.6 ± 0.4	1.4 ± 0.5	0.8 ± 0.3	0.4 ± 0.2	0.0	0.8 ± 0.1	1378.0
Жизнеспособность семян, %	87.2 ± 1.6	64.1 ± 3.6	78.3 ± 3.8	59.3 ± 7.0	83.3 ± 2.6	51.1 ± 9.0	70.2 ± 2.8	30.9

1 га – с возрастом насаждений. Соответствующие коэффициенты корреляции превышают 0.95 ($p < 0.05$). Если спрогнозировать урожайность семян на несколько десятилетий вперед, используя логарифмическую аппроксимацию, то уровня урожайности спелых кедровников около 150 кг/га плантации достигнут уже к 50 годам

(см. рисунок). Это свидетельствует о высоком семеноводческом потенциале клоновых ЛСП кедр сибирского на Алтае.

Морфометрические признаки шишек и семян в изученном диапазоне возраста деревьев довольно стабильны. Размеры шишек составляют в среднем около 5.5×7.3 см, семян – 0.8–

Таблица 3. Изменчивость признаков шишек и семян на постоянных лесосеменных участках кедров сибирского

Признак	ПЛСУ-1984		ПЛСУ-1987		Среднее	
	$\bar{X} \pm m$	CV, %	$\bar{X} \pm m$	CV, %	$\bar{X} \pm m$	CV, %
Размер шишек, см:						
длина (ДШ)	5.7 ± 0.3	16.1	6.8 ± 0.3	12.2	6.3 ± 0.2	16.4
ширина (ШШ)	5.0 ± 0.2	10.0	5.4 ± 0.1	3.6	5.2 ± 0.1	8.1
ШШ/ДШ	0.9 ± 0.0	14.6	0.8 ± 0.0	9.1	0.8 ± 0.0	13.3
Размер семян, см :						
длина (ДС)	1.2 ± 0.0	4.8	1.2 ± 0.0	5.4	1.2 ± 0.0	6.3
ширина (ШС)	0.8 ± 0.0	7.8	0.9 ± 0.0	8.3	0.9 ± 0.0	9.8
ШС/ДС	0.7 ± 0.0	8.6	0.7 ± 0.0	9.7	0.7 ± 0.0	10.8
Масса семян, г/шишку:						
всех	10.7 ± 2.0	58.9	15.8 ± 1.4	29.7	13.4 ± 1.3	44.6
пустых	2.5 ± 0.6	72.6	6.1 ± 0.6	30.0	4.4 ± 0.6	58.9
Число семян, шт./шишку:						
всех	50.2 ± 9.0	56.9	75.5 ± 5.6	24.4	63.5 ± 5.8	41.9
полнозерных	29.5 ± 6.4	68.1	30.5 ± 3.9	42.7	30.0 ± 3.6	54.4
пустых	20.7 ± 4.6	69.5	45.1 ± 4.0	29.3	33.5 ± 4.0	54.8
с живым зародышем	29.1 ± 6.3	68.8	30.0 ± 3.8	42.4	29.6 ± 3.5	54.7
с погибшим зародышем	0.2 ± 0.1	210.8	0.1 ± 0.1	331.7	0.1 ± 0.1	251.0
без зародыша	0.2 ± 0.1	210.8	0.4 ± 0.2	138.7	0.3 ± 0.1	162.0
Жизнеспособность, %	58.7 ± 4.5	24.4	38.5 ± 4.2	35.7	48.1 ± 3.7	35.6

1.2 см. Индекс формы обоих органов варьирует в узких пределах (0.7–0.8).

Из признаков, оцениваемых коэффициентами вариации, наиболее стабильны размерные и их отношения, которые на ЛСП редко выходят за пределы 9–10 %. Размерные признаки шишек на ПЛСУ отличаются несколько большей изменчивостью.

Промежуточными и довольно нестабильно воспроизводимыми на различных объектах считаются коэффициенты вариации жизнеспособности семян (5–58 %). Вероятно, это обусловлено различиями в эффективности опыления вследствие разного возраста деревьев на объектах. Наибольшей изменчивостью отлича-

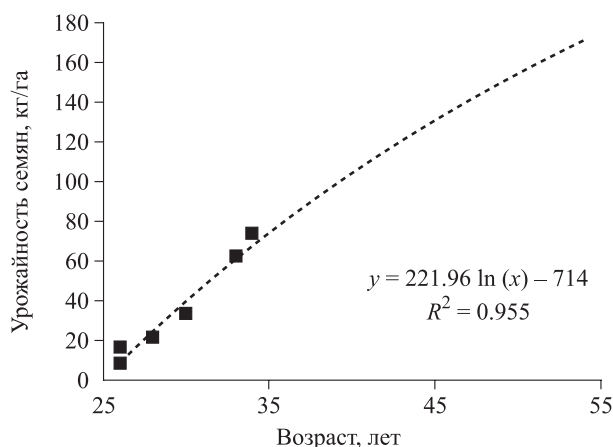
ются весовые и счётные показатели – от 30 до 200 % и более. Если сравнивать различные плантации, то самая лучшая из них – ЛСП-1980 площадью 5.0 га.

По-видимому, это в значительной мере обусловлено ее относительно большим возрастом. В более плохом состоянии, особенно по жизнеспособности семян, находится ПЛСУ-1987. Вероятно, это в значительной мере связано с его небольшим возрастом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка изменчивости 15 признаков семенной продуктивности в 27–34-летних ЛСП и ПЛСУ кедров сибирского свидетельствует об их высоком семеноводческом потенциале. На момент исследований они продуцировали около 31 кг семян на 1 га. Прогнозирование урожайности с учетом ее зависимости от возраста насаждений показывает, что к 50 годам они достигнут урожайности взрослых естественных кедров на уровне около 150 кг/га.

Пока что выход семян на ЛСП и ПЛСУ несколько снижен в сравнении с естественными кедровниками и составляет в среднем около 22 %. Жизнеспособность семян составляет в среднем около 70 %. Очевидно, сниженные показатели урожайности и качества семян обусловлены относительно небольшим возрастом деревьев, повреждением части шишек энтомо-



Зависимость урожайности семян кедров сибирского от возраста деревьев на ЛСП.

вредителями и недостаточным опылением. При этом масса 1000 шт. полнозерных семян на всех объектах довольно высока и составляет 254 г.

Относительно стабильны и мало отличаются от естественных насаждений размеры шишек и семян. Наиболее изменчивы весовые и счетные показатели семенной продуктивности. Из всех объектов лучшей по показателям семенной продуктивности оказалась самая большая по возрасту лесосеменная плантация 1980 г. закладки. В связи с вступлением многих ЛСП в возраст активного семеношения создаётся возможность для дальнейшей селекции по этому признаку, в том числе с учётом качества семян отдельных клонов. В этой связи необходимы специальные исследования.

Полученные данные могут быть использованы лесохозяйственными предприятиями для планирования мероприятий по сбору и посевам улучшенных семян с объектов постоянной лесосеменной базы.

В заключение подчеркнём, что обследование ЛСП кедрового сибирского было проведено до развития на них эпифитотии опасного возбудителя болезни красной пятнистости хвои, или дотистромоза, вызываемого крайне опасным патогенным грибом *Dothistroma septosporum* (Dorogin) M. Morelet (Ильичев, Шуваев, 2016). В последующем это могло отрицательно повлиять на все параметры семенной продуктивности, в связи с чем также необходимы специальные исследования.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела Алтайской лесосеменной станции В. Я. Мирошниченко и О. В. Гусевой за помощь в камеральной обработке материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горошкевич С. Н. Селекция кедрового сибирского как орехоплодной породы: актуальность, состояние и перспективы // Лесн. хоз-во. 2000. № 4. С. 25–27.
ГОСТ 13056.7-93. Семена деревьев и кустарников. Методы определения жизнеспособности. Взамен ГОСТ 13056.7-68; введ. с 01.07.87 по 01.07.92. М.: Изд-во стандартов, 1995. 39 с.
ГОСТ 14161-86. Семена хвойных древесных пород. Посевные качества. Технические условия. Взамен ГОСТ

14161-69; Введ. 1995.01.01. М.: Изд-во стандартов 1986. 11 с.
Данченко А. М., Данченко М. А., Мясников А. Г., Бех И. А. Кедр России. Томск: Изд. дом Том. гос. ун-та, 2016. 298 с.
Ильичев Ю. Н. Генетико-селекционные объекты кедрового сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в Республике Алтай: структура, стратегия совершенствования и использования // Хвойные бореал. зоны. 2012. Т. 30. № 1–2. С. 87–91.
Ильичев Ю. Н., Тараканов В. В. Смолопродуктивность кедрового сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на клоновых плантациях плюсовых деревьев, отобранных на различные целевые признаки // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы Междунар. науч.-практ. форума, Хабаровск, 25–26 октября 2012 г. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2013. С. 82–85.
Ильичев Ю. Н., Тюменцев Д. А. Характеристика габитуальных признаков клонов кедрового сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) разной смолопродуктивности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 3. № 2. С. 316–321.
Ильичев Ю. Н., Шуваев Д. Н. Состояние клоновых объектов кедрового сибирского *Pinus sibirica* Du Tour Республики Алтай: сохранность и перспективы селекции // Сиб. лесн. журн. 2016. № 5. С. 33–44.
Ирошников А. И. Кедровые сосны // Селекция лесных пород. М: Лесн. пром-сть, 1982. С. 121–126.
Кальченко Л. И., Бондарев А. Я., Ильичев Ю. Н. Состояние и динамика объектов ЕГСК хвойных лесобразующих видов в Республике Алтай // Сохранение лесных генетических ресурсов Сибири: Материалы 3-го Междунар. совещ., Красноярск, 23.09.2011. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2011. С. 65–66.
Кальченко Л. И., Карасева Т. А. О создании и состоянии объектов единого селекционного комплекса Алтайского края и Республики Алтай // Аграрная наука – сельскому хозяйству. XV Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул: Алтай. гос. агр. ун-т, 2020. Кн. 1. С. 229–230.
Кузнецова Г. В. Изучение изменчивости у климатипов кедрового сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на юге Красноярского края // Хвойные бореал. зоны. 2007. Т. 24. № 4–5. С. 423–426.
Матвеева Р. Н., Милютин Л. И., Буторова О. Ф., Братилова Н. П. Отбор деревьев кедрового сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // ИВУЗ. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 9–20.
Некрасова Т. П. Плодоношение кедрового в Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. 68 с.
Титов Е. В. Стратегия повышения объёмов орехозаготовок кедрового сибирского // Хвойные бореал. зоны. 2020. Т. 38. № 1–2. С. 48–52.
Традиционное природопользование: культурно-бытовые и хозяйственные аспекты: учеб. пособ. / Под ред. В. А. Тайшина. М.: Акад. естествознания, 2007. 202 с.

PRODUCTIVITY AND QUALITY OF SEEDS OF THE SIBERIAN STONE PINE ON FOREST SEED ORCHARDS IN THE REPUBLIC OF ALTAI

L. I. Borodintseva¹, V. V. Tarakanov^{1, 2}, T. V. Goncharova^{2, 3}

¹ West Siberian Division of V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch – Branch of the Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Zhukovskiy Str., 100/1, Novosibirsk, 630082 Russian Federation

² Novosibirsk State Agrarian University
Dobrolyubov Str., 160, Novosibirsk, 630039 Russian Federation

³ Center for Forest Protection of Novosibirsk Oblast – Branch of the Russian Center for Forest Protection
Gogol' Str., 221, Novosibirsk, 630015 Russian Federation

E-mail: altay-lss@yandex.ru, tarh012@mail.ru, tato4ka0909@mail.ru

The results of a study of seed productivity and sowing qualities of seeds on forest seed objects of the Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in the Pyzhinsky Forestry Compartment of the Turochaksky Forestry District of the Republic of Altai are discussed in the article. The objects of the studies were forest seed orchards of the first order and permanent forest seed plots of improved origin, created in 1980–1988 by seedlings of a plus trees on the area of 22.8 hectares. Evaluation of seed productivity and seed quality was carried out in the average-yield's year by standard methods. The average seed yield was 31 kg/ha, varying by objects from 8 to 73, the size of the cones was 7.0×5.4 cm, varying from 4.5×4.0 to 9.0×6.0 cm. The main contribution to the variability of yield indicators is determined by the age, which at the time of the studies was 27–34 years. So far, the yield of seeds from cones and the viability of seeds are reduced somewhat in comparison with natural stands. The highest yield (73 kg/ha) and viability of seeds (87 %) is in the most mature forest seed orchard. Based on the dependence of the yield on age, a forecast was made that the forest seed orchard will achieve the natural Siberian stone pine forests of Altai's seed productivity (150 kg/ha) to the age of 50. The least variable traits are the sizes of cones and seeds and their shape indices (variation coefficients are about 9–10 %). Intermediate and rather unstable reproduced on various objects are the coefficients of variation of seed viability (5–58 %). Obviously, this is due to differences in the efficiency of pollination due to different ages of stands. The greatest variability is typical for weight and counting traits – from 30 to 200 % or more.

Keywords: *Pinus sibirica* Du Tour, forest seed orchards of the first order, permanent forest seed compartments of improved origin, yield, viability of seeds.

How to cite: Borodintseva L. I., Tarakanov V. V., Goncharova T. V. Productivity and quality of seeds of the Siberian stone pine on forest seed orchards in the Republic of Altai // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 52–57 (in Russian with English abstract and references).

УДК 630.223:630.57:571.12

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ С ИХ СОСТОЯНИЕМ В СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ЗАЩИТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Данчева¹, С. В. Залесов², В. С. Коровина¹

¹ Государственный аграрный университет Северного Зауралья
625003, Тюмень, ул. Республики, 7

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37

E-mail: a.dancheva@mail.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru, korovinavs.22@mti.gausz.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.

Приведены результаты исследования взаимосвязи таксационных показателей одновозрастных высокополнотных, чистых по составу сосновых древостоев экологического парка «Затюменский» г. Тюмени с крупностью деревьев по диаметру и их относительной высотой с возможным использованием последней в оценке состояния. Установлено, что на долю мелких по диаметру деревьев приходится 6–13 % общего количества деревьев на пробных площадях, запас которых не превышает 4 % от общего запаса древостоя. Крупные по диаметру деревья составляют 18–36 % от общего количества деревьев и 30–50 % от общего запаса на пробных площадях. По санитарному и относительному жизненному состоянию, относительной высоте и коэффициенту напряженности роста мелкие по диаметру деревья в большинстве случаев характеризуются как сильно ослабленные, отмирающие и биологически неустойчивые, а крупные и средние по диаметру деревья – как здоровые или ослабленные, но биологически устойчивые. На средние показатели общего состояния древостоя значительное отрицательное влияние оказывает наличие мелких по диаметру деревьев, в большинстве случаев сильно ослабленных и отмирающих. Выявлена общая закономерность ухудшения состояния древостоя с увеличением рекреационного воздействия. Установлено, что ослабленные деревья со значением относительной высоты $H/D > 100$ характеризуются наименьшим диаметром, а их количество и запас возрастают с увеличением рекреационного воздействия. По результатам проведенных исследований предложен ряд лесохозяйственных мероприятий для повышения биологической устойчивости, рекреационной привлекательности и защитных функций исследуемых сосняков.

Ключевые слова: *сосновые древостои, лесопарк, рекреационное воздействие, таксационные показатели, состояние деревьев.*

DOI: 10.15372/SJFS20230406

ВВЕДЕНИЕ

Комплексный подход к освоению лесных ресурсов, с учетом возможностей их многоцелевого использования, вызывает необходимость совершенствования лесохозяйственной деятельности. Ведение лесного хозяйства должно быть направлено на повышение продуктивности лесов (Данчева и др., 2015; Константинов, Сергиенко, 2016; Воронин и др., 2021; Замолотчиков и др., 2021; Залесов и др., 2022). На современном этапе развития человечества не вызывает сомнения многофункциональная роль лесов для

населения планеты, а также необходимость их сохранения и защиты. Однако последнее можно обеспечить только при условии продуманной эффективной системы мероприятий по осуществлению экологического мониторинга (Хайретдинов и др., 2010; Соболев и др., 2011; Грязькин и др., 2020; Конашова и др., 2020; Нгуен и др., 2021; Коляда и др., 2022; Морозов и др., 2022). Именно мониторинг позволяет зафиксировать изменения в количественных и качественных показателях компонентов лесных насаждений на ранних стадиях и принять адекватные меры по недопущению деградации лесов.

В качестве объекта мониторинга можно использовать все компоненты насаждения. Однако наиболее объективные данные о его состоянии позволяют получить мониторинг за главным компонентом – древостоем. Последнее объясняется тем, что именно его таксационные показатели определяют состояние, устойчивость и производительность насаждения в целом. Даже незначительные изменения древостоя требуют проведения лесоводственных мероприятий и внесения конкретных корректировок в программу выращивания леса.

Исследования по совершенствованию режима выращивания леса, формированию наиболее продуктивных для конкретных лесорастительных условий древостоев, характеризующихся повышенной устойчивостью к неблагоприятным природным и антропогенным факторам, проводятся на протяжении многих десятилетий (Данчева и др., 2014; Бунькова, 2018; Гибадуллин и др., 2018; Данчева, Панкратов, 2021). Особенно актуальна проблема сохранения устойчивости для городских лесов и лесных парков, которые, выполняя важные для населения экологические и социальные функции, испытывают повышенные рекреационные нагрузки и систематическое воздействие многообразных промышленных загрязнителей.

В этом плане не являются исключением лесные парки и городские леса г. Тюмени. В то же время и здесь вопросы санитарного состояния, производительности и устойчивости древостоев изучены недостаточно. Выполненные исследования дают представление о частных случаях устойчивости насаждений при существующих рекреационных нагрузках и не позволяют комплексно оценить состояние древостоев даже в разрезе одного конкретного лесного парка или урочища.

Цель настоящей работы – проанализировать взаимосвязь таксационных показателей древостоев с их состоянием в сосновых насаждениях экологического парка «Затюменский» г. Тюмени и на основе результатов исследований представить предложения по их сохранению и повышению устойчивости древостоев.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований были выбраны чистые одновозрастные сосновые насаждения наиболее известного в г. Тюмени экологического парка «Затюменский».

В основу работ положен метод временных пробных площадей (впп), которые закладывались с учетом методических рекомендаций, изложенных в широко известных апробированных методиках (Данчева и др., 2017; Данчева, 2018; Бунькова и др., 2020). В процессе исследований были заложены 3 впп, каждая из которых в различной степени подвергается рекреационному воздействию.

Степень рекреационного воздействия устанавливалась по показателю удаленности впп от путей транспорта. В частности, впп-1С расположена в 5 м от автомобильной дороги, впп-2С – в 20 м и впп-3С – в 50 м (см. рисунок, а – в).

В соответствии с методическими рекомендациями (Бунькова, 2018; Бунькова и др., 2020), указанные расстояния впп от дороги позволяют отнести впп-1С к зоне активного, впп-2С – к зоне умеренного и впп-3С – к зоне слабого посещения.

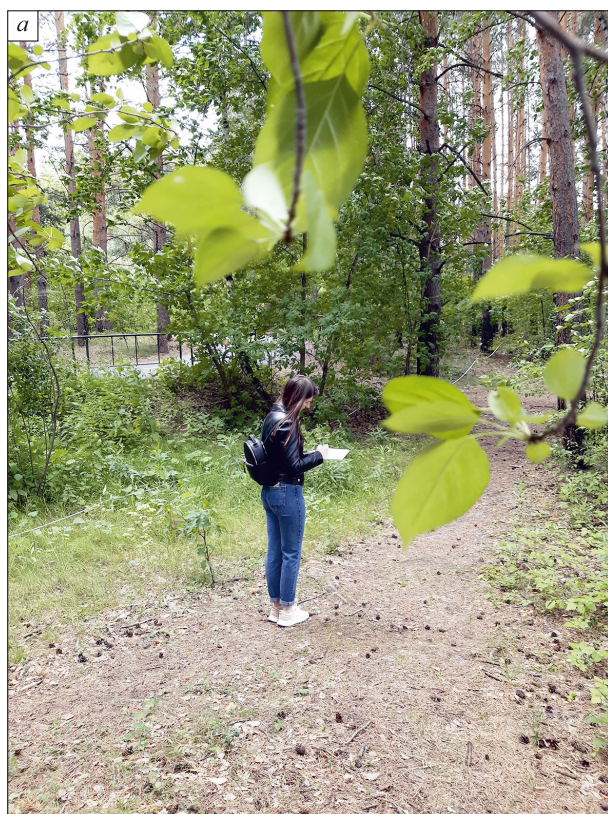
На всех впп устанавливались средние таксационные показатели древостоев по известным лесоводственно-таксационным методикам (Данчева и др., 2017; Бунькова и др., 2020). Кроме того, по методике Г. Е. Коминой (Данчева, 2018) выполнено распределение деревьев по рангам на основе показателей диаметров на высоте 1.3 м. При этом на впп-1С и впп-3С в ранг (категорию) крупных, средних и мелких деревьев отнесены деревья с диаметром на высоте 1.3 м 35–46; 19–34.9 и 12–18.9 см соответственно. На впп-2С к крупным относились деревья с диаметром 39–52 см, к средним – 21–38.9 и мелким – 18–20.9 см.

Определены такие показатели состояния древостоев в целом и каждого дерева в отдельности, как санитарное состояние, относительное жизненное состояние (ОЖС), относительная высота (Н/Д), и комплексный оценочный показатель (КОП) (Данчева, 2018; Правила..., 2020).

В основу установления санитарного состояния древостоев положены средние значения категорий состояния (Кс). При Кс 1.0–1.5 древостой считался здоровым, 1.6–2.5 – ослабленным, 2.6–3.5 – сильно ослабленным, 3.6–4.6 – отмирающим, а при 4.6 и более – отмершим.

Характеристика состояния деревьев по показателю ОЖС: 0–19 % – деревья отмирающие, 20–50 – сильно ослабленные, 51–79 – ослабленные, 80–100 – здоровые.

При $H/D > 100$ деревья характеризуются как ослабленные и биологически неустойчивые, $H/D < 100$ – деревья и древостой являются устойчивыми.



Общий вид исследуемых сосняков экологического парка «Затюменский».

а – впп-1С в зоне активного посещения, б – впп-2С в зоне умеренного посещения; в – впп-3С в зоне контроля.

К биологически устойчивым древостоям относятся таковые со значением КОП в возрасте 40–70 лет 5.8 см/см^3 , в 80–90 лет – 4, в 100 лет и более, $2\text{--}3 \text{ см/см}^3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки взаимосвязи состояния деревьев с их крупностью по диаметру в исследуемых сосновых древостоях проведено распределение анализируемых показателей по категориям крупности на каждой пробной площади (табл. 1).

По данным, представленным в табл. 1, на всех пробных площадях на долю крупных по диаметру деревьев приходится 17–36 %, что в

2.5–3 раза больше в сравнении с количеством мелких деревьев. На долю крупных деревьев приходится 30–60 % общего запаса деревьев на впп, на долю мелких по диаметру – 6–13 %, при этом запас таких деревьев не превышает 4 % от общего.

Следует отметить, что на впп-1С и впп-3С по запасу преобладают средние по крупности деревья – 61–66 %. Исключение составляет древостой на впп-2С, в котором наибольшую долю общего запаса древостоя составляют крупные деревья – до 59 %.

На всех пробных площадях отмечается увеличение балла санитарного состояния и уменьшение показателя жизненного состояния с уменьшением диаметра деревьев. Крупные по

Таблица 1. Средние значения таксационных параметров и показателей состояния по категориям крупности деревьев в сосняках в зоне активного посещения

Показатель	Впп-1С			Впп-2С			Впп-3С		
	Деревья								
	мел- кие	сред- ние	круп- ные	мел- кие	сред- ние	круп- ные	мел- кие	сред- ние	круп- ные
Количество деревьев, %	12.9	66.1	21.0	6.1	57.6	36.3	11.9	71.2	16.9
Запас стволовой древесины, %	3.4	61.1	35.5	1.7	39.8	58.5	4.1	66.1	29.8
Санитарное состояние, балл	4.1	2.7	2.3	2.5	2.3	2.1	3.7	2.3	2.0
Относительное жизненное состояния, %	36.9	60.5	66.2	80.0	70.3	73.7	50.3	71.7	75.0
Относительная высота	116.0	87.6	61.4	104.1	83.4	57.7	111.6	89.0	67.1
Комплексный оценочный показатель, см/см²	9.2	4.2	2.0	6.6	3.4	1.6	7.3	4.0	2.2

диаметру деревья по баллу санитарного состояния характеризуются как ослабленные. Состояние средних по диаметру деревьев (категория средние) на впп-2С и впп-3С оценивается как ослабленные, а на впп-1С – сильно ослабленные. Мелкие по диаметру деревья (категория мелкие) по баллу санитарного состояния на большинстве впп характеризуются как отмирающие.

Показатели ОЖС на впп позволяют категории крупных и средних деревьев отнести к ослабленным, а мелкие по диаметру деревья – к сильно ослабленным.

Аналогичная закономерность установлена и при анализе показателя относительной высоты. Крупные и средние по диаметру деревья на всех впп характеризуются $H/D < 100$, что позволяет отнести их к биологически устойчивым. Большинство мелких по диаметру деревьев на всех впп имеют относительную высоту $H/D > 100$, что свидетельствует об общем ослаблении их состояния.

По значению коэффициента напряженности роста на всех пробных площадях крупные

и средние по диаметру деревья устойчивы, мелкие характеризуются как неустойчивые.

Было проведено распределение основных показателей таксационных и состояния деревьев на пробных площадях по значению относительной высоты для анализа их взаимосвязи (табл. 2).

По данным проведенных исследований отмечается общая закономерность увеличения количества ослабленных (биологически неустойчивых) деревьев со значением относительной высоты ($H/D > 100$) с увеличением рекреационного воздействия. На впп-1С, где рекреационные нагрузки максимальные, количество деревьев с $H/D > 100$ в 1.5–4 раза больше такового на впп-2С и впп-3С.

Несмотря на тот факт, что на всех впп в древостоях преобладают деревья с показателями $H/D < 100$, т. е. биологически устойчивые с увеличением интенсивности рекреационного воздействия наблюдается снижение доли биологически устойчивых деревьев с $H/D < 100$ в 1.2–1.3 раза.

Таблица 2. Распределение таксационных показателей и показателей состояния деревьев на пробных площадях по значению относительной высоты

Относительная высота (H/D)	Показатель	Впп-1С	Впп-2С	Впп-3С
> 100	Количество деревьев, %	25.8	6.1	16.9
	Диаметр, см	19.3	21.7	20.8
	Запас стволовой древесины, %	10.3	2.0	7.4
	ОЖС, %	43.2	77.5	54.5
	КОП, см/см ²	8.0	6.6	6.9
< 100	Количество деревьев, %	74.2	93.9	83.1
	Диаметр, см	32.0	36.8	31.6
	Запас стволовой древесины, %	89.7	98.0	92.6
	ОЖС, %	63.6	71.8	73.4
	КОП, см/см ²	3.3	2.8	3.5

Диаметр деревьев, характеризующихся относительной высотой $H/D > 100$, меньше в 1.5–1.7 раза в сравнении с аналогичным показателем у деревьев с относительной высотой $H/D < 100$ на всех пробных площадях.

Запас ослабленных деревьев с $H/D > 100$ увеличивается с ростом рекреационного воздействия. Так, на впп-1С в зоне активного посещения запас таких деревьев составляет в среднем 10 % от общего запаса древостоя, что в 1.4–5 раз больше, чем на впп-2С и впп-3С в зоне умеренного и слабого посещения. Следует отметить, что с увеличением рекреационной нагрузки снижается показатель ОЖС деревьев как ослабленных ($H/D > 100$), так и биологически устойчивых с $H/D < 100$. При этом средний диаметр анализируемых по данному показателю состояния деревьев также снижается. Так, на впп-1С деревья с $H/D > 100$ имеют средний диаметр 19.3 см при показателе жизненного состояния 43.2. Деревья указанной группы по приведенному показателю состояния можно отнести к сильно ослабленным. В сосняках на впп-2С и впп-3 биологически неустойчивые деревья с $H/D > 100$ характеризуются средним диаметром 21–22 см с оценкой их жизненного состояния как ослабленное (ОЖС = 55–78 %).

По значению КОП деревья, относительная высота которых $H/D > 100$, на всех впп характеризуются как ослабленные. В то же время деревья с $H/D < 100$ по показателю КОП на всех пробных площадях характеризуются как биологически устойчивые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сосняках экологического парка «Затюменский» на долю отставших в росте мелких по диаметру деревьев приходится 6–13 % общего количества и 4 % запаса всех деревьев.

Все анализируемые показатели состояния позволяют отнести мелкие деревья к сильно ослабленным, отмирающим и биологически неустойчивым, в отличие от крупных и средних деревьев, которые характеризуются как здоровые или ослабленные, но биологически устойчивые.

Отмечается общая закономерность увеличения количества ослабленных (биологически неустойчивых) деревьев с относительной высотой $H/D > 100$ с увеличением рекреационного воздействия. В сосновом древостое, расположенном на расстоянии 5 м от объекта линейной рекреации (благоустроенной дороги для пешеходного и велосипедного передвижения), таких

деревьев в 1.5–4 раза больше, чем в сосняках, расположенных на расстоянии 20 и 50 м от объекта линейной рекреации.

На всех пробных площадях диаметр ослабленных деревьев с относительной высотой $H/D > 100$ характеризуется наименьшими значениями (в 1.5–1.7 раза меньше), чем у деревьев с относительной высотой $H/D < 100$.

С увеличением рекреационного воздействия отмечается общая закономерность снижения ОЖС деревьев с $H/D > 100$ и деревьев с $H/D < 100$. У ослабленных деревьев (со значением $H/D > 100$) данная закономерность наиболее выражена.

Для повышения биологической и противопожарной устойчивости сосновых насаждений экологического парка «Затюменский» можно рекомендовать уборку мелких, отставших в росте деревьев в биогруппах и уход за одиночно стоящими путем улучшения условий роста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бунькова Н. П. Использование комплексного оценочного показателя для установления рекреационной устойчивости сосновых насаждений // Вестн. Бурят. гос. с.-х. акад. 2018. № 4 (53). С. 120–128.
- Бунькова Н. П., Залесов С. В., Залесова Е. С., Магасумова А. Г., Осипенко Р. А. Основы фитомониторинга: учеб. пособ., 3-е изд., доп. и перераб. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 90 с.
- Воронин В. В., Третьяков С. В., Шумилова Ю. Н., Карпов А. А., Ермолина М. С. Обоснование лесохозяйственных мероприятий для рекреационных лесов Северо-Востока Европейской России // Сиб. лесн. журн. 2021. № 4. С. 56–63.
- Гибадуллин Н. Ф., Мусин Х. Г., Халилов И. И., Ахметов А. Ю., Гафиятов Р. Х. Роль защитных лесов в экосистеме // Вестн. Казан. гос. агр. ун-та. 2018. Т. 13. № 4 (51). С. 21–23.
- Грязькин А. В., Кочкин А. А., Прокофьев А. Н., Гуталь М. М., Тхань Ч. Ч., Ефимов А. В. Влияние рекреационной нагрузки в зимний период на лесную экосистему // Изв. СПбЛТА. 2020. № 230. С. 6–18.
- Данчева А. В. Повышение рекреационной устойчивости и привлекательности сосновых лесов Казахстана: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 515 с.
- Данчева А. В., Залесов С. В., Муканов Б. М., Портянко А. В. Определение стадий рекреационной дигрессии в сосновых насаждениях Казахского мелкосопочника (на примере ГНПП «Бурабай») // Агр. Россия. 2014. № 10. С. 9–15.
- Данчева А. В., Залесов С. В., Муканов Б. М. Влияние рекреационных нагрузок на биометрические параметры ассимиляционного аппарата сосновых древостоев // Лесн. вестн. 2015. Т. 19. № 2. С. 44–50.
- Данчева А. В., Залесов С. В., Султанова Р. Р. Функциональное зонирование сосняков рекреационного назначения Казахского мелкосопочника // Вестн. Башкир. гос. агр. ун-та. 2017. № 2 (42). С. 101–105.

- Данчева А. В., Панкратов В. К. Оценка эффективности рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника // ИВУЗ. Лесн. журн. 2021. № 2 (380). С. 45–55.
- Залесов С. В., Сураев П. Н., Бунькова Н. П., Осипенко А. Е., Панин И. А., Петров А. И. Интенсификация лесопользования путем совершенствования нормативно-правовых документов // Междунар. науч.-иссл. журн. 2022. № 10 (124). С. 1–4.
- Замолотчиков Д. Г., Грабовский В. И., Каганов В. В. Эко-системные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2021. № 6. С. 581–592.
- Коляда А. С., Белов А. Н., Розломий Н. Г., Берсенева С. А. Сквер как ландшафтно-архитектурная территория рекреационно-функционального назначения на территории города Уссурийска Приморского края // Лесн. вестн. 2022. Т. 26. № 4. С. 73–80.
- Конашова С. И., Султанова Р. Р., Мартынова М. В., Рахматуллин З. З. Формирование широколиственных лесов в условиях интенсивной рекреации // Тр. СПбНИИЛХ. 2020. № 1. С. 32–43.
- Константинов А. В., Сергиенко В. Г. Влияние изменений климата в голоцене на формирование разнообра- зия современных лесов и их трансформация к концу XXI века в Европейской России // Лесотех. журн. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 19–29.
- Морозов А. Е., Стародубцева Н. И., Кирибаум А. Р., Чанотей Д. Динамика состояния древостоев лесного парка имени Лесоводов России г. Екатеринбурга под воздействием рекреации // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 3 (82). С. 25–31.
- Нгуен Т. И., Данг В. Х., Парина Т. А. Видовое разнообразие и декоративные особенности растений в озеленении города Ханой // ИВУЗ. Лесн. журн. 2021. № 5 (383). С. 65–75.
- Правила санитарной безопасности в лесах. Утв. Постановлением Правительства РФ от 09.12.2020 № 2047. М.: Правительство РФ, 2020.
- Соболев Н. В., Байчибаева А. В., Данчева А. В. Экологическая рекреационная емкость как мера запаса лесных рекреационных ресурсов // Агр. вестн. Урала. 2011. № 5 (84). С. 52–55.
- Хайретдинов А. Ф., Мусин Х. Г., Гафиятов Р. Х., Нафикова И. Р. Дифференцированная оценка рекреационного потенциала лесов // Вестн. Башкир. гос. агр. ун-та. 2010. № 3. С. 49–55.

RELATIONSHIP OF FOREST SURVEY PARAMETERS WITH INDICATORS OF CONDITION IN PINE PROTECTIVE STANDS

A. V. Dancheva¹, S. V. Zalesov², V. S. Korovina¹

¹ State Agrarian University of Northern Zaural'e
Respubliki Str., 7, Tyumen, 625003 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirsky Tract Str., 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: a.dancheva@mail.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru, korovinavs.22@mti.gausz.ru

The results of a study of the relationship between forest survey indicators and a condition indicators with the size of trees in diameter and their relative height are presented with the possible use of the latter in assessing the state of even-aged, high-density, pure composition pine forest stands of Zatyumenskiy ecological park in the city of Tyumen. It has been revealed, that 6–13 % of the total number of trees in the sample plots falls on the share of small-diameter trees. At the same time, the timber stock of such trees does not exceed 4 % of the total growing stock. Large-diameter trees account for 18–36 % of the total number of trees and 30–50 % of the total timber stock in the sample plots. In terms of indicators such as tree health and relative vitality, relative height and growth stress coefficient, small-diameter trees, in most cases, are characterized as severely weakened, dying and biologically unstable. At the same time, large and medium-sized trees are considered as healthy or weakened, but biologically stable. The average indicators of the general state of the tree stand are significantly negatively affected by the presence of small-diameter trees, in most cases, very weakened and dying. A general pattern of deterioration in the state of the tree stand with an increase in recreational impact has been revealed. It has been established that weakened trees with a relative height $H/D > 100$ are characterized by the smallest diameters, and their number and timber stock increase with an increase in recreational impact. Based on the results of the studies, a number of forestry measures have been proposed to increase the biological stability, recreational attractiveness and protective functions of the studied pine forests.

Keywords: pine tree stands, forest park, recreational impact, forest survey indicators, condition of the trees.

How to cite: Dancheva A. V., Zalesov S. V., Korovina V. S. Relationship of forest survey parameters with indicators of condition in pine protective stands // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 58–63 (in Russian with English abstract and references).

УДК 630*2+470.11

КАЧЕСТВО ДРЕВЕСИНЫ ОСУШАЕМЫХ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ СОСНЯКОВ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ, ОПРЕДЕЛЕННОЕ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОМ

С. В. Третьяков^{1,2}, С. В. Коптев^{1,2}, А. В. Давыдов^{1,2}, М. А. Загородский^{1,2},
И. В. Цветков^{1,2}, А. А. Парамонов¹, А. А. Карабан^{1,2}

¹ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства
163062, Архангельск, ул. Никитова, 13

² Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, Набережная Северной Двины, 17

E-mail: svt@atknnet.ru, s.koptev@narfu.ru, a.v.davydov@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru,
a.paramonov@sevniilh-arh.ru, karaban@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

Исследование качества древесины в осушаемом сосновом древостое проводили в зеленой зоне г. Архангельска на территории северотаежной части Архангельской области, которая относится к и Арктической зоне Российской Федерации. Проведены повторные измерения таксационных показателей на 6 постоянных пробных площадях, испытывающих влияние гидротехнической мелиорации с 1974 г. и реконструкции осушительной сети в 1990 г. До осушения на них произрастало заболоченное сосновое насаждение Vб класса бонитета. В настоящее время на осушаемом участке произрастают чистые средневозрастные древостои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) кустарничково-сфагнового типа леса, IV класса бонитета. Для половины участков можно рекомендовать проведение рубок ухода по действующим в России Правилам ухода за лесами (2020). В результате исследования определено влияние осушения на годовые приросты ранней и поздней древесины и связанные с ними основные показатели качества древесины. По качеству древесины часть деревьев соответствует требованиям к авиационным пиломатериалам. Для наглядного одновременного анализа влияния качества работы осушительной сети, расположения объектов относительно осушительной сети и температуры воздуха в аномально жаркие годы построены диаграммы изменения средних показателей ширины годичного слоя и плотности древесины в осушаемых сосновых насаждениях по годам. Аналогичные диаграммы построены на основе измерения кернов модельного дерева на разных относительных высотах ствола. Указанный аналитический подход применен впервые. Высказано предположение, что через 10 лет таксационные показатели всех объектов будут соответствовать требованиям для назначения рубок ухода, и качество древесины в среднем будет повышаться, для чего рекомендовано провести реконструкцию каналов.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, гидротехническая мелиорация, плотность древесины, приросты, рубки ухода, Арктическая зона Российской Федерации.

DOI: 10.15372/SJFS20230407

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Запад и Европейский Север России относятся к зоне избыточного увлажнения с обширными массивами верховых болот и заболоченных лесов, что связано с преобладанием осадков над испарением и транспирацией (Тараканов, 2004; Инишева, 2009).

Данная проблема – ключевая для ведения лесного хозяйства в Арктической зоне Российской Федерации на территории Архангельской области, которая включает часть северотаежного лесного района и район притундровых лесов и редкостойной тайги (Чибисов и др., 1974; Михайлов, 2022). Основной направленностью научно-исследовательской деятельности в указан-

© Третьяков С. В., Коптев С. В., Давыдов А. В., Загородский М. А., Цветков И. В., Парамонов А. А., Карабан А. А., 2023

ных природных условиях традиционно является повышение продуктивности лесов, в контексте чего наиболее эффективным лесоводственным мероприятием признано осушение лесов (Чибисов, 2008).

Заболоченность данных территорий по отдельности составляет 54.0 и 71.3 % соответственно, а общая заболоченность сухопутной территории Арктики в Архангельской области – 62.3 %. Доля хвойных лесов достигает 90 %, они представлены в основном спелыми и перестойными ельниками и сосняками. В сосняках преобладает сфагновый тип леса (Тараканов, 2005; Соколов, Бахтин, 2006; Лесной план..., 2018). Эффективно проведенное осушение с последующим поддержанием работы осушительной сети приводит к значительному повышению годичного прироста древостоев, усилению лесовозобновления и повышению выхода недревесной продукции (Пастухова и др., 2017; Бабилов, 2018; Бабилов и др., 2019; Бабилов, Субота, 2020).

Важными остаются вопросы изучения динамики годичных приростов и качества древесины осушаемых древостоев с начальной низкой продуктивностью. Гидротехнические мелиорации и реконструкции осушительной сети проводили в Архангельской области с 1960-х по 1990-е годы. Заболоченные участки стремились осушить за период оборота рубки, чтобы организовать непрерывное лесопользование для стабильного обеспечения древесиной крупных целлюлозно-бумажных и лесоперерабатывающих предприятий (Чибисов и др., 1974). Сейчас значительная их часть находится в зеленой зоне городов и поселков.

На динамику показателей качества древесины, из которых наиболее значимым является ее плотность, оказывают влияние макроструктура, географические аспекты, лесорастительные условия и возраст. В северных условиях отмечается повышение плотности древесины в широтном направлении с юга на север. Предполагается, что тенденция увеличения плотности древесины с ухудшением лесорастительных условий связана с саморегулирующей устойчивости насаждений. С повышением возраста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в среднем повышается плотность древесины, но ближе к возрасту спелости ее значения стабилизируются. Причина таких изменений заключается в прямой зависимости плотности от ширины годичного кольца и доли поздней древесины. От плотности напрямую зависит и предел прочности древесины (Чибисов и др., 2005; Witomski et al., 2014; Федотов и др.,

2016; Усольцев, Цепордей, 2020; Roszyk et al., 2020).

Изменение климата при анализе качества древесины можно не учитывать (Seo et al., 2020). Дендрохронологические исследования качества древесины показывают, что оно заметно снижается под влиянием промышленных рубок, повышения выбросов углерода в атмосферу и внесения удобрений в лесные почвы, что приводит к увеличению прироста за счет ранней древесины и снижению ее плотности (Pretzsch et al., 2018). На землях, вышедших из-под сельскохозяйственного использования, качество древесины соответствует требованиям лесной промышленности (Kozakiewicz et al., 2020).

Редко учитываемым фактом при измерениях качества древесины является снижение ее плотности от комля к вершине, что может приводить к смещенным оценкам фитомассы древостоев, применяемым при расчетах депонирования углерода и при прогнозировании выхода круглых лесоматериалов нужного качества из различных частей ствола (Малышева и др., 2017; Schekalev et al., 2020; Demol et al., 2021). Методически верно рассчитывать плотность древесины всего дерева именно по локальным замерам на разных высотах, для чего достаточно брать по одному древесному керну на каждой относительной высоте (Усольцев, Цепордей, 2020; Schekalev et al., 2020). Предварительная оценка показателей качества древесины перспективна для более эффективного планирования лесопользования (Чибисов и др., 2005; Усольцев, Цепордей, 2020).

Перечисленные факты наводят на соображения об экономической целесообразности на территории Арктической зоны Российской Федерации предлагаемых исследователями низкоинтенсивных рубок ухода в осушаемых сосняках (Федотов, 2017).

Цель данного исследования – оценка влияния осушения на макроструктуру и основные показатели качества древесины средневозрастных сосняков в северотаежном лесном районе на территории Архангельской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проводили по общепринятой методике (ОСТ 56-69-83; Наквасина, Шаврина, 2001) на 6 постоянных пробных площадях (ппп) в конце и в начале вегетационного периода 2021 и 2022 гг. соответственно (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Таксационная характеристика осушаемых сосняков

Ппп номер	площадь, м ²	Состав	Порода	Средние значения по древостоям			Класс бонитета	Полнота	Густота, шт./га	Запас стволовой древесины, м ³ /га
				Возраст, лет	Диаметр, см	Высота, м				
1	900	93С7С	С С	44 142	8.7 20.0	8.1 8.3	IV	1.11	3766	121
2	600	92С8С	С С	44 –	7.2 22.0	9.4 11.4	IV	0.64	3167	81
3	900	93С7С	С С	43 119	7.4 13.9	7.4 9.0	IV	0.51	2378	60
4	900	84С16С	С С	40 181	8.4 20.6	8.8 10.3	IV	0.79	2778	95
5	900	98С1Е1Б	С Е Б	49 – –	7.1 3.1 3.5	8.1 – –	IV	0.99	4967	114
6	750	99С1Б	С Б	42 –	7.9 2.6	8.7 –	IV	0.42	3733	101

Примечание. С – сосна обыкновенная; Е – ель европейская (*Picea abies* (L.) Н. Karst.); Б – береза повислая (*Betula pendula* Roth).

Ранее лесные участки были отграничены для наблюдений за динамикой таксационных показателей изначально заболоченного насаждения сосны, которое испытало воздействие гидро-технической мелиорации в 1974 г. и частичной реконструкции осушительной сети в 1990 г. Дополнительно на каждой пробной площади с помощью возрастного бурава у деревьев сосны

пропорционально представленности ступеней толщины отбирали керны на высоте 1.3 м.

В качестве модели подобрали дерево сосны (свежий валеж 2021 г.), близкое по параметрам к средним таксационным показателям древостоев на ппп 4. У модельного дерева были измерены диаметры и взяты 5 кернов на относительных высотах 0.1 Н, 0.3 Н, 0.5 Н и 0.7 Н, а также 1.3 м.

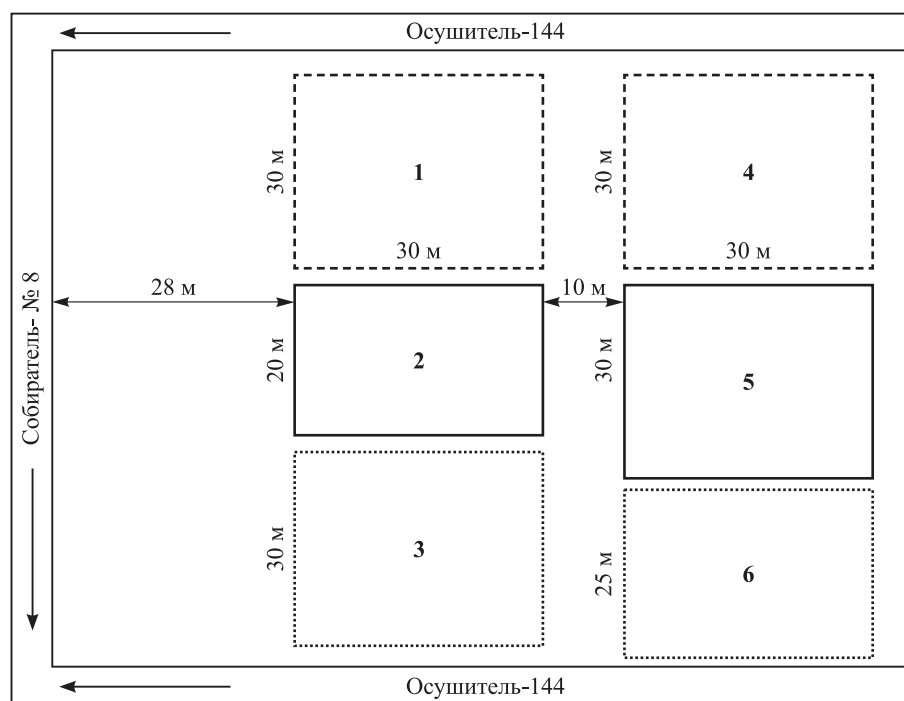


Рис. 1. Условная схема размещения ппп 1–6 в выделе 3 квартала 22 Исакогорского участкового лесничества (зеленая зона г. Архангельска, южная часть Архангельского лесничества Архангельской области).

Замеры годовичных приростов осуществляли в камеральных условиях с помощью оптоэлектронного измерителя пробы керна Corim Maxi. У каждого годовичного слоя отдельно измеряли ширину ранней и поздней древесины с точностью 0.01 мм.

Для оценки качества древесины рассчитывали следующие показатели:

1) среднюю ширину годовичного слоя (Ш.Г.С.), мм;

2) количество поздней древесины (П.Д.), %;

3) базисную плотность, или плотность абсолютно сухой древесины (ρ_0), в кг/м³, и зависимый от нее ($R^2 = 0.94$) предел прочности при сжатии волокон при влажности 12 % (σ_{12}), МПа по уравнениям

$$\rho_0 = 279 - 10.8 \times \text{Ш.Г.С.} + 4.9 \times \text{П.Д.}; \quad (1)$$

$$\sigma_{12} = 0.19\rho_0 - 35. \quad (2)$$

Базисную плотность вычисляли по годовичным приростам с помощью экспресс-метода, который был разработан в ФБУ «СевНИИЛХ» под руководством академика Г. А. Чибисова на основе измерений более 1000 кернов сосен и елей. В ходе определения его точности разработчиками было установлено максимальное отклонение базисной плотности древесины сосны по уравнению (1) – от опытной плотности, определяемой путем сушки и взвешивания образцов, до 4.8 %, согласно другому исследованию (Чибисов и др., 2005; Федотов и др., 2016), до 5.53 %.

Дополнительно считали число годовичных слоев в 1 см радиуса керна, начиная от сердцевины, и находили среднее значение отдельно по каждому керну.

Показатели качества древесины сосны: количество поздней древесины, среднее число слоев в 1 см, базисную плотность и предел прочности при сжатии вдоль волокон сравнивали с ГОСТ 968-68 (2007). Для этого пересчитали приведенные в нем показатели плотности при влажности 15 % (ρ_{15}) на значения показателей нормализованной плотности, т. е. плотности при влажности 12 % (ρ_{12}), по формуле из ГОСТ 16483.1-84 (1999):

$$\rho_{12} = \frac{\rho_{15}}{K_{12}^w}, \quad (3)$$

где K_{12}^w – коэффициент пересчета влажности образцов, равной или меньше предела насыщения клеточных стенок (K_{12}^w равен 1.01 при влажности 15 %).

Определенные с помощью экспресс-метода значения ρ_0 пересчитали на ρ_{12} по формуле (ГОСТ 16483.1-84, 1999):

$$\rho_{12} = \rho_0 \times \left(1 - \frac{(1 - 0.85 \cdot 10^{-3}) \times (W - 12)}{100} \right), \quad (4)$$

где $0.85 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент объемного разбухания, кг/м³; W – влажность образца в момент испытания, %.

При $W = 0$ % формула (4) принимает следующий вид:

$$\rho_{12} = \rho_0 \times 1.119898. \quad (5)$$

По полученным значениям прироста и плотности строили диаграммы их динамик по годам, которые оценивали с учетом влияния осушения, реконструкции гидротехнической сети и удаленности пробных площадей от осушителей.

Значения предела прочности при сжатии вдоль волокон, отраженные в ГОСТ 968-68 (2007), аналогично пересчитывали с влажности σ_{15} на σ_{12} , используя формулу ГОСТ 16483.10-73 (1999):

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_{15}}{K_{12}^w}. \quad (6)$$

Для пересчета по формуле (6) взяли коэффициенты при влажности 15 %, равные 0.850 и 0.849, соответствующие плотностям 1-й и 2-й групп качества древесины по ГОСТ 968-68 (2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены повторные измерения на 6 постоянных пробных площадях, расположенных между двумя осушителями и представленных чистыми средневозрастными сосняками (табл. 1). Мелиоративная система существенно снизила эффективность вследствие заиливания каналов, частичного обрушения откосов.

Напочвенный покров на всех участках соответствует сфагновой группе типов леса. В качестве преобладающих видов отмечены сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum* (Schimp.) H. Klinggr.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.). В ботанической практике подобные типы леса, сформировавшиеся в результате осушения, принято называть сосняками кустарничково-сфагновыми (Тюкавина, 2020).

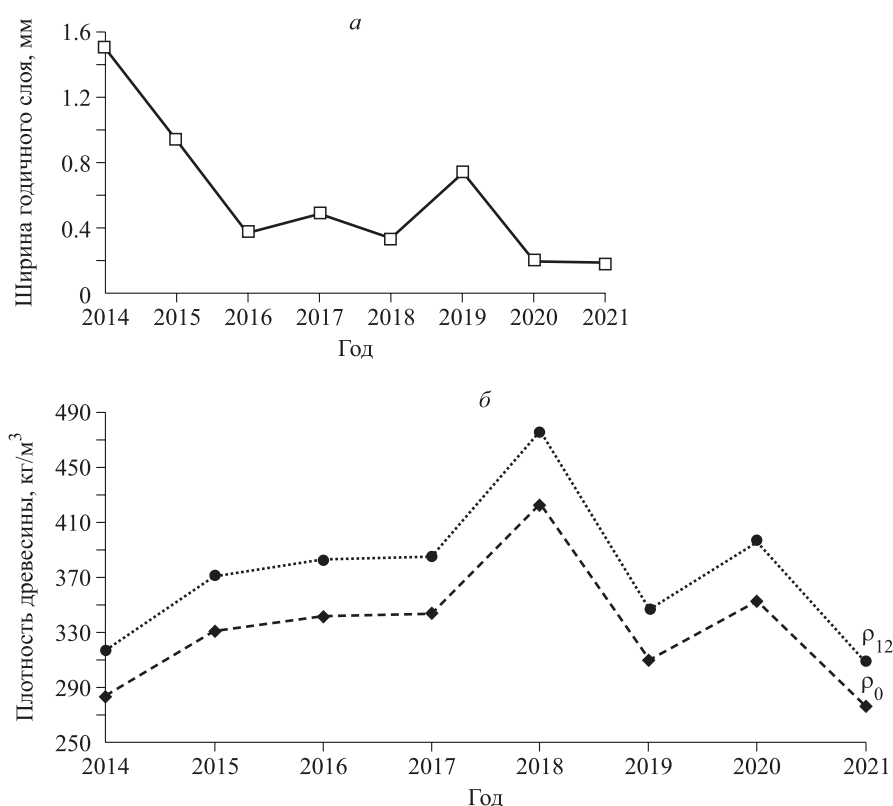


Рис. 2. Приросты модельного дерева на $0.7H$ (а) и плотности его древесины (б) по годам (5.65 м).

Заболоченное сосновое насаждение Vб класса бонитета в результате эффективно проведенного осушения получило развитие до кустарничково-сфагнового насаждения IV класса бонитета. Средний возраст древостоев находится в пределах 40–50 лет. При данных таксационных характеристиках на половине осушаемых участков можно рекомендовать проведение рубок ухода – прореживание (Правила..., 2020).

Возраст модельного дерева на $0.1H$ (0.81 м) при диаметре 8.4 см составил 35 лет, что позволяет отнести его к поколению, сформировавшемуся после начала осушения. Диаметр и высота модели близки к средним по древостою. Динамика приростов модельного дерева на $0.7H$ по диаметру и плотности древесины, рассчитанной по уравнению, представлена на рис. 2, а, б.

Отмечаются разные тенденции динамики плотности древесины по отношению к динамике приростов по диаметру. Низкие приросты и плотность в крайнем для модели 2021 г. связаны с недостаточным формированием поздней древесины.

На рис. 3 отмечена схожесть динамики прироста и плотности модели и керна на $0.7H$ с 2014 по 2021 г. Данная зависимость характерна и для других кернов. На них заметно выраже-

на реакция на реконструкцию каналов в 1990 г. снижением приростов и повышением плотности древесины. Заметное снижение приростов с некоторой стабилизацией плотности в конце 2010-х годов объясняется ухудшением работы осушительной сети. Схожие динамика приростов и плотности присутствует и на рис. 4 и 5.

Для поддержания эффективности лесосушения рекомендуется проводить реконструкцию осушительной сети не позднее чем раз в 20 лет (Федотов, 2017).

Динамика приростов и плотности модельного дерева точнее всего отражает изменения исследуемых показателей именно на ппп 4 (рис. 4 и 5). Возможно, что с увеличением количества модельных деревьев будет наблюдаться существенная вариация исследуемых признаков. Учитывая тесную связь плотности древесины с фитомассой, предполагаем, что для более точных оценок по древостою достаточно аналогичной выборки деревьев в числе 5 шт. Поставленный вопрос требует дополнительных исследований (Усольцев, Залесов, 2005; Усольцев, Цепордей, 2020).

Требуемая плотность для высококачественной авиационной древесины сосны обыкновенной во всех районах бывшего СССР составляет

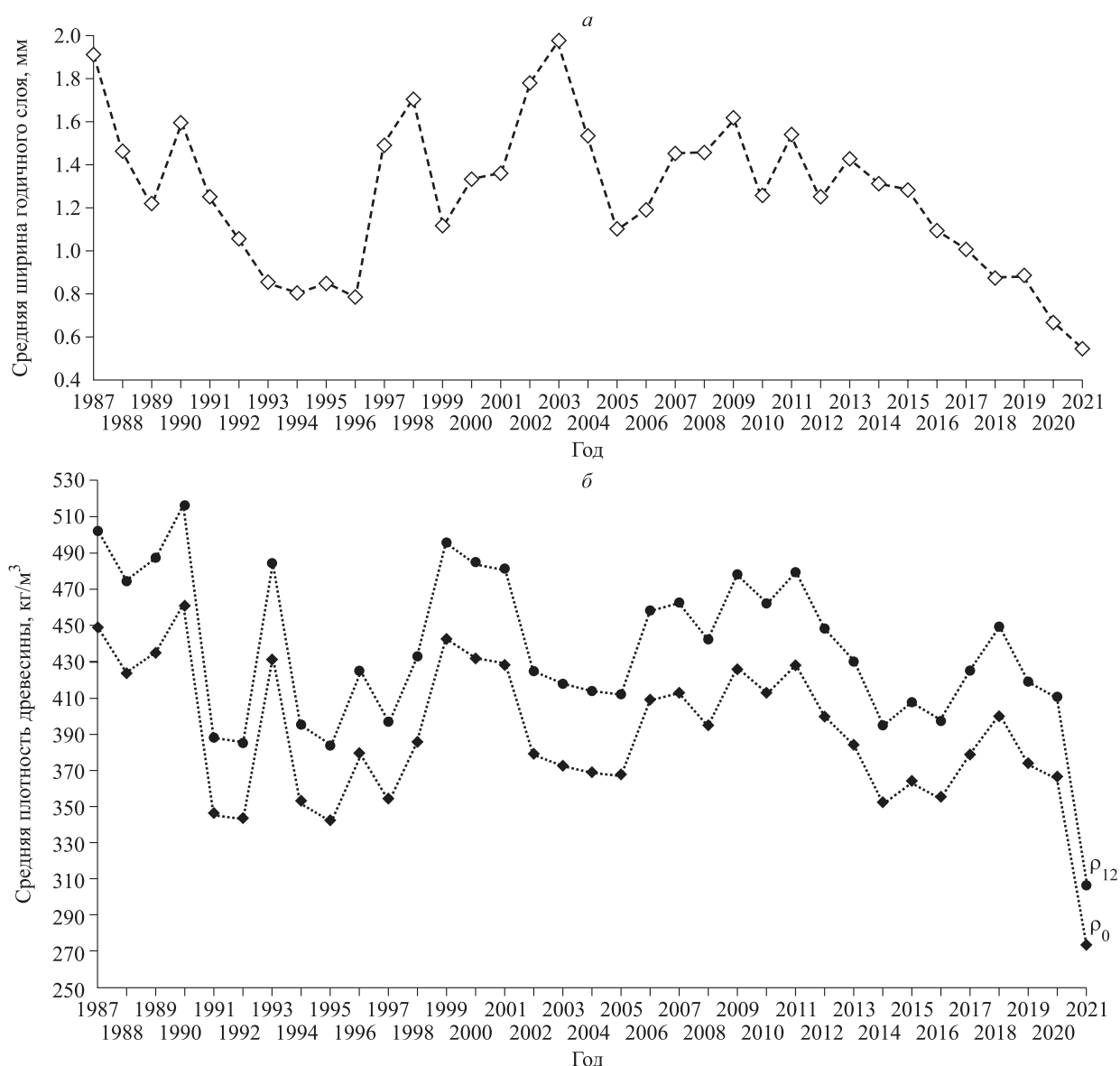


Рис. 3. Общий прирост модельного дерева (а) и плотности его древесины (б) по годам.

не менее 510 и 470 кг/м³ при влажности 15 % соответственно группам древесины с повышенными механическими свойствами по ГОСТ 968-68 (2007). При этом содержание поздней древесины составляет не менее 20–25 %, число годичных слоев в 1 см – от 3 до 25 шт. При пересчете по формуле (3) указанные значения для ρ_{12} составляют 505 и 465 кг/м³ соответственно. Пределы прочности при сжатии вдоль волокон (σ_{15}), равные 40 и 35 МПа, при пересчете по формуле (6) на σ_{12} составляют 47 и 41 МПа. Оцениваемые показатели на разных высотах модельного дерева представлены в табл. 2.

Отмечается снижение показателей качества древесины по мере продвижения от основания ствола к вершине. Требованиям ГОСТ

968-68 (2007) за исключением плотности соответствует древесина на 0.81 м (0.1H). Средняя ширина годичного слоя с учетом относительной полноты и класса бонитета древостоя соответствует особенностям возраста. Плотность древесины на высоте 1.3 м соответствует нормальной для сосняков северотаежного лесного района Архангельской области и показывает эффективность осушения для улучшения условий произрастания (Чибисов и др., 2005; Тюкавина, 2020).

На пробных площадях, расположенных ближе к собирателю (рис. 4), приросты в первые годы после осушения формировались с большей долей поздней древесины, чем на участках дальше от собирателя (рис. 5).

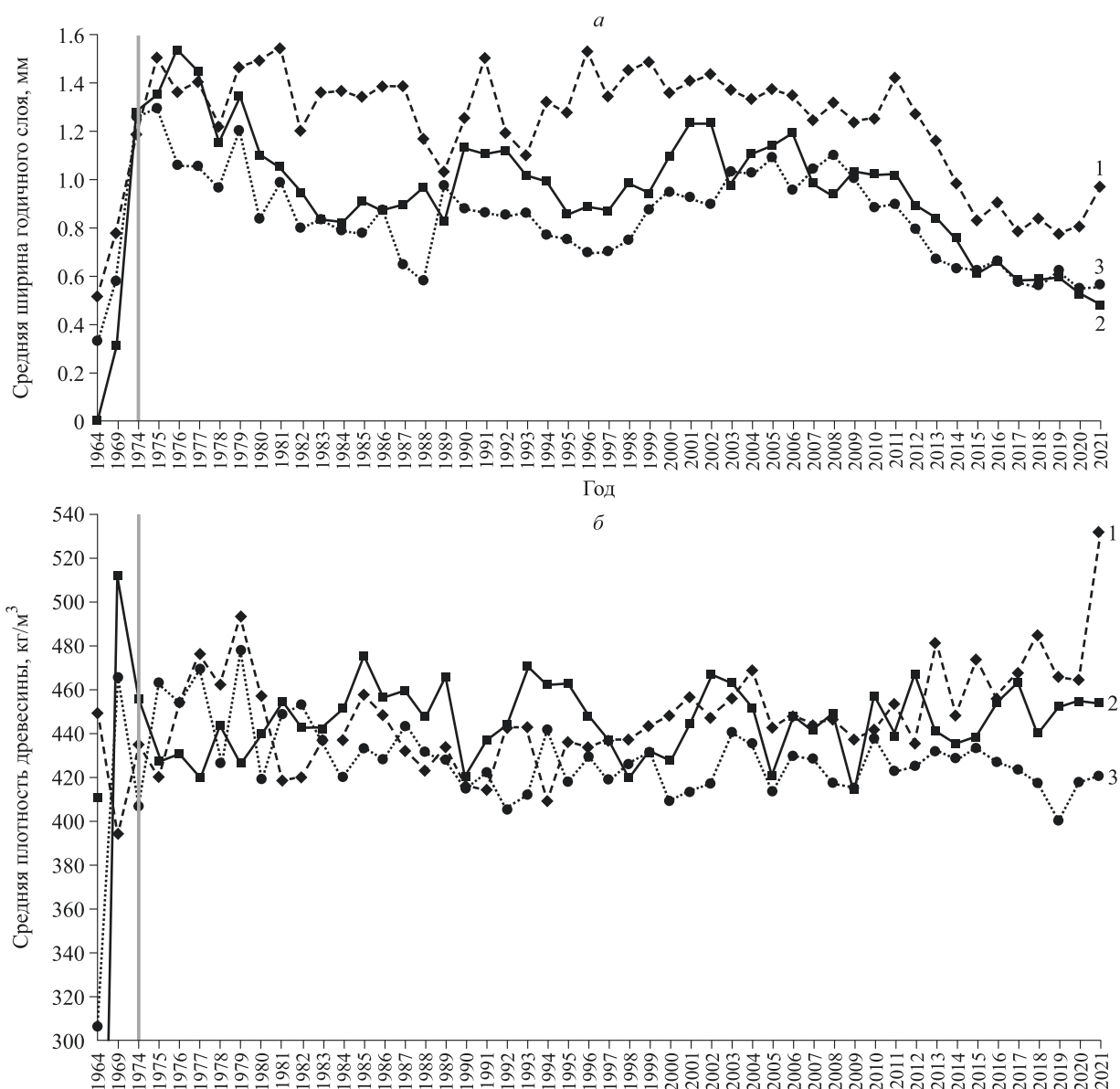


Рис. 4. Средние значения приростов (а) и ρ_{12} (б) по годам ($H = 1.3$ м) на пробных площадях 1–3 вблизи собирателя.

Таблица 2. Макроструктура и качество древесины кернов модельного дерева

Высота, м	Ш.Г.С., мм	Число слоев в 1 см	П.Д., %	ρ ₀	ρ ₁₂	σ ₁₂ , МПа
				кг/м³		
0.81	1.23 ± 0.05	7	27.90	403	451	42
1.30	1.20 ± 0.06	8	25.54	391	438	39
2.42	1.23 ± 0.12	6	23.54	381	427	37
4.03	1.62 ± 0.12	4	22.19	371	415	35
5.65	0.59 ± 0.15	1	10.34	324	363	26
Сумма	6	26	110	1870	2094	180
Среднее	1.17	5	21.90	374	419	36
Среднее квадратичное отклонение	0.37	2.42	6.09	27.36	27.36	5.20
Основная ошибка среднего значения	0.17	1.08	2.73	12.24	12.24	2.33
Коэффициент изменчивости, %	31	46	28	7	7	14
Точность опыта, %	14	20	12	3	3	6
Достоверность среднего значения	7	5	8	31	31	16

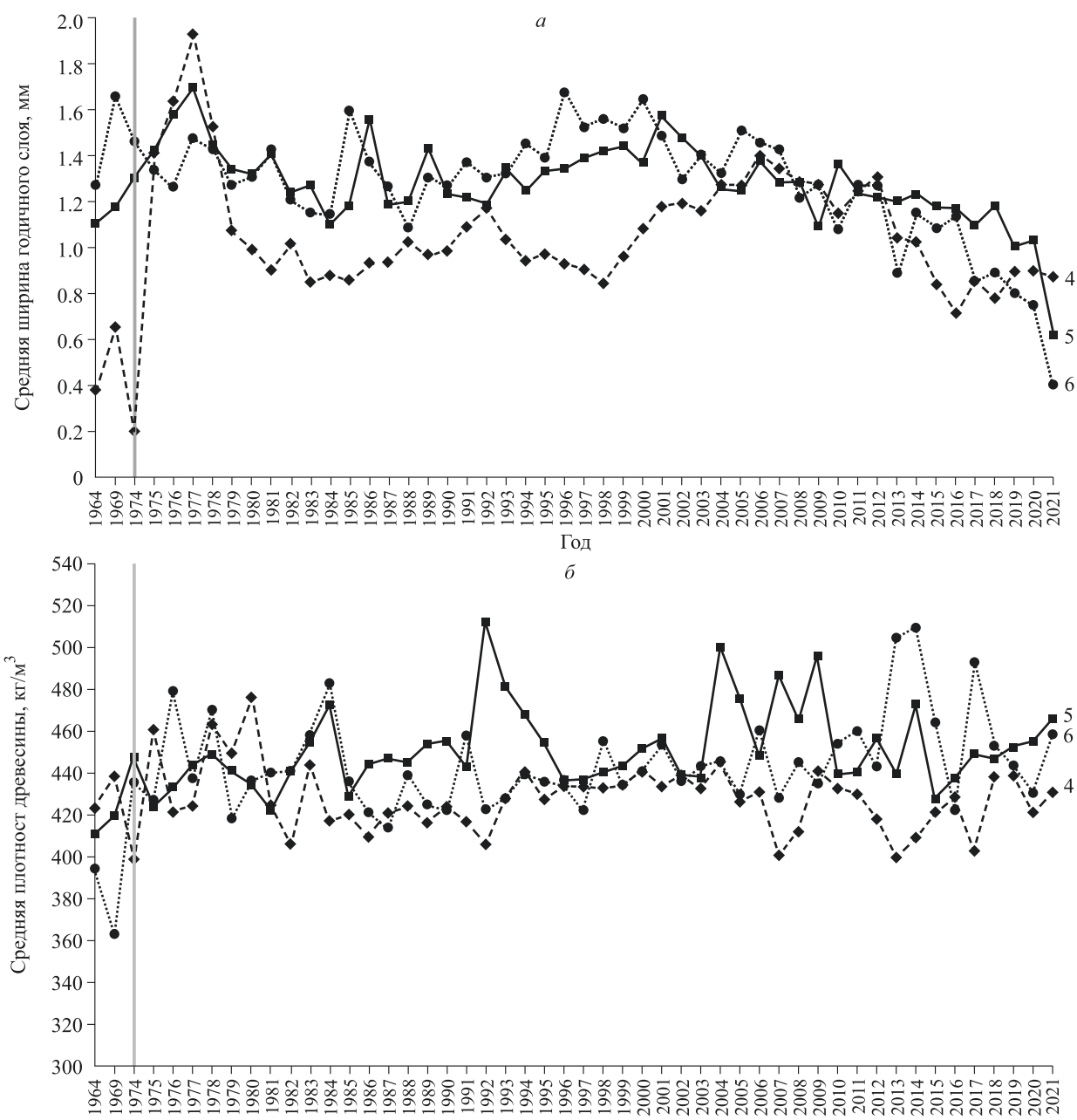


Рис. 5. Средние значения приростов по годам (а) и ρ_{12} (б) по годам ($H = 1.3$ м) на пробных площадях 4–6 вдали от собирателя.

Приведенные наблюдения позволяют оценить существенное влияние уклона местности (см. рис. 1). В свою очередь, таксационное описание в табл. 1 дает представление о наличии редкой сосны в период заболачивания участка именно на ппп 1–4 и о понижении средних диаметров и высот с севера на юг от осушителя-144 к осушителю-134.

Корреляция приростов и плотностей древесины, представленных на рис. 4, 5, составила от -0.47 до -0.52 для разных объектов. Следует отметить разные реакции показателей прироста и плотности (см. рис. 3–5) на аномально жаркие

летние температуры воздуха в Европейской части России в 2003, 2010, 2011 и 2016–2018 гг. Как показывают результаты различных исследований, прирост формируется в основном за счет поздней древесины в ответ на существенные повышения температуры в период вегетации (Усольцев, Залесов, 2005; Усольцев, Цепордей, 2020).

Для анализа показателей макроструктуры и качества древесины на всех исследуемых объектах были взяты керны у деревьев разных ступеней толщины, как средневозрастных (молодых), так и спелых и перестойных (старых) возрастных групп при их наличии.

Таблица 3. Средние показатели макроструктуры и качества древесины кернов модельных деревьев на высоте 1.3 м на объектах исследования

Номер ппп	Ш.Г.С., мм	Число слоев в 1 см	П.Д., %	ρ ₀	ρ ₁₂	σ ₁₂ , МПа
				кг/м ³		
1	1.26 ± 0.13	7 ± 0.4	27 ± 1.0	399 ± 4.9	447 ± 6.0	41 ± 1.0
2	1.01 ± 0.7	9 ± 0.4	27 ± 0.6	400 ± 6.4	448 ± 6.0	41 ± 1.0
3	0.83 ± 0.06	10 ± 0.7	23 ± 0.6	385 ± 3.2	431 ± 3.0	38 ± 0.6
4	1.06 ± 0.09	8 ± 0.3	23 ± 0.6	380 ± 3.6	425 ± 3.6	37 ± 0.7
5	1.28 ± 0.35	7 ± 0.4	27 ± 0.7	396 ± 5.7	443 ± 5.7	40 ± 1.0
6	1.25 ± 0.28	7 ± 0.6	26 ± 1.2	394 ± 5.9	439 ± 5.2	40 ± 1.1

В табл. 3 приведены средние по всем объектам параметры.

Для каждой ппп и у каждого обмеренного дерева (69 деревьев сосны) эти параметры были рассчитаны отдельно. Коэффициент изменчивости различных параметров варьировал в пределах 4–19 %, точность опыта – от 1 до 7 %. Нормальность распределения подтверждается равенством средних, срединных и модальных значений для всех исследуемых параметров.

Достоверность установленных средних значений показателей для всех объектов более 10.

Показатели качества древесины для отдельных деревьев существенно варьируют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На эффективно осушаемых участках леса в сосняках кустарничково-сфагновых северотажного лесного района Арктической зоны Российской Федерации желательна проводить рубки ухода для получения качественной древесины, которая соответствует требованиям, предъявляемым к авиационному кряжу, у отдельных деревьев – уже в средневозрастных древостоях.

2. Оценка динамики параметров древостоя позволяет предположить, что рубки ухода через 10 лет могут быть назначены на всех объектах, и качество древесины в среднем будет повышаться, так как условия произрастания ухудшаются, приросты снижаются, а плотность остается более постоянной и с возрастом должна закономерно возрастать, но желательна провести реконструкцию осушительной сети.

3. Впервые проведенное сопоставление приростов и нормализованной плотности по годам дает более точное представление о развитии древостоя под влиянием различных факторов

(расположение объектов относительно осушительной сети и уклона местности, качество работы каналов, аномально жаркие годы) и может быть использовано в климатических исследованиях.

4. Измерения прироста и плотности древесных стволов по кернам на разных высотах в сочетании с замерами диаметров позволяют одновременно оценить их с точки зрения выхода различных лесоматериалов нужного качества и получить данные, полезные для уточнения общеизвестных показателей поглощения углерода древостоями Арктической зоны Российской Федерации.

5. При анализе таксационных показателей древостоев и оценке качества древесины установлено, что наибольший эффект от осушения получен на участке, расположенном вблизи собирателя и верхнего по склону осушителя, а также то, что древостой, расположенный вблизи собирателя и нижнего по склону осушителя, в меньшей степени отреагировал на воздействие гидротехнической мелиорации.

Статья подготовлена по результатам научно-исследовательских работ, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства «Разработка цифровой имитационной модели динамики экологического состояния и продуктивности лесных экосистем на переувлажненных землях под воздействием природных и антропогенных факторов» (регистрационный номер темы: 122020300230-5) и «Создание и восстановление на сухопутной территории Арктики Российской Федерации многофакторных стационарных (постоянных) опытных лесных объектов» (регистрационный номер темы 123022800118-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабилов Б. В. Гидрологическая роль болот и водное питание рек // ИВУЗ. Лесн. журн. 2018. № 5 (365). С. 38–47.
- Бабилов Б. В., Субота М. Б. Формирование и динамика биотопа культур сосны на торфяных почвах после гидромелиорации // ИВУЗ. Лесн. журн. 2020. № 4 (376). С. 27–39.
- Бабилов Б. В., Шурыгин С. Г., Богданова Л. С. Рост сосновых древостоев на осушенных землях Ленинградской области // Изв. СПбЛТА. 2019. № 227. С. 34–44.
- ГОСТ 16483.10-73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. Введ. в действ. 10.07.1974. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
- ГОСТ 16483.1-84 (СТ СЭВ 388-76). Древесина. Метод определения плотности. Введ. в действ. 01.07.1985. М.: Изд-во стандартов, 1999. 6 с.
- ГОСТ 968-68. Пиломатериалы авиационные (бруски и доски). Тех. условия. Введ. в действ. 01.01.1970. М.: Стандартиформ, 2007. 9 с.
- Инишева Л. И. Болотоведение: учеб. для вузов. Томск: Том. гос. пед. ун-т, 2009. 210 с.
- Лесной план Архангельской области Российской Федерации на 2019–2028 годы. Введ. в действ. 01.01.2019. Архангельск: Правительство Архангельской обл., 2018. 233 с.
- Малышева Н. В., Моисеев Б. Н., Филипчук А. Н., Золина Т. А. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Лесн. вестн. 2017. Т. 21. № 1. С. 4–13.
- Михайлов К. Л. Экотон «тайга-гундра» в условиях обеспечения развития и безопасности материковых арктических территорий Российской Федерации // Актуал. пробл. лесн. комплекса. 2022. № 61. С. 112–114.
- Наквасина Е. Н., Шаврина Е. В. Геоботанические исследования: метод. рекоменд. к полевым работам. Архангельск: ПГУ им. М. В. Ломоносова, 2001. 44 с.
- ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки: изд. офиц. Введ. в действ. 01.01.1984. М.: Изд-во стандартов, 1983. 10 с.
- Пастухова Н. О., Лебедева О. П., Поташева Ю. И. Влияние осушительной мелиорации на выход живицы сосны в условиях северной подзоны тайги Архангельской области // Лесн. вестн. 2017. Т. 21. № 1. С. 36–40.
- Правила ухода за лесами. Утв. приказом Мин-ва природ. ресурсов и экологии РФ от 30.07.2020 № 534. Введ. в действ. 01.01.2021. М.: Мин-во природ. ресурсов и экологии РФ, 2020.
- Соколов Н. Н., Бахтин А. А. Гидротехнические мелиорации. Происхождение, характеристика и классификация болот и избыточно увлажненных лесов: учеб. пособ. Архангельск: АГТУ, 2006. 100 с.
- Тараканов А. М. Рост осушаемых лесов и ведение хозяйства в них. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 228 с.
- Тараканов А. М. Характеристика гидроресурсомелиоративного фонда и природные особенности заболоченных лесов Европейского Севера России // Arct. Environ. Res. 2005. № 2 (8). С. 56–63.
- Тюкавина О. Н. Плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых // ИВУЗ. Лесн. журн. 2020. № 2 (374). С. 73–80.
- Усольцев В. А., Залесов С. В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 147 с.
- Усольцев В. А., Цепордей И. С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 178 с.
- Федотов И. В. Мониторинг состояния осушаемых лесов и ведение хозяйства в них на примере Архангельской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Архангельск: Сев. (Аркт.) фед. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2017. 20 с.
- Федотов И. В., Третьяков С. В., Ильинцев А. С. Влияние гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны // Изв. СПбЛТА. 2016. № 214. С. 131–140.
- Чибисов Г. А. Северному научно-исследовательскому институту лесного хозяйства 50 лет // ИВУЗ. Лесн. журн. 2008. № 5. С. 135–138.
- Чибисов Г. А., Волосевич И. В., Лобова Л. В., Вялых Н. И., Васильев А. А., Прудов Б. Н., Цветков В. Ф., Попов В. Я., Жариков В. М., Артемьев А. И., Чертовской В. Г., Веретенников А. В., Боголепов В. Г., Тараканов А. М., Мочалова Г. А., Паршевников А. Л., Серый В. С., Бахвалов Ю. М., Драчков В. Н., Суханов В. И., Лукин И. Н. Повышение продуктивности лесов Европейского Севера. Архангельск: Арханг. ин-т леса и лесохимии, 1974. 228 с.
- Чибисов Г. А., Москалева С. А., Крыжановская Л. Е. Качество древесины сосны и ели, метод его определения // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере: сб. науч. тр. Архангельск: СевНИИЛХ, 2005. С. 89–99.
- Demol M., Calders K., Krishna Moorthy S. M., Van den Bulcke J., Verbeeck H., Gielen B. Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of above-ground biomass with terrestrial laser scanning // Trees. 2021. V. 35. Iss. 2. P. 671–684.
- Kozakiewicz P., Jankowska A., Mamiński M., Marciszewska K., Ciurzycki W., Tulik M. The wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from post-agricultural lands has suitable properties for the timber industry // Forests. 2020. V. 11. Iss. 10. Article number: 1033. 10 p.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Kemmerer J., Uhl E. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 // For. Ecol. Manag. 2018. V. 429. P. 589–616.
- Roszyk E., Mania P., Iwańska E., Kusiak W., Broda M. Mechanical performance of Scots pine wood from north-western Poland – A case study // BioRes. 2020. V. 15. Iss. 3. P. 6781–6794.
- Seo J., Eckstein D., Buras A., Fromm J., Wilmking M., Olbrich A. Changes in wood anatomical traits in Scots pine under different climate-change scenarios // IAWA J. 2020. V. 41. Iss. 2. P. 202–218.
- Schekalev R. V., Martynyuk A. A., Melekhov V. I. Variability properties of *Pinus sylvestris* L. wood in growing stock under technogenic impact // ИВУЗ. Лесн. журн. (IVUZ. Lesn. zhurn. For. J.). 2020. N. 4 (376). P. 113–122.
- Witowski P., Krajewski A., Kozakiewicz P. Selected mechanical properties of Scots pine wood from antique churches of Central Poland // Europ. J. Wood & Wood Products. 2014. N. 72. P. 293–296.

THE QUALITY OF WOOD OF DRAINED NORTH-TAIGA PINE FORESTS OF ARKHANGELSK OBLAST, DETERMINED BY EXPRESS METHOD

S. V. Tretyakov^{1,2}, S. V. Koptev^{1,2}, A. V. Davydov^{1,2}, M. A. Zagorodskiy^{1,2}, I. V. Tsvetkov^{1,2}, A. A. Paramonov¹, A. A. Karaban^{1,2}

¹ Northern Research Institute of Forestry
Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation

² Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
Naberezhnaya Severnaya Dvina, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation

E-mail: svt@atknet.ru, s.koptev@narfu.ru, a.v.davydov@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, a.paramonov@sevniilh-arh.ru, karaban@sevniilh-arh.ru

The study of the wood quality in the drained pine stand was carried out on the territory of the north taiga of Arkhangelsk Oblast, which belongs to the green zone of the city of Arkhangelsk and the Arctic zone of the Russian Federation. Repeated measurements of forest inventory parameters were carried out on 6 permanent sample plots affected by melioration since 1974 and reconstruction of the drainage network in 1990. Before drainage, a swampy pine stands of the V^b bonitet class grew on them. At present, medium-aged scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands of shrubby-sphagnum forest type, IV bonitet class, grow on the drained area. For half of the plots, it is possible to recommend thinning according to the current Russian Rules of forest care (2020). Some of the trees meet the requirements for the aviation lumber wood quality. For a visual simultaneous analysis of the drainage network quality impact, the location of objects relative to the drainage network and the air temperature in abnormally hot years, diagrams of changes in the average indicators of the width of the annual increment and the wood density in the drained pine stands by year are constructed. Similar diagrams are constructed on the basis of measuring the model tree cores at different relative heights of the trunk. This analytical approach has been applied for the first time. It is suggested that in 10 years the inventory parameters of all facilities will meet the requirements for the thinning purpose, and the wood quality will increase on average, for which it is recommended to reconstruct the channels.

Keywords: Scotch pine, hydraulic melioration, wood density, increments, thinning, Arctic zone of the Russian Federation.

How to cite: Tretyakov S. V., Koptev S. V., Davydov A. V., Zagorodskiy M. A., Tsvetkov I. V., Paramonov A. A., Karaban A. A. The quality of wood of drained north-taiga pine forests of Arkhangelsk Oblast, determined by express method // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 64–74 (in Russian with English abstract and references).

УДК 634.7:631.589.2

АДАПТАЦИЯ РАСТЕНИЙ-РЕГЕНЕРАНТОВ КНЯЖЕНИКИ АРКТИЧЕСКОЙ К УСЛОВИЯМ *ex vitro* С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОПОНИКИ

С. С. Макаров^{1,2}, М. Т. Упадышев³, С. А. Родин⁴, Т. А. Макарова⁵,
З. А. Самойленко⁵, И. Б. Кузнецова⁶

¹ Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49

² Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17

³ Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства
115598, Москва, ул. Загорьевская, 4

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства
141202, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 15

⁵ Сургутский государственный университет
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, проспект Ленина, 1

⁶ Костромская государственная сельскохозяйственная академия
156530, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваяево, Учебный городок, Караваяевская с/а, 34

E-mail: makarov_serg44@mail.ru, virlabor@mail.ru, info@vniilm.ru, tatiana.makarowa2010@yandex.ru,
zoyasl@yandex.ru, sonnereiser@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.

Приведены результаты исследований адаптации растений княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) сортов Astra и Sofia, полученных методом клонального микроразмножения, к нестерильным условиям *ex vitro* с применением гидропонного метода выращивания. Это – высокоценный в пищевом и лекарственном отношении лесной ягодный вид, редко встречаемый и имеющий небольшую урожайность в природных условиях. Адаптация к нестерильным условиям *ex vitro* является одним из лимитирующих этапов клонального микроразмножения. Приживаемость растений-регенерантов княженики арктической исследуемых сортов в условиях гидропонной установки составила 98 %, через месяц после высадки в открытый грунт – 69 %. Они имели более сильные различия по морфометрическим показателям между клонами внутри сорта, чем между сортами. На 20-е сутки адаптации их число достигало 5.0 шт. со средней длиной 2.5 см. После разделения на отдельные побеги на 45-е сутки растения имели в среднем побеги в числе 3.0 шт., со средней длиной 8.3 см. На 45-е сутки выращивания на гидропонной установке растения княженики арктической сорта Sofia имели более высокие морфометрические показатели надземной и корневой систем по сравнению с сортом Astra: по числу корней – на 30.3 %, по суммарной длине корней – на 23 %, по числу листьев – на 20 %, по числу побегов – на 14 %, по длине побегов – на 10 %. Показатели развития корневой системы на гидропонной установке зависели от сортовых особенностей и периода выращивания. Через 2 мес адаптации растения княженики арктической имели корни длиной 10–20 см и приросты побегов 20–30 см, что свидетельствует об их пригодности к высадке в условия открытого грунта.

Ключевые слова: княженика арктическая, сорт, клональное микроразмножение, приживаемость, морфометрические показатели.

DOI: 10.15372/SJFS20230408

ВВЕДЕНИЕ

Княженика арктическая (*Rubus arcticus* L.) является ценным пищевым и лекарственным растением, плоды которого содержат большое количество витаминов и имеют своеобразный приятный вкус и аромат. В природе данный вид произрастает преимущественно в холодной и умеренной зонах в северных широтах, встречается в Скандинавии (Финляндия, Норвегия, Швеция), Северной Америке (Канада, Аляска), России (северные районы Европейской части России, Дальний Восток, Камчатка, Сибирь), Эстонии (Фрейдлинг, 1949; Чернова, 1959; Eichwald, 1965; Ryynänen, 1972; Hultén, Fries, 1986; Karp et al., 2004; Ragnar et al., 2017). Однако занимаемые княженикой площади невелики, при этом в природных популяциях она плодоносит не каждый год, а урожайность ее низкая. В связи с этим целесообразно культивирование этого ягодного вида с использованием гибридных сортов и форм, для чего необходимо увеличение выпуска посадочного материала (Ryynänen, 1973; Hiirsalmi et al., 1987; Pirinen et al., 1998; Kostamo et al., 2013; Тяк и др., 2018).

Одним из самых эффективных методов ускоренного получения посадочного материала на сегодняшний день является клональное микроразмножение (Бутенко, 1999; Сельскохозяйственная биотехнология..., 2015). Процесс адаптации растений к условиям *ex vitro* считается лимитирующим этапом клонального микроразмножения, результаты которого зависят как от состояния укорененных растений, так и от используемого способа адаптации (Деменко, Лебедев, 2011; Шакина, 2020). Обычно для адаптации используют почвенные, торфяные субстраты с добавлением песка, перлита, других компонентов, растения размещают под лампами с фитоспектром, и на протяжении 4–8 нед поддерживают влажность воздуха 100 % (Бьядовский, Упадышев, 2020). Однако почвенные и торфяно-песчаные субстраты нуждаются в стерилизации, тщательном подборе соотношений компонентов, дополнительной проверке свойств (рН, содержание питательных веществ и др.) применительно к биологическим особенностям адаптируемой культуры, смешивании компонентов, что приводит к дополнительным операциям и возрастанию затрат (Деменко, Лебедев, 2011). Поэтому совершенствование этапов укоренения и адаптации является актуальной задачей получения посадочного материала садовых культур, в том числе княженики. Одним из перспектив-

ных методов адаптации может стать гидропонный способ выращивания.

На сегодняшний день существует несколько технологий выращивания ценных ягодных и лекарственных растений в условиях гидропоники: системы глубоководных культур или плавающей платформы (Deep Water Culture, DWC), техника питательного слоя (Nutrient Film Technique, NFT), техника глубинного потока (Deep Flow Technique, DFT), а также система подтопления (приливно-отливная – Ebb & Flow) (Aires, 2018). Преимуществом системы подтопления является обеспечение отличной оксигенации корней. Подъем воды вытесняет отработанный воздух из корневой зоны, а понижение воды обеспечивает поступление нового свежего воздуха. Поэтому данный тип гидропоники очень популярен для выращивания многих культур. Тем не менее, выбор оптимального типа гидропонной системы зависит от многих факторов, в том числе от вида и сорта выращиваемой культуры, а также экономического фактора (Медведев и др., 1996; Texier, 2013).

Основными преимуществами гидропонного метода по сравнению с традиционными являются выращивание растений без почвы с применением искусственных субстратов различного происхождения; отсутствие патогенной почвенной микрофлоры и вредителей; использование малых площадей для непрерывного культивирования; возможность применения готовых долговечных гидропонных систем; многоспектральных светодиодных фитоламп в качестве источников искусственного освещения; комплексных минеральных удобрений с учетом биологических особенностей культуры; получение растительного сырья круглый год вне зависимости от сезона и климатических условий; возможность управления (в том числе автоматизированного) ростом и развитием растений на протяжении всего вегетационного периода; тщательный контроль качества готовой продукции (Вахмистров, 1965; Медведев и др., 1996; Maboko, Du Plooy, 2013; Sharma et al., 2019; Макаров и др., 2020).

Так как княженика – многолетнее растение, и до момента накопления максимального количества вторичных метаболитов может пройти достаточно много времени, установлено, что в гидропонных установках она растет быстрее, чем в почве, за счет своевременного получения достаточного количества питательных веществ и подбора условий культивирования (Benton Jones, 2014). Технология культивирования рас-

тений с применением гидропонного метода нуждается в совершенствовании применительно к сортовым особенностям, виду субстрата, типу источников излучения и конструкции гидропонной установки (Хего et al., 2017).

Цель настоящего исследования – изучить особенности адаптации к нестерильным условиям полученных методом клонального микро-размножения растений княженики арктической с применением гидропонной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выращивание в культуре *in vitro*. Исследования проводили в 2019–2022 гг. в лабораториях биотехнологии на базе Сургутского государственного университета и филиала ФБУ ВНИИЛМ «Центрально-европейская лесная опытная станция». Объектом исследования были растения-регенеранты княженики арктической сортов Astra и Sofia, полученные ранее методом клонального микро-размножения (Макаров и др., 2018). В качестве эксплантов использовали пазушные почки растений. Растения культивировали на питательной среде по прописи Мурасиге – Скуга с разбавлением минерального состава водой в 2 раза (1/2 МС) в течение 5 нед в условиях световой комнаты при 16-часовом фотопериоде с поддержанием освещения интенсивностью 1500–2000 лк, температуры воздуха 22–25 °С, влажности воздуха 80 %. В качестве регулятора роста на этапе пролиферации использовали 6-бензиламинопурил (6-БАП) (Acros Organics, Россия) в концентрации 0.5 мг/л с добавлением препарата Эпин-Экстра (Нэст-М, Россия) в концентрации 0.1 мг/л. На этапе укоренения микропобегов использовали индолил-масляную кислоту (ИМК) (Hebei Hontai Biotech Co., Китай) в концентрации 0.5–1.0 мл/л с добавлением препарата Экогель (Биохимические технологии, Россия) в концентрации 0,5 мл/л.

Адаптация к условиям *ex vitro*. Растения адаптировали в режиме периодического затопления в гидропонной установке «Система-4Д» горизонтального типа, которая представляет собой стеллаж высотой 198 см, шириной 132 см с 2 поддонами размером 130 × 50 см, крышками с отверстиями для горшков диаметром 6 см, баком объемом 100 л для питательного раствора, насоса, питающих и возвратных шлангов, соединяющих бак с поддоном, для транспортировки питательного раствора.

Укоренившиеся в условиях *in vitro* растения-регенеранты княженики арктической из пробирок промывали в дистиллированной воде от агара, помещали в контейнеры диаметром 6 см, заполненные на 1/3 объема стерильным керамзитом фракцией 0.5–1.0 см. Контейнеры с растениями размещали в культивационном помещении, где поддерживали оптимальные условия: температуру воздуха 23–25 °С, температура раствора 20 °С, влажность воздуха – 55–65 %. Первые 3 сут растения прикрывали прозрачной пленкой для увеличения влажности воздуха. Освещение растений осуществляли белыми светодиодными лампами, световой поток которых составлял 8000 лм, цветовая температура – 4000 К, PPF – 165 мкмоль/(с · м²). Лампы располагали на высоте 50 см от растений. На протяжении всей вегетации растения выращивали при 16-часовом световом периоде. Питательный раствор подавали в течение 15 мин 6 раз в сутки. Электропроводность питательного раствора варьировала в пределах 0.8–1.8 мСм/см. Первые 10 дней культивации растений в гидропонной установке электропроводность питательного раствора составляла 0.8 мСм/см, далее в течение следующих 10 дней концентрацию солей увеличивали до 1.3 мСм/см, а после 20 сут культивации – до 1.8 мСм/см. Уровень кислотности (pH) раствора – 5.8–6.0. Замену питательного раствора проводили каждые 7 дней. Выращивание княженики арктической проводили в питательном растворе на основе полностью растворимых комплексных удобрений с микроэлементами Yara Ferticare Hydro (NPK 6:14:30) (Yara International, Норвегия) и кальциевой селитры (CaN₂O₆). В качестве контроля растения выращивали в садках, поливали проточной (отстоянной) водой с добавлением микро- и макросолей по прописи 1/10 МС.

Для каждого сорта было отобрано по 5 клонов. Изначально все растения были высажены в горшки конгломератами (клонами – без разделения их на отдельные побеги), через 30 сут их разделяли и пересаживали по одному в каждом горшке. Через 20 и 45 сут после посадки в гидропонные установки проводили учет морфометрических параметров растений надземной (количество побегов, листьев и почек возобновления, средняя длина побегов) и подземной (количество и длина корней) частей растений. Статистическую обработку данных проводили с использованием Microsoft Office Excel 2016 и StatSoft Statistica 10.0.1011.6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов выявлено, что приживаемость микрорастений княженики арктической, выращенных в условиях гидропонной установки, составила 98 %, тогда как в контроле приживаемость не превышала 50 %. Отмечена гибель единичных растений с плохо развитой корневой системой, причем такие растения погибали в течение первых 4–7 дней после высадки на адаптацию (рис. 1, а).

У адаптируемых растений установлены более сильные различия по морфометрическим показателям между клонами внутри сорта, чем между двумя сортами (табл. 1).

У сорта Astra при высадке растений конгломератами (без разделения на отдельные побеги) число побегов на 20-е сутки варьировало у разных клонов от 3 до 8, число листьев – от 3 до 12, почек – от 2 до 5. Средняя длина побегов у растений этого сорта составляла 2.2–2.7 см (рис. 1, б).

После разделения конгломерата растения княженики арктической сорта Astra характеризовались более активным ростом в высоту (рис. 1, в). Через 45 сут адаптации растения достигали высоты 8.4 ± 0.14 см, при этом число почек возобновления было меньше в 1.5 раза по сравнению с выращиванием растений конгломератами. У растений сорта Sofia (без разделения на побеги) число побегов у разных клонов составляло в среднем 5.5 ± 0.08 шт., листьев –

6.5 ± 0.09 шт., почек – 4.0 ± 0.02 шт., длина побегов – 2.8 ± 0.02 см. Растения обоих исследуемых сортов после разделения конгломерата начинали активно расти, формируя хорошо облиственные побеги.

В среднем длина побегов у растений княженики арктической обоих сортов на 20-е сутки составляла соответственно 2.5 ± 0.01 см, на 45-е – 8.3 ± 0.11 см. После разделения на побеги растения обоих сортов формировали по 2–3 почки возобновления.

На 45-е сутки растения княженики арктической сорта Sofia характеризовались несколько более высокими морфометрическими параметрами по сравнению с сортом Astra: количество побегов было выше на 14 %, количество листьев – на 20 %, длина побегов – на 10 %.

Показатели развития корневой системы княженики зависели от сортовых особенностей и периода выращивания (табл. 2).

На 20-е сутки выращивания суммарная длина корней у растений сорта Astra была в 1.7 раза больше, чем у сорта Sofia (при одинаковом числе корней). Однако после разделения побегов на 45-е сутки растения сорта Sofia характеризовались более сильным развитием по сравнению с сортом Astra. Корневая система у растений сорта Sofia, как и надземная, развивалась лучше, чем у сорта Astra: суммарная длина корней была больше на 23 %, а количество корней – на 30.3 %.

Растения княженики через 38–45 сут представляли собой куст с несколькими побегами (рис. 2, а, б).

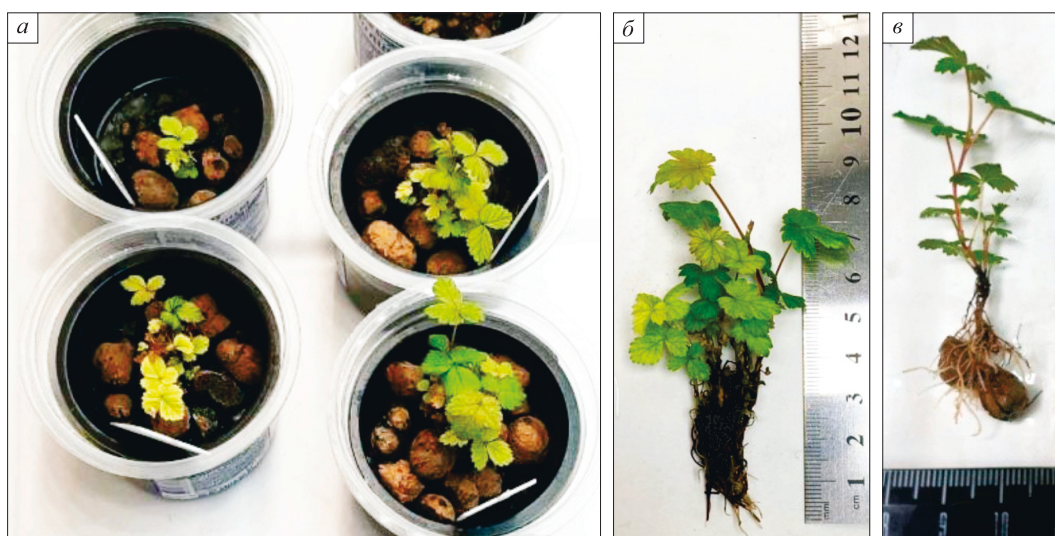


Рис. 1. Адаптируемые растения княженики арктической сорта Astra после высадки в контейнеры с керамзитом.

а – через 8 сут; б – на 20-е сутки; в – на 30-е сутки.

Таблица 1. Морфометрические показатели надземной части княженики арктической в условиях гидропоники (среднее за 3 года)

Сорт	Номер клона	Число, шт.			Средняя длина побегов, см
		побегов	листьев	почек возобновления	
20-е сутки					
Astra	1	8.0 ± 0.27	12 ± 0.33	5.0 ± 0.10	2.7 ± 0.04
	2	5.0 ± 0.11	10 ± 0.32	4.0 ± 0.13	2.3 ± 0.09
	3	3.0 ± 0.13	3.0 ± 0.11	2.0 ± 0.14	2.2 ± 0.08
	4	4.0 ± 0.14	6.0 ± 0.21	3.0 ± 0.12	2.6 ± 0.09
	5	4.0 ± 0.17	5.0 ± 0.19	3.0 ± 0.10	2.3 ± 0.10
Среднее по сорту...		4.8	7.2	3.4	2.4
Sofia	1	5.0 ± 0.18	3.0 ± 0.12	2.0 ± 0.11	2.5 ± 0.11
	2	6.0 ± 0.19	5.0 ± 0.18	4.0 ± 0.11	3.7 ± 0.18
	3	4.0 ± 0.16	5.0 ± 0.11	6.0 ± 0.19	2.5 ± 0.16
	4	8.0 ± 0.13	10 ± 0.38	6.0 ± 0.18	2.3 ± 0.17
	5	3.0 ± 0.21	3.0 ± 0.2	4.0 ± 0.16	1.8 ± 0.09
Среднее по сорту...		5.2	5.2	4.4	2.6
45-е сутки					
Astra	1	3.0 ± 0.03	6.0 ± 0.09	2.0 ± 0.02	4.2 ± 1.10
	2	2.0 ± 0.02	4.0 ± 0.05	3.0 ± 0.09	5.5 ± 1.32
	3	2.0 ± 0.01	9.0 ± 0.09	2.0 ± 0.01	6.7 ± 1.48
	4	4.0 ± 0.02	8.0 ± 0.07	2.0 ± 0.03	12.6 ± 1.49
	5	3.0 ± 0.02	9.0 ± 0.10	2.0 ± 0.02	10.3 ± 1.68
Среднее по сорту...		2.8	7.2	2.2	7.9
Sofia	1	3.0 ± 0.04	8.0 ± 0.09	2.0 ± 0.03	5.1 ± 1.22
	2	3.0 ± 0.06	9.0 ± 0.11	3.0 ± 0.04	6.9 ± 1.12
	3	4.0 ± 0.08	8.0 ± 0.13	3.0 ± 0.03	8.9 ± 1.44
	4	4.0 ± 0.06	9.0 ± 0.12	2.0 ± 0.04	10.9 ± 1.52
	5	2.0 ± 0.04	9.0 ± 0.14	2.0 ± 0.02	11.7 ± 1.42
Среднее по сорту...		3.2	8.6	2.4	8.7

Таблица 2. Морфометрические показатели подземной части княженики арктической в условиях гидропоники (среднее за 3 года)

Сорт	Номер клона	Число корней, шт.	Длина корней, см		Число корней, шт.	Длина корней, см	
			средняя	суммарная		средняя	суммарная
20-е сутки							
Astra	1	1.9 ± 0.54	4.9 ± 0.42	9.3 ± 0.99	3.5 ± 0.52	2.9 ± 0.40	10.1 ± 1.09
	2	1.7 ± 0.41	4.7 ± 0.38	8.2 ± 1.01	4.2 ± 0.40	2.2 ± 0.14	9.0 ± 1.01
	3	1.6 ± 0.32	3.8 ± 0.29	6.0 ± 1.02	3.7 ± 0.39	3.0 ± 0.47	11.3 ± 1.12
	4	1.5 ± 0.41	5.4 ± 0.52	8.0 ± 1.07	3.5 ± 0.44	3.4 ± 0.51	12.0 ± 1.19
	5	1.4 ± 0.38	5.3 ± 0.48	7.4 ± 1.03	6.5 ± 0.78	1.2 ± 0.10	8.0 ± 1.02
Среднее по сорту...		1.6	4.8	7.8	4.3	2.5	10.0
Sofia	1	1.6 ± 0.40	2.1 ± 0.18	3.2 ± 0.90	4.4 ± 0.50	2.6 ± 0.42	11.0 ± 1.14
	2	1.4 ± 0.28	3.3 ± 0.40	4.6 ± 0.96	5.2 ± 0.61	2.7 ± 0.44	14.1 ± 1.12
	3	1.5 ± 0.36	3.4 ± 0.38	5.0 ± 0.89	6.4 ± 0.76	1.6 ± 0.16	10.0 ± 1.09
	4	1.6 ± 0.29	4.7 ± 0.44	7.6 ± 0.84	5.9 ± 0.70	2.0 ± 0.22	12.0 ± 1.04
	5	1.8 ± 0.52	1.7 ± 0.14	3.0 ± 0.12	6.0 ± 0.81	2.4 ± 0.27	14.2 ± 1.11
Среднее по сорту...		1.6	3.0	4.7	5.6	2.3	12.3



Рис. 2. Растения княженики арктической сорта Astra после высадки на адаптацию.

а – на 38-е сутки; *б* – на 45-е сутки; *в*, *з* – на 60-е сутки культивирования

При этом на 45-е сутки растения имели хорошо развитую надземную и корневую систему.

Через 2 мес после высадки на адаптацию растения княженики формировали приросты побегов 20–30 см (рис. 2, *в*), корни длиной 10–20 см (рис. 2, *з*) и были готовы к высадке в полевые условия.

После высадки в условия открытого грунта в I декаде июля в торфопесчаную смесь, дополненную перегноем, приживаемость растений княженики через месяц после пересадки составила 69.0 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что приживаемость растений-регенерантов княженики арктической

сортов скандинавской селекции, полученных методом клонального микроразмножения, в условиях гидропонной установки составила 98 %, через месяц после высадки в открытый грунт – 69 %. У растений установлены более сильные различия по морфометрическим показателям между клонами внутри сорта, чем между двумя изученными сортами. При высадке растений-регенерантов сортов Astra и Sofia в конгломератах на 20-е сутки адаптации формировалось в среднем 5.0 шт. побегов длиной 2.5 см. После разделения на отдельные побеги растения княженики через 45 сут после высадки на адаптацию образовывали в среднем 3.0 шт. побегов длиной 8.3 см. При этом на 45-е сутки выращивания на гидропонной установке растения княженики арктической сорта Sofia несколько превышали по морфометрическим параметрам сорт Astra:

по числу листьев – на 20 %, по числу побегов – на 14 %, по длине побегов – на 10 %. Показатели развития корневой системы на гидропонной установке зависели от сортовых особенностей и периода выращивания. Корневая система растений княженики арктической сорта Sofia имела более высокие показатели по сравнению с сортом Astra: по числу корней – на 30.3 %, по суммарной длине корней – на 23 %. Через 60 дней после высадки на адаптацию растения формировали корни длиной 10–20 см, приросты побегов составляли 20–30 см и были пригодны к высадке в полевые условия. Полученные результаты позволяют говорить о перспективе использования гидропонной установки для адаптации сортового посадочного материала *in vitro* княженики арктической в целях дальнейшего выращивания на ягодных плантациях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации по плановой теме «Разработка способов получения посадочного материала лесных ягодных растений для выращивания на нелесных землях» (Приказ Рослесхоза № 1061 от 25.12.2018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бутенко Р. Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнологии на их основе: учеб. пособ. М.: ФБК-Пресс, 1999. 160 с.
- Бьядовский И. А., Упадышев М. Т. Клональное микроразмножение плодовых культур: метод. рек. М.: ФГБНУ ФНЦ Садоводство, 2020. 69 с.
- Вахмистров Д. Б. Растения без почвы. М.: Дет. лит-ра, 1965. 111 с.
- Деменко В. И., Лебедев В. А. Адаптация растений, полученных *in vitro*, к нестерильным условиям // Изв. ТСХА. 2011. Вып. 1. С. 60–70.
- Макаров П. Н., Макарова Т. А., Самойленко З. А., Гулакова Н. М. Технология выращивания эфиромасличных культур в закрытых системах // Вестн. Нижневарт. гос. ун-та. 2020. № 2. С. 53–59.
- Макаров С. С., Кузнецова И. Б., Смирнов В. С. Совершенствование технологии клонального микроразмножения княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) // Лесохоз. информ. 2018. № 4. С. 91–97.
- Медведев С. С., Осмоловская Н. Г., Батов А. Ю., Разумова Н. А., Шлычков В. С. Выращивание экологически чистой растительной продукции без почвы в многоярусных гидропонных установках. СПб.: Петрополис, 1996. 68 с.
- Сельскохозяйственная биотехнология и биоинженерия / Под ред. В. С. Шевелухи. М., 2015. 715 с.
- Тяк Г. В., Макаров С. С., Калашиникова Е. А., Тяк А. В. Размножение и культивирование княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) // Плодоводство и ягодоводство России. 2018. Т. 52. С. 95–99.
- Фрейдлинг М. В. Поляника (*Rubus arcticus* L.) // Изв. Карел.-Фин. филиала АН СССР. 1949. № 3. С. 49–57.
- Чернова Е. П. Поляника (*Rubus arcticus* L.) и ее введение в культуру. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1959. 35 с.
- Шакина Т. Н. Опыт адаптации растений-регенерантов к условиям *ex vitro* некоторых декоративных и плодовых культур в Учебно-научном центре «Ботанический сад» Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского // Пробл. ботаники Юж. Сибири и Монголии. 2020. Т. 19. № 1. С. 315–320.
- Aires A. Hydroponic production systems: Impact on nutritional status and bioactive compounds of fresh vegetables // Vegetables – importance of quality vegetables to human health / Md. Asaduzzaman, T. Asao (Eds.). IntechOpen, 2018. P. 55–66.
- Benton Jones J. Jr. Complete guide for growing plants hydroponically. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2014. 206 p.
- Eichwald K. Soomurakas (*Rubus arcticus* L.) (Arctic bramble (*Rubus arcticus* L.)) // Haruldasi ja kaitstavaid taimeliike Eestis. Abiks loodusevaatlajale (Rare and protected plant species in Estonia. Helpful for nature watchers). 1965. N. 53. P. 26–28.
- Hiirsalmi H., Junnila S., Säkö J. «Aura» and «Astra2», Finnish arctic bramble hybrid varieties // Ann. Agr. Fenn. 1987. V. 26. Iss. 4. P. 261–269.
- Hultén E., Fries M. Atlas of North European vascular plants north of the Tropic of Cancer. Königstein: Koeltz Sci. Books, 1986. 498 p.
- Karp K., Mänd M., Starast M., Paal T. Nectar production of *Rubus arcticus* // Agron. Res. 2004. V. 2. N. 1. P. 57–61.
- Kostamo K., Toljamo A., Antonius K., Kokko H., Kärenlampi S. O. Morphological and molecular identification to secure cultivar maintenance and management of self-sterile *Rubus arcticus* // Ann. Bot. 2013. V. 111. Iss. 4. P. 713–721.
- Maboko M. M., Du Plooy C. P. High-plant density planting of basil (*Ocimum basilicum*) during summer/fall growth season improves yield in a closed hydroponic system // Acta Agr. Scand. Sect. B. – Soil & Plant Sci. 2013. V. 63. Iss. 8. P. 748–752.
- Pirinen H., Dalman P., Kärenlampi S., Tammisola J., Kokko H. Description of three new arctic bramble cultivars and proposal for cultivar identification // Agr. Food Sci. in Finland. 1998. V. 7. N. 4. P. 455–468.
- Ragnar M., Rytönen P., Hedh J. Åkerbär. Luleå, Sweden: Black Island Books, 2017. 169 p.
- Ryynänen A. Arctic bramble (*Rubus arcticus* L.) a new cultivated plant // Ann. Agr. Fenn. 1972. V. 11. P. 170–174.
- Ryynänen A. *Rubus arcticus* L. and its cultivation // Ann. Agr. Fenn. 1973. V. 12. P. 1–76.
- Sharma N., Acharya S., Kumar K., Singh N., Chaurasia O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview // J. Soil and Water Conserv. 2019. V. 17. N. 4. P. 364–371.
- Texier W. Hydroponics for everybody. All about home horticulture. Paris, France: Mama Publ., 2013. 328 p.
- Xego S., Kambizi L., Nchu F. Effects of different hydroponic substrate combinations and watering regimes on physiological and anti-fungal properties of *Siphonochilus aethiopicus* // Afr. J. Tradit. Complement. Altern. Med. 2017. V. 14. N. 3. P. 89–104.

ADAPTATION OF REGENERATED PLANTS OF *Rubus arcticus* L. TO *ex vitro* CONDITIONS USING HYDROPONICS

S. S. Makarov^{1, 2}, M. T. Upadyshev³, S. A. Rodin⁴, T. A. Makarova⁵,
Z. A. Samoylenko⁵, I. B. Kuznetsova⁶

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434 Russian Federation

² Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation

³ Federal Scientific Breeding and Technological Center for Horticulture and Nursery
Zagor'evskaya Str., 4, Moscow, 115598 Russian Federation

⁴ All-Russian Scientific Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry
Institutskaya Str., 15, Pushkino, Moscow Oblast, 141202 Russian Federation

⁵ Surgut State University
Prospekt Lenina, 1, Surgut, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, 628412 Russian Federation

⁶ Kostroma State Agricultural Academy
Uchebny Gorodok Str., 34, Karavaevskaya s/a, Karavaevo, Kostroma District, Kostroma Oblast,
156530 Russian Federation

E-mail: makarov_serg44@mail.ru, virlabor@mail.ru, info@vniilm.ru, tatiana.makarowa2010@yandex.ru,
zoyasl@yandex.ru, sonnereiser@yandex.ru

The results of studies on the adaptation of arctic bramble (*Rubus arcticus* L.) plants of Astra and Sofia cultivars obtained by the clonal micropropagation method to non-sterile *ex vitro* conditions using the hydroponic method of cultivation are discussed in the article. The arctic bramble is a highly valuable species of forest berry plants in food and medicinal relations, rarely found and having a low yield in natural conditions. Adaptation to non-sterile *ex vitro* conditions is one of the limiting stages in clonal micropropagation. The survival rate of regenerated plants of arctic bramble of the studied cultivars in the conditions of a hydroponic system is 98 %, 1 month after planting in open ground – 69 %. Regenerated plants have stronger differences in morphometric parameters between clones within a cultivar than between cultivars. The arctic bramble planted in conglomerates formed shoots in the amount of 5.0 pcs. with an average length of 2.5 cm on the 20th day of adaptation. On the 45th day of arctic bramble plants after division into separate shoots had an average of 3.0 pcs. shoots with an average length of 8.3 cm. The arctic bramble plants of the Sofia cultivar have higher morphometric parameters of the above-ground and root systems compared to the Astra cultivar on the 45th day of cultivation in a hydroponic system: by the number of roots – by 30.3 %, by the total length of the roots – by 23 %, by the number of leaves – by 20 %, by the number of shoots – by 14 %, by the length of the shoots – by 10 %. The indicators of the development of the root system on a hydroponic installation depended on the varietal characteristics and the growing period. The arctic bramble plants have roots 10–20 cm long and shoot growths of 20–30 cm after 2 months of adaptation, which indicates its suitability for planting in open ground conditions.

Keywords: arctic bramble, cultivar, clonal micropropagation, survival rate, morphometric parameters.

How to cite: Makarov S. S., Upadyshev M. T., Rodin S. A., Makarova T. A., Samoylenko Z. A., Kuznetsova I. B. Adaptation of regenerated plants of *Rubus arcticus* L. to *ex vitro* conditions using hydroponics// *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 75–82 (in Russian with English abstract and references).

CONTENTS

METHODS OF THE STUDIES

<i>A. G. Rassolov, A. S. Shishikin</i> Typology of Forest Hunting Grounds	3
--	---

RESEARCH ARTICLES

<i>G. I. Antonov, V. A. Senashova, G. G. Polyakova, N. V. Pashenova, S. V. Zhila, I. D. Grodnitskaya</i> Influence of Innovative Biofertilizers on Soil Biological Activity and Undergrowth of Scotch Pine After Felling and Fire	12
<i>T. A. Burenina, E. V. Fedotova, C. F. Zang</i> Altitudinal-Belt Variability of Evapotranspiration of Forest Ecosystems in the Mountains of Southern Siberia	26
<i>V. A. Usoltsev, I. S. Tsepordey</i> Rank Distribution of a Tree Phytomass Fractions in New Interpretation	41
<i>L. I. Borodintseva, V. V. Tarakanov, T. V. Goncharova</i> Productivity and Quality of Seeds of the Siberian Stone Pine on Forest Seed Orchards in the Republic of Altai	52
<i>A. V. Dancheva, S. V. Zalesov, V. S. Korovina</i> Relationship of Forest Survey Parameters with Indicators of Condition in Pine Protective Stands	58
<i>S. V. Tretyakov, S. V. Koptev, A. V. Davydov, M. A. Zagorodskiy, I. V. Tsvetkov, A. A. Paramonov, A. A. Karaban</i> The Quality of Wood of Drained North-Taiga Pine Forests of Arkhangelsk Oblast, Determined by Express Method	64
<i>S. S. Makarov, M. T. Upadyshev, S. A. Rodin, T. A. Makarova, Z. A. Samoylenko, I. B. Kuznetsova</i> Adaptation of Regenerated Plants of <i>Rubus arcticus</i> L. to ex vitro Conditions Using Hydroponics	75

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Г. Рассолов, А. С. Шишикин

Типология лесных охотничьих угодий	3
--	---

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

Г. И. Антонов, В. А. Сенашова, Г. Г. Полякова, Н. В. Пашенова, С. В. Жила, И. Д. Гродницкая

Влияние инновационных биоудобрений на биологическую активность почвы и подрост сосны обыкновенной после рубок и пожара	12
---	----

T. A. Burenina, E. V. Fedotova, C. F. Zang

Altitudinal-belt variability of evapotranspiration of forest ecosystems in the mountains of Southern Siberia	26
---	----

В. А. Усольцев, И. С. Цепордей

Ранговое распределение фракций фитомассы деревьев в новом освещении	41
---	----

Л. И. Бородинцева, В. В. Тараканов, Т. В. Гончарова

Продуктивность и качество семян кедра сибирского на лесосеменных объектах в Республике Алтай	52
---	----

А. В. Данчева, С. В. Залесов, В. С. Коровина

Взаимосвязи таксационных показателей древостоев с их состоянием в сосновых насаждениях защитного назначения	58
--	----

С. В. Третьяков, С. В. Коптев, А. В. Давыдов, М. А. Загородский, И. В. Цветков,

А. А. Парамонов, А. А. Карабан

Качество древесины осушаемых северотаежных сосняков Архангельской области, определенное экспресс-методом	64
---	----

С. С. Макаров, М. Т. Упадышев, С. А. Родин, Т. А. Макарова, З. А. Самойленко, И. Б. Кузнецова

Адаптация растений-регенерантов княженики арктической к условиям <i>ex vitro</i> с применением гидропоники	75
---	----