

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

ISSN 2311-1410

Сибирский лесной журнал

Номер 3
Май–Июнь 2024



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 3 May–June 2024

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), Alexander I. Belyaev (RF), Vera E. Benkova (RF), Kapitolina S. Bobkova (RF), Jiquan Chen (USA), Tumen N. Chimitdorziev (RF), Chimidnyam Dorjsuren (Mongolia), Chultem Dugarjav (Mongolia), Alexey A. Dymov (RF), Steve Eubanks (USA), 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), 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), 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. Usoltsev (RF), Eugene A. Vaganov (RF), Viktor I. Voronin (RF), Chuankuan Wang (China), Adam X. Wei (Canada), Yulay A. Yanbaev (RF), Vasily T. Yarmishko (RF)

Leading Editor

Tatyana A. Nikitina

Scientific Editor

Kseniya A. Kryukova

Technical Editor

Tatyana R. Pantyukhina

Scientific Editor for this Issue of the Journal

Yury N. Baranchikov

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

№ 3 2024 Май–Июнь

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),
А. И. Беляев (РФ), В. Е. Бенкова (РФ), К. С. Бобкова (РФ), Е. А. Ваганов (РФ), Ч. Ван (Китай), А. Х. Вей (Канада),
В. И. Воронин (РФ), С. Н. Горшкевич (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), Ю. Н. Краснощеков (РФ), К. В. Крутовский (РФ, Германия), А. М. Крышень (РФ),
К. А. Крюкова (*научный редактор*, РФ), К. Н. Кулик (РФ), А. Н. Куприянов (РФ), Ж. Ли (Канада), С. Линдер (Швеция),
С. Р. Лоскутов (РФ), Т. А. Москалюк (РФ), Е. Н. Муратова (РФ), С. В. Осипов (РФ), Т. А. Никитина (*ведущий редактор*, РФ),
И. Н. Павлов (РФ), Х. Пелтола (Финляндия), А. В. Пименов (РФ), В. Пихлер (Словакия), А. С. Прокушкин (РФ),
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. Шапченкова (РФ), А. З. Швиденко (РФ, Австрия), О. В. Шергина (РФ),
А. С. Шишкин (РФ), С. Д. Шлотгауэр (РФ), К. Шмulliус (Германия), Д. Г. Щепаченко (РФ, Австрия),
С. Юбанкс (США), Ю. А. Ямбаев (РФ), В. Т. Ярмишко (РФ)

Научный редактор номера
Ю. Н. Баранчиков

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», 2024
© Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), 2024



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: Ulrichweb: 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: sibirskiiylesnoyjournal.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 27.05.2024. Выход в свет 28.06.2024. Бумага типографская. Формат 60 × 84 1/8

Усл. печ. л. 15.3. Уч.-изд. л. 13.1. Тираж 100 экз. Заказ № 120. 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>

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

УДК 630*

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА ТЕМАТИЧЕСКОГО НОМЕРА «СИБИРСКОГО ЛЕСНОГО ЖУРНАЛА»

Ю. Н. Баранчиков

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

E-mail: baranchikov_yuri@yahoo.com

Поступила в редакцию 11.06.2024 г.

Представлен краткий обзор содержания статей тематического номера «Сибирского лесного журнала» 2024 г., № 3, посвященного лесным стационарным исследованиям.

Ключевые слова: *Сибирский лесной журнал, 2024, № 3, стационарные исследования, лесные экосистемы, краткий редакторский обзор содержания тематического номера.*

DOI: 10.15372/SJFS20240301

Эмпирический подход был и остается основным в получении новых знаний в лесоведении и смежных науках. Разрабатывая детальную программу лесных биогеоценотических исследований, академик В. Н. Сукачев указывал на необходимость комплексного подхода к изучению биогеоценозов и придавал особое значение стационарным исследованиям. Он писал: «...чтобы управлять процессами, идущими в биогеоценозе, надо их знать, надо знать все условия, их определяющие. Отсюда вытекает, что такое изучение должно быть комплексным, т. е. фито-, зоо-, педо- и климатологическим и в то же время динамическим. Это может достигаться лишь длительным стационарным изучением биогеоценозов...» (Сукачев, 1972, с. 358). Без многолетних стационарных наблюдений невозможно обойтись в изучении природы леса, как невозможно и существование научных лесных институтов, преемственность и поддержание научных школ, подготовка молодых специалистов (Вомперский, 2001). Российские ученые имеют большой опыт комплексных стационарных исследований. Их результаты можно найти как в многочисленных статьях и монографиях (некоторые обзоры см. Москалюк и др., 2018;

Сибирина и др., 2022; и др.), так и в трудах ряда специализированных конференций (Лесные стационарные исследования..., 2001; Стационарные исследования..., 2008, 2016; Комплексные стационарные исследования..., 2017; Научные исследования, 2022; и др.). Несмотря на современные трудности в финансовом, материально-техническом, приборном и кадровом обеспечении экспериментальных полевых баз, подобные работы продолжаются. О результатах некоторых из них рассказывают авторы этого специализированного выпуска.

Уникальный обзор почти 80-летней работы одного из старейших лесных стационаров Академии наук СССР/России на юго-востоке Воронежской области – Теллермановского опытного лесничества Института лесоведения РАН – представили И. А. Уткина и В. В. Рубцов. Созданное при живейшем участии основателя Института леса – академика В. Н. Сукачева – лесничество послужило полигоном для работы специалистов разного профиля: лесоводов, геоботаников, почвоведов, зоологов, микробиологов, энтомологов и фитопатологов. Обзор снабжен обширным списком литературы, отражающим основные результаты научных исследований стационара.

Цикл из четырех статей посвящен результатам работы научного консорциума «Ритм углерода» над Российской системой климатического мониторинга (ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»).

В статье А. Г. Дюкарева и соавторов изложены результаты многолетней работы в южно-таежных пихтарниках Томь-Яйского междуречья в Томской области, в ходе которой изучены характеристики древостоев, подроста, подлеска, крупных древесных остатков, напочвенного покрова, почв и их вклад в депонирование углерода. Впервые приводятся данные о фитомассе напочвенного покрова южно-таежных пихтарников Западной Сибири, в среднем оцененной в 0.88 т/га, с широким варьированием данного показателя в связи с особенностями горизонтальной структуры напочвенного покрова и разной освещенностью в подкروновых парцеллах и окнах. Описаны особенности состава, структуры и термического режима почв изученных биогеоценозов. Приведены данные об изменении продуктивности фитоценозов, гумуса почв и запасов углерода в различных компонентах изученных лесов.

Подробный обзор основных результатов многолетних инструментальных исследований потоков углерода в экосистемах подзоны средней тайги Центральной Сибири на базе Средне-Енисейского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН (обсерватории ZOTTO) представлен в статье А. В. Панова и соавторов. Показана динамика концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере с 2009 по 2020 г. Рассчитаны значения чистого экосистемного обмена CO_2 для лесоболотных комплексов, свидетельствующие, что они выступают поглотителем (стоком) CO_2 атмосферы. Для репрезентативных экосистем представлены оценка почвенных эмиссионных потоков CO_2 и сезонный ход фотосинтетической ассимиляции углерода доминантами подчиненного яруса растительности. Выявлены закономерности поведения растворенных форм углерода в водах ручьев, дренирующих олиго- и эвтрофный болотные массивы в районе исследований, представлены показатели эмиссии CO_2 с водной поверхности.

Работа А. С. Прокушкина и соавторов посвящена исследованию внутрисезонной и межгодовой динамики концентраций углерода в реках Среднесибирского плоскогорья и использованию показателей латерального стока в расчетах

баланса углерода, а также определению источников растворенного органического и неорганического углерода на основе качественных характеристик изучаемых вод. Важным направлением проведенных исследований стало освещение влияния усиливающихся с потеплением климата лесных пожаров на динамику и трансформацию латерального стока углерода. Проведенный долговременный мониторинг свидетельствует о резком снижении концентраций органического углерода в стоке ручьев, бассейны которых подверглись пирогенному воздействию, и, одновременно, о росте концентраций неорганического углерода. Авторы справедливо полагают, что наблюдаемое сокращение стока рек в результате пожаров будет определять общее уменьшение масштабов выноса терригенного углерода из наземных ландшафтов.

В. В. Ивановым и А. Н. Борисовым изучена структура углеродного пула в средневозрастных и спелых сосновых древостоях Красноярской лесостепи при рубках ухода за лесом. Основой для расчетов послужили данные по динамике объемных запасов насаждений. В соответствии с методом конверсионных коэффициентов, на основе данных по запасу, рассчитывалась фитомасса фракций (ствол, кора, ветви и хвоя), которая затем пересчитывалась в запасы углерода. Показано, что для получения наибольшего прироста фитомассы сосновых древостоев и минимизации эмиссии углерода при рубках наиболее целесообразны выборочные рубки с применением современных технологий по очистке лесосек и переработке лесосечных отходов.

Лишь в ходе длительных стационарных наблюдений можно выявить физиологические механизмы адаптации интродуцированных древесных растений. Так, С. Н. Горошкевич и другие на экспериментальных объектах научного стационара «Кедр» Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, используя комплекс современных физиологических и общепринятых лесоводственных методов, установили амплитуду генетической изменчивости по продуктивности и устойчивости к биотическим факторам ряда географических культур кедра сибирского, созданных прививкой черенков из различных популяций, расположенных по широтному, долготному и высотному профилям Сибири.

М. И. Седаева представила результаты многолетних исследований особенностей сезонного развития, морозостойкости и репродуктивно-

го потенциала лип *Tilia cordata* и *T. amurensis*, произрастающих в условиях дендрария экспериментального хозяйства Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор». По результатам исследования сделан вывод о том, что в условиях Средней Сибири данные виды находятся на начальном этапе натурализации, характеризуются высокой зимостойкостью, не повреждаются весенними заморозками и мало заселяются вредителями.

В статье И. Н. Безкоровайной и соавторов изложены результаты почти полувековых наблюдений за пробными площадями многолетнего эксперимента, заложенного Институтом леса и древесины СО АН СССР по инициативе Н. В. Орловского в южной тайге Кемчугской возвышенности на юге Красноярского края. Задачей эксперимента было выявить как биологические особенности и сукцессионное положение древесных пород – ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), березы кустарниковой (*Betula fruticosa* Pall.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны сибирской (кедра) (*Pinus sibirica* Du Tour) – влияют на все компоненты фитоценоза. Результаты первых десятилетий уникального эксперимента вызвали большой интерес в нашей стране и за рубежом. Так, в августе 2004 г. на базе эксперимента был проведен международный семинар по взаимоотношению древесных пород и почвы (Tree species..., 2005). Однако в дальнейшем, с прекращением официальной и материальной поддержки, исследования ведутся лишь группой энтузиастов. В представленной работе показано, что наиболее резкие изменения зафиксированы под пологом раннесукцессионных хвойных (лиственница) и мелколиственных (береза и осина) пород, тогда как позднесукцессионные породы – ель и кедр – на данном этапе существенно ограничивают развитие подчиненных ярусов.

О необходимости длительных рядов наблюдений для действенного моделирования факторов динамики численности популяций лесных насекомых убедительно свидетельствует статья В. Г. Суховольского и О. В. Тарасовой. Специальная лесозащитная литература полна данных о динамике площадей очагов при вспышках массового размножения вредителей леса (Гниенко, 1999; Бахвалов и др., 2010; Лямцев, 2013; и др.). Однако они ничего (или крайне мало) не говорят о популяционных механизмах вспышек,

для анализа которых необходимы учеты плотности отдельных фаз развития насекомых. А вот длительных рядов этих наблюдений в мировой литературе – единицы. К классическим рядам Ф. Швердтфегера и В. Балтензвайлера можно лишь прибавить почти 50-летние учеты плотности кладок непарного шелкопряда в Челябинской области, выполненные П. М. Распоповым и его последователями (Пономарев и др., 2012), и 40-летние учеты плотности сосновой пяденицы и сопутствующих видов, проводимые в основном Е. Н. Пальниковой при стационарных исследованиях в Краснотуранском и Минусинском борах на юге Красноярского края и прерванных ее уходом из жизни. Сырые данные этих учетов опубликованы недавно в западной печати (Soukhovolsky et al., 2022, Suppl. 1), к сожалению, без прямого указания фамилии исполнителя. Излагаемая в настоящем выпуске история исследований в Краснотуранском бору в какой-то мере это упущение компенсирует. Использование авторегрессионных моделей и показателей запаса по устойчивости для популяций 3 видов чешуекрылых и 2 видов пилильщиков позволило классифицировать ландшафтные структуры на территории Краснотуранского бора по рискам возникновения в этих ландшафтах вспышек массового размножения вредителей.

Заметим при этом, что, как показали недавние исследования, в Минусинских борах обитает не 1, как полагала Е. Н. Пальникова, а 2 крайне сходных по экологии и габитусу гусениц и имаго вида рода *Dendrolimus* – *D. pini* и *D. sibiricus* (Петько и др., 2005, 2010) и, скорее всего, их гибрид (Kononov et al., 2016). Так что к заключению авторов относительно соснового шелкопряда надо относиться с осторожностью.

Полная библиография работ Е. Н. Пальниковой приведена впервые в настоящем выпуске журнала в памятной статье О. В. Тарасовой и соавторов, посвященной 70-летию со дня рождения ученой.

Заключает номер рецензия В. И. Пономарева на трехтомник В. П. Гречкина «Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам». Это издание – удивительное событие в отечественной защите леса. Рукопись давно ушедшего из жизни исследователя, почти полвека пролежавшая в архиве, была оцифрована, отредактирована и опубликована коллективом Всероссийского НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахвалов С. А., Колтунов Е. В., Мартемьянов В. В. Факторы и экологические механизмы популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 298 с.
- Вомперский С. Э. Лесные стационарные исследования в прошлом и настоящем // Лесные стационарные исследования: методы, результаты, перспективы: Материалы совещ. Тула: Гриф и К, 2001. С. 5–14.
- Гниненко Ю. И. Проблемы защиты лесов от сибирского шелкопряда // Защита таежных лесов Сибири от сибирского шелкопряда. Горно-Алтайск: ВНИИЛМ, 1999. С. 12–17.
- Комплексные стационарные исследования в лесах южной тайги (Памяти М. В. Рубцова). М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2017. 348 с.
- Лесные стационарные исследования: методы, результаты, перспективы. Мат-лы совещ. Тула: Гриф и К, 2001. 590 с.
- Лямцев Н. И. Динамика численности непарного шелкопряда в лесостепных дубравах Европейской России. Пушкино: ВНИИЛ, 2013. 98 с.
- Москалюк Т. А., Петропавловский Б. С., Брижата А. А., Долгалева Л. М. Основные результаты и проблемы стационарных исследований в лесах Дальнего Востока // Лесоведение. 2018. № 4. С. 304–320.
- Научные исследования и экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях России и сопредельных стран: сб. тр. конф. Центрально-Лесного гос. природ. биосфер. заповед. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2022. 534 с.
- Петько В. М., Баранчиков Ю. Н., Пономарев В. Л. Половые аттрактанты для феромонного мониторинга соснового и сибирского шелкопрядов в регионах их совместного обитания // Материалы II Всероссийского съезда по защите растений. СПб.: ВИЗР, 2005. С. 78–80.
- Петько В. М., Вендило Н. В., Лебедева К. В., Баранчиков Ю. Н. Прилет к феромонным ловушкам самцов соснового и сибирского шелкопрядов в регионе их совместного обитания // Энтомологические исследования в Северной Азии: Материалы VIII Межрегион. совещ. энтомологов Сибири и Дальнего Востока, Новосибирск, 4–7 окт. 2010 г. Новосибирск: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. С. 293–294.
- Пономарев В. И., Ильиных А. В., Гниненко Ю. И., Соколов Г. И., Андреева Е. М. Непарный шелкопряд в Зауралье и Западной Сибири. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 334 с.
- Сибирина Л. А., Гладкова Г. А., Омелько А. М., Баркалов В. Ю. Верхнеуссурийский биогеоценотический стационар Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2022. Вып. 4. С. 84–100.
- Стационарные исследования влияния рекреации на лесные биогеоценозы. Тула: Гриф и К, 2008. 358 с.
- Стационарные исследования лесных и болотных биогеоценозов: экология, производственный процесс, динамика: Тез. докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участ. Сыктывкар: Коми науч. центр УрО РАН, 2016. 144 с.
- Сукачев В. Н. Избранные труды. Основы лесной типологии и биогеоценологии / Под общ. ред. акад. Е. М. Лавренко Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. Т. I. 417 с.
- Kononov A., Ustyantsev K., Wang B., Mastro V. C., Fet V., Blinov A., Baranchikov Yu. Genetic diversity among eight *Dendrolimus* species in Eurasia (Lepidoptera: Lasiocampidae) inferred from mitochondrial COI and COII, and nuclear ITS2 markers // BMC Genomic Data. 2016. V. 17 (S3). Article number 157. P. 174–191.
- Soukhovolsky V., Ovchinnikova T., Tarasova O., Ivanova Yu., Kovalev A. Regulatory processes in populations of forest insects (a case study of insect species damaging the pine *Pinus sylvestris* L. in forests of Siberia) // Diversity. 2022. V. 14. Iss. 12. Article number 1038. 11 p.
- Tree species effects on soils: implications for global change. Proc. NATO Adv. Res. Workshop, August 2004, Krasnoyarsk, Russia / D. Binkley, O. Menyailo (Eds.). Dordrecht: Springer, 2005. 358 p.

FOREWORD FROM THE SCIENTIFIC EDITOR FOR THEMATIC ISSUE OF THE «SIBERIAN JOURNAL OF FOREST SCIENCE»

Yu. N. Baranchikov

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: baranchikov_yuri@yahoo.com

The capsule review of the scientific editor for the thematic issue of the Siberian Journal of Forest Science, 2024, number 3 is presented, dedicated to stationary forest studies.

Keywords: *Siberian Journal of Forest Science*, 2024, N. 3, stationary studies, forest ecosystems, brief editorial review of the thematic issue contents.

How to cite: Baranchikov Yu. N. Foreword from the scientific editor for thematic issue of the Siberian Journal of Forest Science // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 3–6 (in Russian with English abstract and references).

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 174+001.81

КРАЙНИЕ АВТОРЫ

Ю. Н. Баранчиков

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

E-mail: baranchikov_yuri@yahoo.com

Хотя официальных и постоянных критериев для определения положения вашей фамилии в списке авторов статьи не существует, все чаще в медико-биологических публикациях применяется принцип «крайних авторов». Наилучшим дополнением к нему будет подробное указание вклада каждого автора в создание статьи.

Ключевые слова: *список авторов, первые и последние авторы, классификация вклада авторов.*

DOI: 10.15372/SJFS20240302

«На золотом крыльце сидели:
Царь, царевич, король, королевич,
Сапожник, портной,
Кто ты будешь такой?»

Детская считалочка

Исходя из последовательности героев известной детской считалочки, везде хочется причислить себя к царю или, в крайнем случае, к царевичу, но уж никак не к портному. Везде, но, как оказывается, не в ряду авторов печатного научного произведения.

Авторство – главная валюта в мире науки. Оно является ключом к получению грантов, продвижению по службе, признанию коллег. Хотя и не существует единого стандарта в определении авторства, подавляющее число исследователей в области медико-биологических наук соглашались с правилами Международного совета редакторов медицинских журналов – International Council of Medical Journal Editors (ICMJE). Согласно им, автор должен одновременно удовлетворять четырем требованиям:

- внести значительный вклад в разработку концепции или дизайна работы; или в получение, анализ или интерпретацию данных для работы;
- участвовать в составлении проекта работы или ее критического редактирования с целью выявления важного интеллектуального содержания;

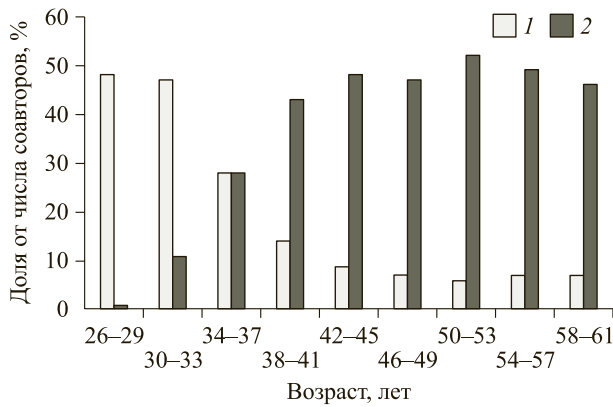
– участвовать в окончательном утверждении версии для публикации;

– согласиться нести ответственность за все аспекты работы, обеспечивая надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы (ICMJE, 2024).

Таким образом, если в той или иной степени понятны критерии авторства, то не менее понятно, что вклад соавторов в создание научной работы обычно далеко не одинаков. Как этот вклад можно оценить, а оценив, отразить?

За последние десятилетия очевидна тенденция к уменьшению моноавторства научных статей. К примеру, на основе огромной библиографической базы данных MEDLINE Национальной медицинской библиотеки США было показано, что доля статей с одним автором от ежегодного числа статей за период с 1966 по 2006 г. уменьшилась с 40 до 7 % (Wren et al., 2014).

Когда статья имеет более одного автора, их вклад может сильно различаться как по типу (выработка концепции, сбор данных, их анализ), так и по значимости. О степени вклада каждо-



Изменение положения в списке авторов в зависимости от их возраста по результатам анализа более 9.3 тыс. публикаций 388 испанских авторов (биология и биомедицина, Web of Science, 1994–2004), набравших к 2010 г. в сумме 190 тыс. цитирований (по данным Costas, Bordons, 2011).

1 – первый автор; 2 – последний.

го автора можно судить по порядку, в котором их имена расположены в списке (Logan, et al., 2017). Хотя принятые значения положения автора в списке варьируются в разных исследовательских дисциплинах и странах (Waltman, 2012; Liu, Fang, 2014), первым автором считается человек, внесший наибольший вклад в проект, а последним – руководящий проектом (Corrêa et al., 2017; Sundling, 2017; Yang et al., 2017). Конкретно экологи склонны считать, что первый автор вложил больше всего времени и сил в проект (Weltzin et al., 2006), а последний автор является старшим исследователем, под руководством которого проводилось исследование (Duffy, 2017).

Действительно, последние авторы зачастую существенно отличаются от первых по возрасту (см. рисунок), должности и профессиональному рангу (Drenth 1998; Gingres et al., 2008; Costas, Bordons, 2011). Существенные различия найдены по гендерному и географическому признакам (Fox et al., 2018).

Хотя для мультиавторских публикаций предложены многочисленные количественные оценки вкладов каждого автора (Tschamtket et al., 2007; и др.), все же критерий «крайнего автора» – наиболее распространенный. Так, в 2016 г. в США был проведен опрос 1122 респондентов-экологов. Им задали два вопроса относительно экологических статей: «Считаете ли вы последнего в списке автора старшим автором?» и «Обращаете ли вы внимание на то, что в своем CV соискатель должности указывает, сколько раз он был первым либо последним автором?» «Нет» – ответили всего 7 и 8 % респондентов первого и

второго вопросов соответственно, в то время как положительные ответы были у 80 и 70 % (Duffy, 2017).

В заключение хочу обратить внимание на еще один простой способ обозначения вкладов соавторов в публикацию. Это система CRediT (Contributor Roles Taxonomy), которая была введена именно с целью признания индивидуального вклада авторов, уменьшения количества споров об авторстве и облегчения сотрудничества. Идея возникла после совместного семинара, проведенного в 2012 г. Гарвардским университетом и Wellcome Trust при участии исследователей, Международного комитета редакторов медицинских журналов (ICMJE) и издателей, включая компанию Elsevier (Elsevier, 2024). Авторский вклад, согласно CRediT (Contributor Roles Taxonomy), может быть распределен по нескольким категориям (по: Allen et al., 2014; Brand et al., 2015, с изменениями):

Категория	Описание
Концепция исследования	Идеи; формулировка вопроса исследования; выдвижение гипотезы
Методология	Разработка или проектирование методологии; создание моделей
Вычисления	Программирование, разработка программного обеспечения; проектирование и реализация компьютерных программ и поддерживающих алгоритмов
Проверка	Проверка, как в рамках деятельности, так и отдельно, воспроизводимости результатов / экспериментов и других результатов исследований
Формальный анализ	Применение статистических, математических или других формальных методов для анализа данных исследования
Исследование: проведение экспериментов	Проведение процесса исследования и изучения, в частности проведение экспериментов
Исследование: сбор данных / доказательств	Проведение процесса исследования и расследования, в частности сбор данных и доказательств
Ресурсы	Предоставление материалов для исследования, реагентов, материалов, пациентов, лабораторных образцов, животных, приборов и других средств анализа
Курирование данных	Управленческая деятельность по аннотированию (созданию метаданных) и сохранению исследовательских данных для первоначального и последующего повторного использования

Написание / подготовка рукописи: написание первоначального проекта	Подготовка, создание и/или презентация опубликованной работы, в частности написание первоначального варианта
Написание / подготовка рукописи: критический обзор, комментирование или редактирование	Подготовка, создание и/или презентация опубликованной работы, в частности критическое рассмотрение, комментирование или редактирование
Руководство	Ответственность за руководство исследованием и организацией проекта
Администрирование проекта	Координация или управление исследовательской деятельностью, приведшей к данной публикации
Получение финансирования	Получение финансовой поддержки для проекта, приведшего к данной публикации

Обычно вклады авторов указываются в конце статьи, перед разделом Благодарности. К примеру, в статье с четырьмя авторами: АБВ, ГДЕ, ЖЗИ и ЛМН этот раздел может выглядеть следующим образом: Вклад авторов: АБВ и ЛМН – концепция и методология исследования; АБВ и ГДЕ – проведение экспериментов; ЖЗИ – формальный анализ данных; АБВ – написание первоначального варианта; АБВ, ГДЕ, ЖЗИ и ЛМН – подготовка рукописи; ЛМН – руководство и получение финансирования. Совсем не обязательно, чтобы вклад автора ограничивался лишь одной категорией.

Итак, хотя официальных и постоянных критериев для определения положения вашей фамилии в списке авторов статьи не существует, все чаще в медико-биологических публикациях применяется принцип «крайних авторов». Наилучшим дополнением к нему будет подробное указание вклада каждого автора в создание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Allen L., Brand A., Scott J., Altman M., Hlava M. Credit where credit is due // *Nature*. 2014. V. 508. P. 312–313.
 Brand A. E., Allen L., Altman M., Hlava M., Scott J. Beyond authorship: Attribution, contribution, collaboration, and credit // *Learn. Publish.* 2015. V. 28. P. 151–155.

- Corrêa E. A. Jr., Silva F. N., Costa L. D. F., Amancio D. R. Patterns of authors contribution in scientific manuscripts // *J. Informet.* 2017. V. 11 (2). P. 498–510.
 Costas R., Bordons M. Do age and professional rank influence the order of authorship in scientific publications? Some evidence from a microlevel perspective // *Scientometrics*. 2011. V. 88. P. 145–161.
 Drenth J. P. H. Multiple authorship. The contribution of senior authors. // *JAMA*. 1998. V. 280 (3). P. 219–221.
 Duffy M. A. Last and corresponding authorship practices in ecology // *Ecol. and Evolut.* 2017. V. 7. P. 8876–8887.
 Elsevier. CRediT author statement. 2024. <https://www.elsevier.com/researcher/author/policies-and-guidelines/credit-author-statement>.
 Fox C. W., Ritchey J. P., Paine C. E. T. Patterns of authorship in ecology and evolution: first, last, and corresponding authorship vary with gender and geography // *Ecol. and Evolut.* 2018. V. 8. P. 11492–11507.
 Gingras Y., Larivière V., Macaluso B., Robitaille J. P. The effects of aging on researchers' publication and citation patterns // *PLoS ON*. 2008. V. 3 (12). e4048.
 ICMJE – International Council of Medical Journal Editors. Defining the Role of Authors and Contributors. ICMJE. 2024. <https://www.icmje.org/recommendations/browse/roles-and-responsibilities/defining-the-role-of-authors-and-contributors.html>
 Liu X. Z., Fang H. Scientific group leaders' authorship preferences: An empirical investigation // *Scientometrics*. 2014. V. 98 (2). P. 909–925.
 Logan J. M., Bean S. B., Myers A. E. Author contributions to ecological publications: What does it mean to be an author in modern ecological research? // *PLoS One*. 2017. V. 12 (6). e0179956. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179956>
 Sundling P. The many hands of science: Commonalities and differences in the research contributions of authors and subauthors. // *Aslib J. Inform. Managem.* 2017. V. 69 (5). P. 591–606.
 Tscharrntke T., Hochberg M. E., Rand T. A., Resh V. H., Krauss J. Author sequence and credit for contributions in multiauthored publications // *PLoS Biol.* 2007. V. 5 (1). e18.
 Von Bergen C. W., Bressler M. S. Academe's unspoken ethical dilemma: author inflation in higher education // *Res. in Higher Educat. J.* 2017. V. 32. P. 1–17.
 Waltman L. An empirical analysis of the use of alphabetical authorship in scientific publishing // *J. of Informet.* 2012. V. 6 (4). P. 700–711.
 Weltzin J. F., Belote R. T., Williams L. T., Keller J. K., Engel E. Authorship in ecology: Attribution, accountability, and responsibility // *Frontiers in Ecol. and the Environ.* 2006. V. 4 (8). P. 435–441.
 Wren J. D., Kozak K. Z., Johnson K. R., Deakyne S. J., Schilling L. M., Dellavare R. P. The write position // *EMBO reports*. 2014. V. 8 (11). P. 987–991.
 Yang S., Wolfram D., Wang F. The relationship between the author byline and contribution lists: A comparison of three general medical journals // *Scientometrics*. 2017. V. 110 (3). P. 1273–1296.

AUTHORS AT BOTH SIDES OF THE LIST

Yu. N. Baranchikov

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

E-mail: baranchikov_yuri@yahoo.com

Although there are no official and permanent criteria for determining the position of your name in the list of authors of an article, the principle of “authors at the both sides of the list” is increasingly used in biomedical publications. The best addition to it is a detailed indication of the contribution of each author to the creation of the article.

Keywords: *list of authors, first and last authors, classification of authors' contribution.*

How to cite: *Baranchikov Yu.N. Authors at both sides of the list // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 7–10 (in Russian with English abstract and references).*

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

УДК 630*182+581.55+582.475(571.16)

ОПЫТ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСАХ ЮГА ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А. Г. Дюкарев, С. Г. Копысов, С. А. Кривец, Е. Н. Пац, Н. А. Чернова

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, просп. Академический, 10/3

E-mail: dag@imces.ru, wosypok@mail.ru, krivec_sa@mail.ru, patz_imces@mail.ru, naitina79@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

Исследование древостоев, подроста, подлеска, крупных древесных остатков, напочвенного покрова, почв и их вклад в депонирование углерода проводилось в коренных южно-таежных папоротниково-снытево-мелкотравных пихтарниках на Томь-Яйском междуречье (Томская область). Запас древесины в среднем для типа биогеоценоза составил 315.8 ± 56.1 м³/га, у пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) в разных насаждениях он варьировал от 99.2 до 201.4 м³/га. По санитарному состоянию древостои в разной степени ослаблены, пихтовые элементы древостоев – сильнее, что в значительной степени обусловлено их повреждением инвазионным короедом – уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandford). Подлесок редкий или средней густоты (880–2720 шт./га), образован преимущественно малиной обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) и рябиной сибирской (*Sorbus sibirica* Hedl.). Подрост с абсолютным преобладанием пихты, его численность (800–920 шт./га) характеризует неудовлетворительное возобновление во всех изученных насаждениях. Средний объем валежа для типа биогеоценоза составил 2.1 ± 0.5 м³/га, пней – 3.3 ± 0.8 м³/га, хвороста – 9.2 ± 5.3 м³/га. К особенностям фитоценоза относятся высокие значения флористического разнообразия (131 вид), видового богатства травяного покрова (105 видов) и видовой насыщенности растительных сообществ (57 видов на 400 м²). Повышенное участие папоротника в составе травостоя обусловлено наличием окон, занимающих от 5 до 30 % площади фитоценоза, сформировавшихся в насаждениях на месте вывалов и погибших деревьев, в основном из-за усыхания пихты, поврежденной уссурийским полиграфом. Впервые получены данные о фитомассе напочвенного покрова южно-таежных пихтарников Западной Сибири, в среднем оцененной в 0.88 т/га, с широким варьированием данного показателя в связи с особенностями горизонтальной структуры напочвенного покрова и разной освещенностью в подкروновых парцеллах и окнах. Показаны особенности состава, структуры и термического режима почв изученных биогеоценозов. Приведены данные об изменении продуктивности фитоценозов, гумуса почв и запасов углерода в различных компонентах изученных лесов.

Ключевые слова: папоротниково-снытево-разнотравные пихтовые леса, состав, структура, продуктивность фитоценоза, запасы углерода, Томская область.

DOI: 10.15372/SJFS20240303

ВВЕДЕНИЕ

Лес как многокомпонентная, многофункциональная и динамичная система требует комплексного подхода к исследованиям с учетом всех абиотических и биотических составляющих, их структуры, взаимосвязи, взаимодей-

ствий и реакций на внешние возмущения (Сукачев, 1964; Дылис, 1969). Главным требованием разработанной методологии биогеоценологических исследований (Программа..., 1974) было обеспечение многоаспектности стационарных исследований при работе на одной и той же пробной площади представителей разных науч-

ных направлений и синтеза результатов наблюдений для интегральной характеристики биогеоценотического процесса.

Потребность в комплексных исследованиях лесных экосистем в последнее время резко возросла в связи с реализацией важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) по созданию национальной системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации. Создаваемая сеть мониторинга (пробных площадей) призвана обеспечить получение актуальной региональной информации о видовом составе растительных сообществ, их продуктивности, параметрах горизонтальной и вертикальной структуры, характеристиках напочвенного покрова и почв.

Одна из частей проекта выполнялась на территории Томской области сотрудниками Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН). Целью работы было создание на основе стандартизированной методологии и инфраструктуры системы мониторинга южно-таежных лесов Западной Сибири, рассчитанной на длительные циклы комплексных исследований, выявление закономерностей накопления и баланса углерода в лесных экосистемах с учетом пространственно-временной неоднородности, возрастной структуры, особенностей фитоценозов и почв.

Для изучения состояния и организации мониторинга лесных экосистем южной тайги Западной Сибири были выбраны пихтовые леса Томь-Яйского междуречья, формирующиеся в простых сукцессионных циклах со сменой эдификаторов в ряду пихта – осина – пихта (Дюкарев и др., 2022; Dyukarev et al., 2022). Для этих биогеоценозов характерно достаточно быстрое протекание восстановительных сукцессий, что связано в первую очередь с биологическими особенностями слагающих древостой древесных пород – предельный возраст пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) для исследуемых лесов составляет 80–120 лет, осины (*Populus tremula* L.) – 50–60 лет. Общая продолжительность сукцессионного цикла в естественных условиях немногим более 200 лет. Отличительная черта пихтовых лесов Томь-Яйского междуречья – постоянное изменение структуры фитоценозов: образование более или менее крупных окон с высокотравным покровом на месте выпавших деревьев (одного или группы) и их быстрое зарастание с формированием преимущественно разнотравных осинников. Это

обуславливает высокую пространственную неоднородность в лесных экосистемах подобного типа, проявляющуюся во всех ярусах фитоценозов и в гумусовом профиле почв (Дюкарев и др., 2022; Dyukarev et al., 2022). Новым фактором сукцессии пихтовых биогеоценозов района исследований стала недавняя вспышка массового размножения инвазионного короеда – уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), вызвавшая изменения не только в структуре и состоянии поврежденных древостоев, но и в характеристиках естественного возобновления, живого напочвенного покрова, почвы, стволового энтомокомплекса (Кривец и др., 2015; Krivets et al., 2015). Процессы, происходящие в этих лесах, отражаются на продуктивности растительных сообществ и биоты в целом, активности процессов почвообразования, изменениях микроклимата. Все это приводит к существенным трансформациям углеродного пула и требует уже на первом этапе при организации мониторинга проведения комплексных исследований с привлечением специалистов из разных областей знания.

В состав исследовательского коллектива входят штатные сотрудники института – географы (геоморфологи и гидрологи), лесоведы, ботаники, физиологи растений, почвоведы и зоологи, что обеспечивает комплексность исследований. Сотрудничеству специалистов разного профиля способствует накопленный опыт в рамках ранее проведенных совместных исследований в лесах Томской области (Пологова и др., 2013; Технология..., 2018; Дюкарев и др., 2022; Dyukarev et al., 2022).

В данном сообщении приведены первые результаты этой работы, цель которой – дать современную комплексную характеристику структуры, продуктивности и вклада в запасы углерода изученных пихтовых лесов юго-восточной части Западно-Сибирской равнины с учетом их особенностей.

РАЙОН, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Натурные исследования проведены в июле-августе 2023 г. в окрестностях дер. Аркашево Томского района Томской области (56.442° с. ш., 85.265° в. д.) на территории Корниловского участкового лесничества Томского лесничества. В соответствии с лесорастительным районированием Российской Федерации (Приказ..., 2014) она относится к Западно-Сибирскому южно-та-

ежному равнинному району таежной зоны, согласно природно-ресурсному районированию Томской области (Дюкарев и др., 1997) – к Томскому природно-ресурсному району Томского округа вторично-мелкотравных и высокопродуктивных хвойных лесов, высоко- и среднебонитетных почв Западно-Сибирской таежной зоны, а по целевому назначению – к эксплуатационным лесам.

В геоморфологическом плане территория исследований приурочена к западному макросклону Томь-Яйского междуречья. Рельеф холмисто-увалистый, с пологими склонами, переходящий на юге в умеренно заболоченную плоскую долину р. Ушайка. Климат континентально-циклонический, переходный от европейского умеренно-континентального к сибирскому резко континентальному, в целом может быть определен как влажный с умеренно-теплым летом и суровой многоснежной зимой. Продолжительность вегетационного периода 120 дней. Средняя температура воздуха в январе составляет -19.6°C , минимальная в отдельные годы может достигать -45°C . Средняя температура воздуха в июле 18.3°C , максимальная достигает 28.5°C . Осадков за год выпадает 550–600 мм, из них 30 % – в виде снега. Средняя продолжительность залегания снежного покрова 178 дней. Средняя мощность снега на открытых участках 56 см, наибольшая – 79 см, наименьшая – 30 см. Глубина промерзания почв в значительной степени определяется толщиной «снежного покрывала» и редко превышает 40 см (Дюкарев, 1985).

Лесная растительность района исследований представлена в основном разреженными березово-осиновыми, осиново-березовыми, сосново-березовыми травяными лесами с островами темнохвойной тайги на водоразделах. Почвенный покров не отличается большим разнообразием и отражает условия района. Почвы относятся к типу серых сверхглубоко осветленных, мало- и среднегумусированных, малопрмерзающих (Классификация..., 2004), согласно международной классификации (WRB, 2022) – к типу Greyic Phaeozem. Формируясь в теле относительно рыхлых лессовидных суглинков, подстилаемых плотными тайгинскими глинами, почвы имеют специфический профиль, характеризующийся высокой степенью текстурной дифференциации и глубокой, до 70–80 см, «оподзоленностью».

Исследования проведены на 5 пробных площадях (пп), заложенных по результатам оценки снимков Google Earth Pro и рекогносцировочных

натурных обследований в наиболее типичных для территории участках коренных темнохвойных насаждений – папоротниково-снытево-мелкотравных пихтарниках (рис. 1).

Пробные площади размером 0.25 га (50×50 м) заложены как постоянные, в относительно однородных позициях мезорельефа – на автоморфных участках юго-западной и западной экспозиции с уклоном $2-4^{\circ}$, на высоте 180–190 м н. у. м., с минимальными признаками антропогенного воздействия на лесные сообщества.

Координаты углов пробных площадей зафиксированы с помощью GPS-навигатора, деревья с диаметром на высоте груди 6 см и выше пронумерованы длительно сохраняющейся белой масляной краской, что позволяет легко ориентироваться на территории и в структуре фитоценоза.

На каждой пробной площади проведены исследования древесных компонентов (древостоя, подлеска, подроста, крупных древесных остатков), напочвенного покрова, почвы и получены их характеристики, необходимые для оценки запаса углерода. Основой исследований приняты методики, разработанные в рамках «консорциума» по ВИП ГЗ, адаптированные к условиям района в соответствии с многолетним опытом работы и региональными особенностями территории.

Методика исследования древесных компонентов. Для определения характеристик древесных компонентов применяли стандартные методы лесной таксации (Верхунов, 2009). При перечете деревьев одновременно с определением биометрических показателей оценивали их жизненное (санитарное) состояние с использованием балльной шкалы категорий по комплексу визуальных признаков, применяемой в лесопатологических исследованиях. Состояние древостоя оценивали на основе расчета средне-взвешенной категории состояния по сумме площадей поперечного сечения каждого элемента и древостоя в целом (Правила..., 2020). Для пихты применялась специально разработанная нами шкала категорий для оценки состояния деревьев в очагах размножения уссурийского полиграфа (Технология..., 2018). Запас древостоя рассчитывали для каждого элемента леса по сортиментным таблицам для района исследования (Сортиментные и товарные таблицы..., 2005).

Подрост и подлесок учитывали по породам на круговых площадках постоянного радиуса 1.78 м (размер площадки 10 м^2), по 5 шт. на пробную площадь (пп): 4 площадки были заложены по углам пп, 1 площадка – в центре пп. Измеря-



Рис. 1. Папоротниково-снытево-мелкотравные пихтовые леса района исследований.

ли высоту и диаметр растений. Из-за небольшого количества подроста на пробных площадях диаметр и высота измерены у всех экземпляров. Учетное количество подроста пересчитывали на 1 га. По количеству подроста на 1 га определяли состояние возобновления, по количеству подлеска оценивали его густоту.

Крупные древесные остатки (КДО) учитывали по отдельным компонентам (валежник, пни и хворост) на круговой учетной площади радиусом 9,8 м, заложенной в центре каждой пробной площади. У валежника и пней измеряли диаметр и длину (высоту), определяли в баллах степень разложения (от 0 – отсутствие разложения до 3 баллов – полное разложение). Для хвороста определяли проективное покрытие. Для всех КДО рассчитывали объем (в м³/га).

Оценку депонирования углерода древесным ярусом биогеоценоза проводили на основе

данных полевых исследований, в соответствии с «Методическими указаниями по количественному определению объема поглощения парниковых газов» (2017). В работе использовали конверсионные коэффициенты для лесообразующих пород зоны южной тайги (Замолотчиков и др., 2003). Для оценки запаса углерода сухостойными деревьями применяли аллометрическую модель уравнения (Усольцев и др., 2022), с помощью которой был проведен пофракционный расчёт фитомассы каждого учетного дерева на всех пробных площадях.

Методика изучения напочвенного покрова. Для выявления флористического состава живого напочвенного покрова, количественных и качественных соотношений видов, определяемых ценотической значимостью разных видов и варьированием их обилия, на пробных площадях выполнено 20 полных геоботанических

описаний (площадь описания 400 м²) по общепринятой методике (Корчагин, 1976). При оценке надземной фитомассы напочвенного покрова учитывали особенности структуры древостоя, выделяя подкроновые и междокровные парцеллы и окна. В типичных элементах горизонтальной структуры лесных фитоценозов были заложены 80 учетных площадок размером 50 × 50 см (Методы..., 2002). Надземную часть травянистых растений срезали на уровне земли, разбирали по видам и взвешивали. Фитомасса приведена в расчете на абсолютно сухую массу.

Методика изучения почв. Исследование почв на пробных площадях проводили также с учетом структуры древесного яруса: в междокровой части или окне закладывали основной разрез, в подкроновой части – прикопки до иллювиального горизонта. Образцы почвы отбирали через 10 см с учетом границ горизонтов в элювиальной части профиля (до 1 м) и по горизонтам глубже (до почвообразующей породы). Объемный вес определяли методом режущего кольца (50 см³) в трехкратной повторности. Углерод в почвах и растительности определяли на CHN-анализаторе TVF502, в жидких средах – на анализаторе элементного состава «Топаз». Запас углерода рассчитывали послойно с учетом плотности почв.

Результаты наблюдений, измерений и расчетов по всем вышеуказанным компонентам обрабатывали в программе Excel Word.

Наряду с определением характеристик древесно-кустарниковой растительности, крупных древесных остатков, живого напочвенного покрова и почв в рамках комплексного мониторинга исследовали абиотические компоненты изучаемых биогеоценозов, в том числе в сравнении с другими стадиями сукцессионного ряда. Наблюдения за термическим режимом почв проводили с использованием автоматических измерителей почвенной температуры, разработанных в ИМКЭС СО РАН (Кураков, 2012; Копысов и др., 2022). Температуру измеряли на глубине 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 и 240 см, с периодичностью 1 ч. Для наблюдений за поступлением углерода с атмосферными осадками и его выносом с внутрипочвенным стоком использовали осадкомеры и лизиметры, установленные на пробных площадях с учетом горизонтальной структуры древостоя (в междокровном и в подкроновом пространстве). Зимние осадки оценивали по данным снегомерной съемки в конце периода снегонакопления. Для изучения латерального стока, на

ручье, являющимся коллектором стока углерода с поверхностными и грунтовыми водами из исследуемых экосистем, установлена система автоматического мониторинга уровня воды САМУВ. Показатели передавались по каналам сотовой связи и служили для определения сроков сбора атмосферных вод и стока воды. Воды отбирали для определения углерода и других химических параметров. Данные по абиотическим компонентам находятся в стадии обработки и в полном объеме будут опубликованы позднее.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Древесные компоненты насаждений. Породный состав древостоев в изученных насаждениях представлен пихтой сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), елью сибирской, сосной сибирской кедровой (кедром) (*Pinus sibirica* Du Tour), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березой повислой (*Betula pendula* Roth), ивой козьей (*Salix caprea* L.) и рябиной сибирской (*Sorbus sibirica* Hedl.) (табл. 1).

Средний запас древесины для типа биогеоценоза – 315.8 ± 56.1 м³/га. В целом биометрические параметры и санитарное состояние древостоев на пробных площадях определяются пихтой – господствующей лесообразующей породой (табл. 2). Древостои пихты по диаметру стволов – среднеразмерные (4-й ступени толщины), по возрасту – одновозрастные, на пп 02 – V класса возраста (спелые), на остальных пробных площадях – IV класса возраста (приспевающие).

По санитарному состоянию древостои на всех пробных площадях относятся к ослабленным в той или иной степени (средневзвешенная категория состояния более 1.5). Пихтовый элемент древостоев на пп 01 и пп 03 оценен как сильно ослабленный (средневзвешенная категория состояния более 2.5).

Ослабление пихтовых древостоев обусловлено развитием грибных инфекций, в частности ржавчинного рака пихты, вызванного *Melampsorella caryophyllacearum* (DC). J. Schröt., трутовика Гартига (*Phellinus hartigii* (Allesch. & Schnabl.) Pat.) и, в большей степени, гибелью деревьев, поврежденных уссурийским полиграфом в период недавней вспышки его массового размножения.

Состояние деревьев других пород по сравнению с пихтой в целом лучше. Доля погибших

Таблица 1. Основные параметры древостоев на пробных площадях

Номер пп	Число стволов	Средний запас древесины, м³/га	Породный состав		Полнота	Класс бонитета	Средне-взвешенная категория состояния
			по числу стволов	по запасу древесины			
01	132	353.9 ± 0.7*	8П2Е + Л, ед. С, К	7П2Е1Л, ед. С, К	0.6	II	2.30
02	172	374.7 ± 0.7	8П2Е + К, Л, ед. С, Р	7П2Е1К + Л, ед. С, Р	0.6	II	2.00
03	145	334.6 ± 1.0	9П1Е + К, ед. С	7П2Е1К, ед. С	0.6	II	2.04
04	141	240.7 ± 0.8	10П + К, ед. Е	10П + К, ед. Е	0.6	II	2.30
05	117	275.1 ± 1.1	9П1К + Е, ед. Б, Ив	9П1К + Е, ед. Б, Ив	0.5	II	1.52

Примечание. П – пихта сибирская; Е – ель сибирская; Л – лиственница сибирская; С – сосна обыкновенная; К – кедр; Б – береза повислая; Ив – ива козья; Р – рябина сибирская.

* Здесь и далее – стандартное отклонение.

Таблица 2. Таксационные показатели древостоев основных лесообразующих пород

Номер пп	Элемент леса	Число стволов	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Возраст, лет	Средний запас древесины, м³/га	Средневзвешенная категория состояния
01	П	110	28.4 ± 6.8	19.5 ± 2.8	74	99.2 ± 0.4	2.68
	Е	12	52.2 ± 13.9	22.0 ± 3.0	109	123.5 ± 1.6	1.53
	Л	4	64.0 ± 5.9	25.0 ± 2.0	99	52.0 ± 0.4	1.64
02	П	142	21.6 ± 3.3	17.6 ± 2.7	82	201.4 ± 0.5	2.00
	Е	11	45.6 ± 13.7	21.0 ± 2.0	119	79.7 ± 1.1	1.70
	Л	5	53.2 ± 8.7	23.0 ± 1.0	101	47.2 ± 0.7	1.20
	К	5	39.5 ± 12.0	18.0 ± 3.0	107	23.7 ± 0.7	3.48
03	П	124	29.8 ± 8.4	17.8 ± 5.3	69	185.9 ± 0.7	2.60
	Е	12	41.3 ± 12.3	21.0 ± 2.0	87	72.7 ± 1.0	1.07
	К	6	57.8 ± 20.7	20.0 ± 4.0	96	72.9 ± 1.9	1.18
04	П	135	29.8 ± 10.3	17.9 ± 4.0	64	194.3 ± 0.5	2.36
05	П	106	29.9 ± 7.9	17.8 ± 2.4	62	183.1 ± 0.4	1.56
	К	6	56.7 ± 9.9	20.0 ± 1.0	123	61.3 ± 0.9	1.40

Таблица 3. Характеристика подроста на пробных площадях

Номер пп	Породный состав	Общее количество, шт./га	Средний размер, см			Средняя высота, м			Возраст, лет		
			Пихта	Ель	Кедр	Пихта	Ель	Кедр	Пихта	Ель	Кедр
01	10П, ед. К	800	2.6	–	6.3	1.5	–	1.6	8	–	19
02	9П1Е	920	5.4	0,6	–	0.7	0.4	–	10	8	–
03	6Е2К2П	160	1.5	5,1	1.9	2.3	0.4	0.1	25	13	4
04	9П1К, ед. Е	560	7.8	1,2	10.3	1.1	0.3	2.3	16	11	36
05	9П1Е	760	4.4	6,6	–	0.3	0.6	–	9	13	–

деревьев (свежего и старого сухостоя) в пихтовом элементе древостоя на пробных площадях варьировала от 7.6 % (пп 05) до 33.9 % (пп 01), что отражается на продуктивности насаждения, а также на парцеллярной структуре и флористическом составе напочвенного покрова, как будет показано ниже. Доля деревьев, обработанных уссурийским полиграфом (совместно с черным пихтовым усачом (*Monochamus urussovii* (Fischer

von Waldheim))), составила в сухостое от 44.4 % (пп 04) до 90.5 % (пп 03).

Подрост представлен хвойными породами с абсолютным преобладанием пихты на пробных площадях (кроме пп 03), немногочисленный, растет куртинами, численность его характеризует неудовлетворительное возобновление во всех изученных насаждениях (Побединский, 1966) (табл. 3).

Таблица 4. Характеристика подлеска на пробных площадях

Показатель	Номер пп				
	01	02	03	04	05
Породный состав	4МЗР2С1Ч + См	6С2М1Р1Ж, ед. См	6М2Ж1Р1Ч + С, ед. См	5МЗР2См + С, Ж, Б	7М1Р1Ж1Б
Общее количество, шт./га	2720	1720	2400	880	1280
Густота подлеска	Средней густоты	Редкий	Средней густоты	Редкий	Редкий
Средний диаметр, см:					
малина	0.5	0.4	0.4	0.3	0.5
рябина	0.8	2.1	1.3	8.2	5.5
спирея	1.0	0.3	0.5	0.2	–
жимолюсть	–	0.7	1.8	0.1	4.0
черемуха	0.9	–	0.5	–	–
бузина	–	–	–	0.3	5.8
смородина	0.8	0.1	0.7	0.5	–
Средняя высота, м:					
малина	1.0	1.4	0.9	0.9	1.2
рябина	1.2	4.3	1.9	5.0	3.3
спирея	1.0	1.1	1.1	0.5	–
жимолюсть	–	0.8	1.6	1.3	1.0
черемуха	2.1	–	1.0	–	–
бузина	–	–	–	0.9	1.7
смородина	1.2	1.1	1.3	1.6	–

Примечание. М – малина; Р – рябина; С – спирея; Ж – жимолюсть; Ч – черемуха; Б – бузина; См – смородина.

Таблица 5. Характеристика валежника на пробных площадях

Номер пп	Порода	Число, шт.	Объем, м³/га	Средняя длина, м	Средний диаметр, см	Степень разло- жения, балл
01	П	10	1.3 ± 0.1	7.5 ± 2.8	12.6 ± 6.4	0–3
	Е	3	2.5 ± 0.8	11.2 ± 8.1	24.2 ± 9.4	2–3
	Л	2	0.04 ± 0.0	3.1 ± 2.4	9.0 ± 0.0	0
	Р	3	0.4 ± 0.0	10.4 ± 0.4	10.5 ± 1.2	0–3
02	П	4	0.6 ± 0.1	18.0 ± 2.5	14.6 ± 6.7	0–3
	К	3	6.4 ± 1.3	11.6 ± 3.7	37.3 ± 10.3	2–3
	Е	3	0.9 ± 0.4	4.9 ± 3.1	22.7 ± 19.6	0–3
03	П	12	1.4 ± 0.2	4.8 ± 2.7	14.2 ± 6.4	0–3
	К	4	7.9 ± 1.0	11.3 ± 4.8	45.6 ± 10.5	3
	Е	1	0.3	6.1	22.5	2
04	П	6	2.2 ± 0.1	7.8 ± 2.8	24.5 ± 8.5	3
	К	2	2.0 ± 0.9	6.7 ± 3.8	27.3 ± 18.0	3
	Р	1	0.4	3.5	11.5	1
05	П	7	0.8 ± 0.2	4.6 ± 5.5	13.8 ± 4.1	3

В составе подлеска на пробных площадях в целом отмечено 12 видов кустарников, на учетных площадках выявлено 7 видов, с постоянной встречаемостью малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) и рябины сибирской. Также в подлеске присутствует спирея средняя (*Spiraea media* Schmidt), жимолюсть обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.), черемуха обыкновенная (*Padus avium* L.), бузина сибирская (*Sambucus sibirica*

Nakai), смородина красная (*Ribes rubrum* L.) (табл. 4).

Крупные древесные остатки на пробных площадях немногочисленны. В составе валежника на всех пробных площадях по количеству преобладает пихта, реже встречаются ель, лиственница, кедр, рябина (табл. 5). Общий объем валежника в насаждениях варьирует от 0.8 м³/га (пп 05) до 9.5 м³/га (пп 03), более высокий на

Таблица 6. Характеристика пней на пробных площадях

Номер пп	Порода	Число, шт.	Объем, м ³ /га	Средняя высота, м	Средний диаметр, см		Степень разложения, балл
					на высоте пня	у шейки корня	
01	П	2	1.4 ± 0.5	0.7 ± 0.2	20.0	26.0	3
	Е	1	1.1	0.9	29.0	34.0	3
02	К	1	2.8	1.2	50.0	70.0	3
03	П	4	3.2 ± 0.4	0.6 ± 0.3	32.3	40.0	3
04	П	1	1.0	1.8	16.0	19.0	3
	К	1	2.2	1.0	40.0	67.0	3
05	П	4	2.9 ± 0.7	0.95 ± 0.5	14.8	20.8	3
	Е	1	0.2	1.0	5.0	5.0	3
	К	1	1.5	0.5	60.0	60.0	2

Таблица 7. Показатели хвороста на пробных площадях

Номер пп	Проективное покрытие, %	Средний объем, м ³ /га
01	60	17.0
02	40	10.3
03	45	10.3
04	15	4.2
05	25	4.2

пробных площадях 02 и 03 обусловлен крупными размерами стволов кедра. Средний объем валежника для типа биогеоценоза 2.1 ± 0.3 м³/га.

Число пней на разных пп – от 1 до 6 шт., их общий объем варьирует от 2.5 м³/га (пп 01) до 4.6 м³/га (пп 05) (табл. 6).

В среднем в папоротниково-снытево-мелкотравных пихтарниках их объем равен 3.3 ± 0.8 м³/га, все они имеют сильную степень разложения.

Проективное покрытие хвороста на разных пробных площадях менялось от 15 до 60 %. Средний объем хвороста на тип леса составил 9.2 ± 5.3 м³/га (табл. 7).

Живой напочвенный покров. Коренные южно-таежные папоротниково-снытево-мелкотравные пихтовые леса в районе исследований характеризуются формированием густого травяного покрова (проективное покрытие около 90 %) и высоким флористическим разнообразием. В напочвенном покрове встречается 105 видов травянистых растений, видовая насыщенность травяного яруса в среднем составляет 57 видов на 400 м². Основу растительного покрова образуют папоротниково-мелкотравные и папоротниково-снытево-мелкотравные подкروновые парцеллы с доминированием щитовника широкого (*Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenk. & Jermy), сныти обыкновенной

(*Aegopodium podagraria* L.) и кислицы обыкновенной (*Oxalis acetosella* L.). Повышенное участие папоротника в составе травостоя (рис. 1) обусловлено наличием окон (25–50 м²), занимающих от 5 до 30 % площади фитоценоза, сформировавшихся в насаждениях на месте вывалов и погибших деревьев, в основном из-за усыхания пихты, поврежденной уссурийским полиграфом.

Моховой покров слабо развитый (5–15 %), образован рыхлыми дернинами лесных зеленых мхов – сциурогипнума вздутоножкового (*Sciurohypnum oedipodium* (Mitt.) Ignatov & Huttinen) и плагиомниума остроконечного (*Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T. J. Kop.), с постоянным участием родобриума розового (*Rhodobryum roseum* (Hedw.) Limpr.). Характерный элемент напочвенной мозаики – крупный старый валеж хвойных, занимающий 1–5 % площади фитоценоза, с мелкотравно-зеленомошной синузией, где сплошной моховой покров образован плеврозиумом Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.) и гилокомиумом блестящим (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.).

Надземная фитомасса травяного покрова составляет в среднем 0.88 т/га, на пп 01 и пп 02 выше средней – 1.07 и 1.04 т/га, на остальных изменяется от 0.68 до 0.80 т/га. Вместе с тем наблюдается широкий разброс значений этого параметра – от минимальных – 0.16 т/га до максимальных – 2.33 т/га. Это обусловлено горизонтальной структурой лесных экосистем – в подкروновых парцеллах фитомасса достаточно низкая из-за небольшой освещенности подпологовой растительности, а в характерных для южно-таежных лесов небольших по площади окнах ее значения резко возрастают из-за увеличения освещенности.

Почвы. Почвы исследованных лесов характеризуются небольшим варьированием в строении и морфологии гумусового профиля. Выделяется, как правило, небольшой по мощности (3–7 см) дерновый (AW) горизонт. Нижняя граница серогумусового горизонта (AY) варьирует от 15 до 19 см. Глубже выделяются в различной степени оподзоленные (AEL, Ael) и текстурные горизонты, отличающиеся более тяжелым гранулометрическим составом и плотностью сложения (BT, BM). Условная почвообразующая порода (горизонт C) представлена бурыми, плотными, слабо водопроницаемыми глинами.

Гумусовый профиль в виде серии переходных горизонтов достигает мощности 40–50 см, однако содержание гумуса невелико. Если в верхних 10 см оно достигает 10–12 % (6–8 % по углероду), то уже на глубине 20–30 см не достигает 2 %. Общее накопление гумуса невелико (18–23 кг/м²), так как основная часть обогащенных органикой минеральных частиц выносятся по поверхности плотного иллювиального горизонта с поверхностным и внутрипочвенным стоком в депрессии рельефа и гидрографическую сеть, что также необходимо учитывать в углеродном балансе (рис. 2).

В структуре гранулометрического состава преобладают пылеватые частицы, что характерно для формирующихся на лессовидных отложениях почв (рис. 3). Песчаная фракция невелика и относительно равномерно распределена в почвенном профиле. Распределение пылевой фракции представляет практически зеркальное отражение распределения ила.

Четко выраженное перераспределение илистых частиц отражает элювиально-иллювиальный тип почвообразования, в то же время плавность элювиально-иллювиального перехода объясняется не только подзолообразованием, а участием всей совокупности формирующих

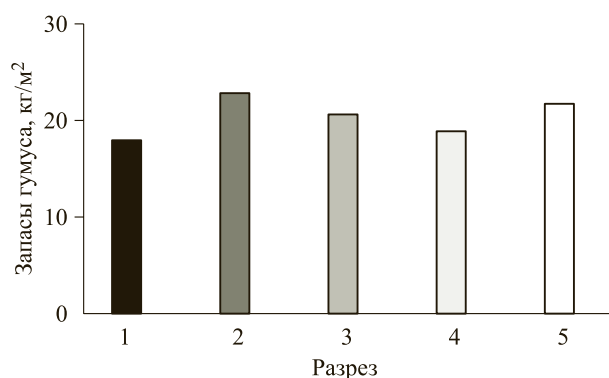


Рис. 2. Запасы гумуса в 0,5-метровом слое.
Номера разрезов соответствует номерам пробных площадей.

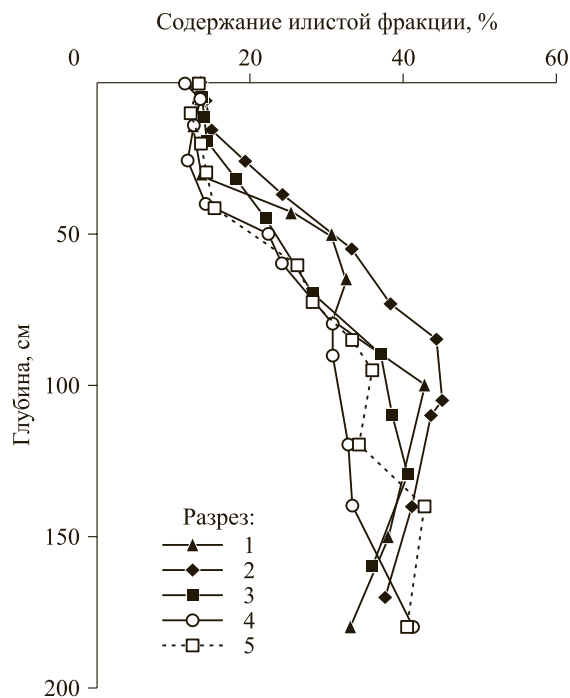


Рис. 3. Содержание илистых частиц.

профиль процессов (лессивирования, оглинивания и др.) (Дюкарев, 2005).

Реакция среды почвенного раствора нейтральная или близкая к нейтральной, минимальные значения отмечены в верхней части гумусового профиля.

Вниз по профилю значения pH возрастают, достигая максимума в почвообразующей породе, что является признаком их остаточной карбонатности.

Проведенные ранее исследования выявили особенности термического режима почв района исследований. В. М. Корсунов (1974) отнес их к группе малопрмерзающих, что обусловлено не столько климатическими факторами, сколько экологическими. Режим замерзания и оттаивания специфичен (Дюкарев, 1985): с осени почвы начинают промерзать с поверхности. Однако при формировании «снежного покрывала», которое к декабрю даже в лесу достигает 40 см и более, почвы в силу накопленного летом тепла в плотных, влажных, термостойких иллювиальных горизонтах полностью оттаивают, что активизирует биологические процессы, поэтому в исследованных лесах практически полностью отсутствуют лесные подстилки, только в приствольной части иногда выделяется небольшой по мощности (2–4 см) слой. Во вторую часть зимнего периода начинается вторичное промерзание почв, достигающее максимума в апреле, когда уже начинается оттаивание почвы с по-

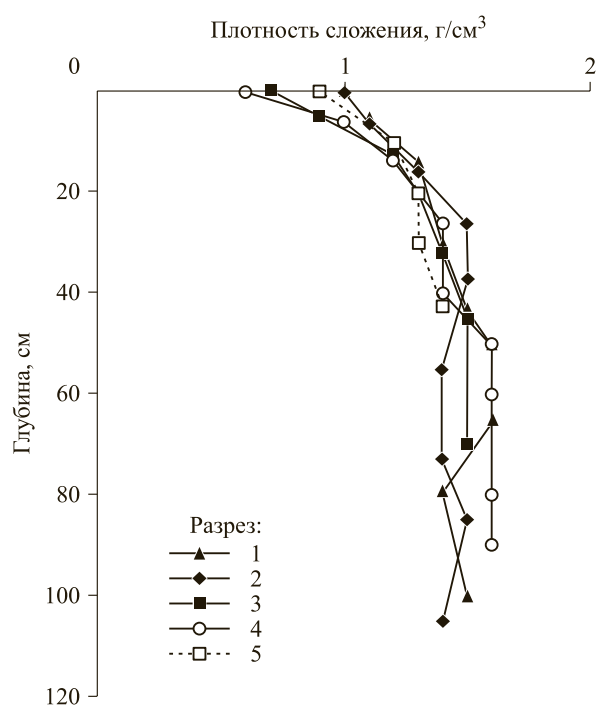


Рис. 4. Плотность сложения почв.

верхности. Для этого же времени характерна максимальная подвижность гумуса почв, как и всей коллоидальной системы. По мерзлотному экрану все это в виде растворов или с илистыми частицами выносятся с внутрипочвенным стоком за пределы ландшафта (лесной экосистемы), снижая потенциальную продуктивность.

Активность биологических процессов в верхних горизонтах лесных почв стимулирует процессы агрегации минеральной массы в структуры разного уровня и рыхлое сложение ($0.9\text{--}1.2\text{ г/см}^3$) почв (рис. 4).

Плотность сложения нижних горизонтов практически достигает предельных значений для пород тяжелого гранулометрического состава ($1.6\text{--}1.7\text{ г/см}^3$) и характеризуется очень низкой фильтрационной способностью.

Рыхлое сложение в корнеобитаемой зоне, высокая подвижность гумуса и других элементов питания, обеспеченность термическими ресурсами и влагой определяют высокую продуктивность и быстрое развитие древесных растений, а при их выпадении — напочвенного покрова. Это же служит причиной ослабленности «жирующих» древостоев, их подверженности инвазиям энтомовредителей, гнилевым и другим грибным болезням.

В термическом режиме почв проявляются микроклиматические различия условий местобитания, вызванные особенностями инсоляции

под древесным пологом. Так, в 2023 г. период с активными температурами ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) в почве на глубине 20 см в осиннике разнотравном лишь на 1 сут оказался меньше периода с активными температурами воздуха, отмеченными на ближайшей метеостанции. В темнохвойных лесах это период меньше на 3–5 нед. Самые холодные почвы свойственны пихтово-еловым биогеоценозам, в них сумма активных температур ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) на глубине 20 см составила всего $925\text{ }^{\circ}\text{C}$. В осиннике разнотравном сумма активных температур в 1.5 раза больше ($1410\text{ }^{\circ}\text{C}$), что делает почву более продуктивной, влияет на накопление тепла в почве и состояние древостоя. По мере распада темнохвойного полога почвы начинают лучше прогреваться. Например, под кронами здорового кедра сумма температур выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в почве на глубине 20 см составляет $980\text{ }^{\circ}\text{C}$, а под кедром, погибшим в результате поражения вредителями, — на $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше. На термический режим почвы влияет не только инсоляция, но и особенности пространственно-временного распределения снежного покрова. По результатам снегомерной съемки 2023 г. установлено, что запас воды в снежном покрове на открытых участках составил 104–154 (в среднем 130) мм, в пихтарнике — 78–147 (в среднем 110) мм, а в кедровнике — 54–160 (в среднем 98) мм. Различия объясняются особенностями ветрового переноса и усиленным испарением снега из-за отепляющего воздействия крон и стволов темнохвойных деревьев, более эффективно поглощающих солнечную радиацию, а также увеличением испаряющей поверхности в лесу. Наблюдения показали пространственное распределение атмосферных осадков в структуре древостоя. В период с 02.09 по 19.10.2023 г. в среднем под кронами зарегистрировано 57 % от осадков в межкрупных пространствах. Задержанные кронами осадки пошли на испарение, снизив затраты влаги из корнеобитаемого слоя на транспирацию и прогрев почвы.

Для пихтовых биогеоценозов Томь-Яйского междуречья ранее было показано, что изменение инсоляционного и термического режимов насаждения в связи с распадом и сменой древостоя приводит на разных стадиях сукцессии к значительной изменчивости продуктивности фитоценоза в его наземной и подземной части и активности гумусово-аккумулятивного процесса (Дюкарев и др., 2022; Dyukarev et al., 2022) (табл. 8), что отражается и на варьировании запасов почвенного углерода (табл. 9).

Таблица 8. Динамика продуктивности фитоценоза и гумуса почв, кг/м²

Стадия сукцессии	Фитомасса		Масса под- стилки	Гумус в слое почв 0.5 м
	надземная	подземная		
Пихтарник разнотравный	0.40	0.09	0.30	15.70
Разнотравное окно	3.57	0.12	0.01	21.60
Осинник разнотравный	0.15	0.21	0.14	10.20
Осиново-пихтовый лес	0.58	0.09	0.04	17.30
Пихтовый молодняк мертвопокровный	0.04	0.01	0.40	19.30

Таблица 9. Запасы углерода в почвах на разных стадиях сукцессии, кг/м²

Стадия сукцессии	С		
	органогенный	минеральный	суммарный
Пихтарник разнотравный	2.38	3.72	5.10
Окно высокотравное	2.31	8.43	10.74
Осинник разнотравный	0.35	7.79	8.84
Осиново-пихтовый лес	1.57	5.64	7.11
Пихтовый молодняк мертвопокровный	3.08	7.85	10.93

Таблица 10. Депонирование углерода в компонентах папоротниково-снытево-мелкотравных пихтарников, т/га

Компонент	Среднее значение	Номер пп				
		01	02	03	04	05
Древостой	205.92	234.10	240.88	232.30	147.27	173.84
Напочвенный покров	0.42	0.50	0.49	0.37	0.37	0.38
Почва (слой 0.5 м)	121.35	124.21	112.24	122.85	123.93	123.34
Общее содержание	327.69	358.84	353.61	355.52	271.54	297.56

Запасы углерода в различных компонентах биогеоценоза папоротниково-снытево-мелкотравных пихтарников. Используемые в настоящем исследовании методики анализа и расчетов позволили получить предварительные данные о вкладе в запасы углерода отдельных компонентов изученных биогеоценозов (табл. 10).

В целом результаты по запасам углерода не выбиваются из уже известных данных (Усольцев, 2007). Основной депонирующей системой для углерода является древостой (50–70 %). Фитоценоз, с его надземной и подземной частями, дает не более 1–2 % углерода. Органическое вещество почв формирует углеродный пул по типу южно-таежных разнотравно-мелкотравных темных хвойных лесов.

Сами по себе почвы южной тайги не отличаются высоким богатством и, соответственно, в углеродном балансе занимают подчиненное положение.

Внутриландшафтное варьирование содержания углерода обусловлено, прежде всего, неод-

нородностью видовой и возрастной структуры лесной экосистемы. Так, на фоне относительно однородных по возрасту (60–70 лет) и по диаметрам стволов (22–30 см) пихты, внедрение нескольких более старых и толстых деревьев ели или кедра (см. табл. 2) дает существенный прирост как по общей биомассе, так и по углероду в частности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показал, что, несмотря на принадлежность насаждений на пробных площадях к одному типу леса, они несколько различаются по качественным, количественным и размерным характеристикам древесных компонентов, напочвенного покрова и почвы, что отражается на запасе углерода как в каждом компоненте, так и в целом в биогеоценозе. Прослежена явная взаимосвязь фитомассы напочвенного покрова и пространственной структуры древостоя, когда изменение освещенности в окнах распада, в том числе из-за гибели

деревьев, поврежденных уссурийским полиграфом, приводит к существенному увеличению массы травянистых растений.

Проведенные исследования позволили не только получить характеристики папоротниково-снытево-мелкотравных пихтарников как пространственно-временных реперных участков биогеоценотического покрова модельной территории, но и выявить их особенности – флористическое разнообразие, очень высокое видовое богатство травяного покрова и видовая насыщенность растительных сообществ, специфичность почвенных процессов, что дает основание выделить их в особый тип пихтовых лесов Западно-Сибирской равнины и тем самым расширить представление о типологии лесов региона, опубликованных сведений о которой очень мало (Рысин и др., 2012). Особую важность представляют впервые полученные данные о фитомассе напочвенного покрова южно-таежных пихтарников Западной Сибири.

За ограниченное время, отведенное в рамках проекта на создание сети пунктов мониторинга и получение на них первичной информации об основных характеристиках лесов, выполнен большой объем комплексных исследований – начиная с выбора мест закладки постоянных пробных площадей и заканчивая аналитическими работами и расчетами количественных оценок структуры биогеоценоза, его продуктивности и запаса углерода. В большинстве случаев организации – исполнители проекта (в том числе ИМКЭС СО РАН) не имеют лесных стационаров для оперативного и, что не менее важно, качественного выполнения подобных работ в условиях дефицита времени. Опираясь на собственный опыт работы по проекту и многолетних исследований в лесных экосистемах Западной Сибири, найден оптимальный, по нашему мнению, способ решения этой непростой задачи. Территория Томь-Яйского междуречья была определена в качестве модельной не только из-за типичности для нее выбранных для исследований биогеоценозов и наличия характерных для них сукцессионных рядов, но и с учетом ее транспортной доступности (15 км от Томска), чтобы избежать непродуктивных затрат времени на перемещение. Использование космических снимков территории и оборудования для дистанционного мониторинга состояния природно-климатической системы, в том числе разработанного в ИМКЭС СО РАН, существенно сократило время на определение репрезентативных участков лесного покрова для организации

пунктов мониторинга и наземные обследования. Большое значение имеет близость района полевых исследований к Институту как аналитическому центру, что позволило сохранять качество натурных материалов и оперативно обрабатывать их непосредственно в лабораториях на современном оборудовании. В дальнейшем важным организационным моментом является официальное оформление и регистрация пробных площадей в лесохозяйственных органах региона как полевых научных лабораторий долговременного пользования, фактически выполняющих функции стационаров.

Исследования выполнены при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических систем». Регистрационный номер 123030300031-6.

Авторы признательны сотрудникам ИМКЭС СО РАН О. Г. Бендер, А. С. Кузнецову, О. Э. Печень-Песенко, Ю. Г. Райской, А. О. Слабиш, Т. П. Соловьевой и А. В. Удалому за помощь в сборе и обработке материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верхунов П. М. Таксация леса: учеб. пособ. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. 396 с.
- Дылис Н. В. Структура лесного биогеоценоза. М.: Наука, 1969. 55 с.
- Дюкарев А. Г. Физические свойства и особенности генезиса текстурно-дифференцированных почв Томь-Яйского междуречья: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03. Новосибирск: Ин-т почв. и агрохим. СО РАН, 1985. 20 с.
- Дюкарев А. Г. Ландшафтно-динамические аспекты таежного почвообразования в Западной Сибири. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 284 с.
- Дюкарев А. Г., Пологова Н. Н., Лапина Е. Д., Березин А. Е., Льготин В. А., Мульдьяров Е. Я. Природно-ресурсное районирование Томской области. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 40 с.
- Дюкарев А. Г., Климова Н. В., Никифоров А. Н., Чернова Н. А., Копысов С. Г. Устойчивость лесных экосистем к изменениям климата // Сиб. экол. журн. 2022. Т. 29. № 3. С. 304–314.
- Замолодчиков Д. Г., Уткин А. Н., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесообразующих пород России // Лесн. таксация и лесоустр. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.

- Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова, Г. В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Копысов С. Г., Дюкарев А. Г., Никифоров А. Н. Термический режим почв юга таёжной зоны Западной Сибири. Свид-во о гос. рег. базы данных № 2022623086. М.: Роспатент, 2022.
- Корсунов В. М. Генетические особенности глубокооподзоленных почв черневой тайги Салаира и некоторые элементы современного почвообразования в них // Лесные почвы горного окаймления юго-востока Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 133–192.
- Корчагин А. А. Строение растительных сообществ. Полевая геоботаника. М.: Наука, 1976. Т. 5. 320 с.
- Кривец С. А., Бисирова Э. М., Керчев И. А., Пац Е. Н., Чернова Н. А. Трансформация таёжных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // Рос. журн. биол. инваз. 2015. Т. 8. № 1. С. 41–63.
- Кураков С. А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4 (155). С. 29–32.
- Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р (ред. от 20.01.2021). М.: Минприроды России, 2017.
- Методы изучения лесных сообществ / Под ред. В. Т. Ярмишко, И. В. Лянгузовой. СПб.: НИИхимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.
- Пологова Н. Н., Чернова Н. А., Климова Н. В., Дюкарев А. Г. Разнообразие кедровых лесов в связи с условиями местообитаний // Лесоведение. 2013. № 4. С. 32–42.
- Правила санитарной безопасности в лесах. Утв. Пост. Правительства Российской Федерации от 09.12.2020 г. № 2047. М.: Правительство РФ, 2020.
- Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18.08.2014 № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации». М.: Минприроды РФ, 2014.
- Программа и методика биогеоэкологических исследований / Отв. ред. Н. В. Дылис. М.: Наука, 1974. 403 с.
- Рысин Л. П., Манько Ю. И., Бебия С. М. Пихтовые леса России. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2012. 197 с.
- Сортиментные и товарные таблицы для древостоев Западной и Восточной Сибири. Новосибирск, 2005. 176 с.
- Сукачев В. Н. Основные понятия лесной биогеоэкологии // Основы лесной биогеоэкологии. М.: Наука, 1964. С. 5–59.
- Технология мониторинга пихтовых лесов в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Сибири. Метод. пособие / С. А. Кривец, Э. М. Бисирова, Е. С. Волкова, Н. М. Дебков, И. А. Керчев, М. А. Мельник, А. Н. Никифоров, Н. А. Чернова. Томск: УМИИМ, 2018. 74 с.
- Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.
- Усольцев В. А., Цепордей И. С., Норицин Д. В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесобразующих пород Урала // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 1 (80). С. 4–14.
- Dyukarev A. G., Klimova N. V., Nikiforov A. N., Chernova N. A., Kopysov S. G. Resilience of forest ecosystems to climate change // Contemp. Probl. Ecol. 2022. V. 15. Iss. 3. P. 245–252 (Original Russian text © A. G. Dyukarev, N. V. Klimova, A. N. Nikiforov, N. A. Chernova, S. G. Kopysov, 2022, publ. in Sib. ekol. zhurn. 2022. V. 29. N. 3. P. 304–314 (in Russian with English abstract)).
- Krivets S. A., Bisirova E. M., Kerchev I. A., Pats E. N., Chernova N. A. Transformation of taiga ecosystems in the Western Siberian invasion focus of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) // Rus. J. Biol. Invas. 2015. V. 6. Iss. 2. P. 94–108 (Original Russian text © S. A. Krivets, E. M. Bisirova, I. A. Kerchev, E. N. Pats, N. A. Chernova, 2015, publ. in Ros. zhurn. biol. invas. 2015. N. 1. P. 41–63).
- WRB IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources. Int. soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Int. Union Soil Sci. (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

AN EXPERIENCE AND FIRST RESULTS OF COMPLEX BIOGEOCENOLOGICAL STUDIES IN DARK CONIFEROUS FORESTS IN THE SOUTH OF THE TAIGA ZONE OF WESTERN SIBERIA

A. G. Dyukarev, S. G. Kopysov, S. A. Krivets, E. N. Pats, N. A. Chernova

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems,
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Prospekt Akademicheskii, 10/3, Tomsk, 634055 Russian Federation*

E-mail: dag@imces.ru, wosypok@mail.ru, krivec_sa@mail.ru, patz_imces@mail.ru, naitina79@mail.ru

In the indigenous southern taiga fern-forb fir forests on the Tom-Yaya interfluvium (Tomsk Oblast), the characteristics of tree stands, underbrush, undergrowth, coarse woody debris, ground cover, soils and their contribution to carbon sequestration were studied. The average stock of the forest stand for the type of biogeocenosis was $315.8 \pm 56.1 \text{ m}^3/\text{ha}$, the average stock of the Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) in different stands varied from 99.2 to 201.4 m^3/ha . In terms of forest health condition, the forest stands are weakened to varying degrees, the fir elements of the forest stands are stronger, which is largely due to their damage by the invasive four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford). The underbrush is sparse or of medium density (880–2720 pieces/ha), formed mainly by red raspberry (*Rubus idaeus* L.) and rowan (*Sorbus sibirica* Hedl.). Undergrowth with an absolute predominance of fir, its number (800–920 trees/ha) characterizes unsatisfactory regeneration in all studied stands. The average volume of deadfall for the type of biogeocenosis was $2.1 \pm 0.5 \text{ m}^3/\text{ha}$, stumps $3.3 \pm 0.8 \text{ m}^3/\text{ha}$, brushwood – $9.2 \pm 5.3 \text{ m}^3/\text{ha}$. The features of the phytocenosis include high values of floristic diversity (131 species), species richness of the grass cover (105 species) and species richness of plant communities (57 species per 400 m^2). The increased participation of ferns in the composition of the grass stand is due to the presence of windows occupying from 5 to 30 % of the area of the phytocenosis, formed in stands at the site of fallouts and dead trees, mainly due to the drying out of fir damaged by the four-eyed fir bark beetle. For the first time, data have been obtained on the phytomass of the ground cover of southern taiga fir forests in Western Siberia, estimated on average at 0.88 t/ha, with a wide variation of this indicator due to the peculiarities of the horizontal structure of the ground cover and different illumination in sub-canopy parcels and windows. The features of the composition, structure and thermal regime of the soils of the studied biogeocenoses are shown. Data are presented on changes in the productivity of phytocenoses, soil humus and carbon reserves in various components of the studied forests.

Keywords: fern-snowflake-forb fir forests, composition, structure, productivity of phytocenosis, carbon reserves, Tomsk Oblast.

How to cite: Dyukarev A. G., Kopysov S. G., Krivets S. A., Pats E. N., Chernova N. A. An experience and first results of complex biogeocenological studies in dark coniferous forests in the south of the taiga zone of Western Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 11–24 (in Russian with English abstract and references).

УДК 630*181.351(574.472)

ТЕЛЛЕРМАНОВСКОЕ ОПЫТНОЕ ЛЕСНИЧЕСТВО ИНСТИТУТА ЛЕСОВЕДЕНИЯ РАН: 80-ЛЕТНИЙ ПОЛИГОН СТАЦИОНАРНЫХ БИОЦЕНОТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И. А. Уткина, В. В. Рубцов

Институт лесоведения РАН

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

E-mail: UtkinaIA@yandex.ru, VRubtsov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

Теллермановское опытное лесничество Института лесоведения РАН, расположенное на юго-востоке Воронежской области, создано по инициативе академика В. Н. Сукачева в 1944 г. как место проведения комплексных долгосрочных исследований в широколиственных лесах на границе между лесостепью и степью. За почти 80-летний период на его территории работали специалисты разного профиля: лесоводы, геоботаники, почвоведы, зоологи, микробиологи, энтомологи, фитопатологи. Были проведены обширные исследования гидрологии массива и водного режима насаждений, средообразующей роли леса, определены запасы фитомассы, продуктивность древостоев в разных типах леса, заложен цикл лесоводственных экспериментов. Всестороннее изучение биогеоценозов включало также изучение корневых систем, фенологические, геоботанические, зоологические, энтомологические, микробиологические и микологические исследования. Разработаны научные основы для создания культур дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в лесостепи, учитывающие его формовое разнообразие и результаты лесоводственных экспериментов, заложенных в первые десятилетия существования лесничества. Изучение лесохозяйственных аспектов деградации дубовых древостоев позволило разработать практические методы воспроизводства дубрав на вырубках древостоев, смешанных с дубом, посевом желудей с сокращенным периодом рубок ухода.

Ключевые слова: лесостепь, дубравы, долгосрочные исследования, восстановление дубовых лесов, Воронежская область.

DOI: 10.15372/SJFS20240304

ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основатель и первый руководитель Института леса АН СССР академик В. Н. Сукачев, намечая места для будущих стационарных исследований в лесах разных природных зон, выбрал Борисоглебский лесной массив как эталон широколиственного леса на южном пределе существования высокопродуктивных нагорных лесов. Общая площадь массива 65 тыс. га, длина около 65 км и ширина от 3 до 16 км. Он тянется с северо-востока на юго-запад по берегам рек Хопра и Вороны в юго-восточной части Воронежской области. По мнению краеведов, этот лесной массив – остаток некогда первобытных лесов, уцелевший при выжигании естественной степной растительности в октябре 1571 г. по распоряжению Ивана Грозного.

В центре Борисоглебского лесного массива находится Теллермановский лес (синонимы – Теллермановская дубрава, Теллермановская роща) площадью 42 тыс. га. Эта местность сильно рассечена оврагами и балками, обладает наибольшим разнообразием элементов рельефа, благодаря чему тут представлены почти все условия произрастания дубовых лесов.

Существуют два варианта происхождения необычного для русского языка названия – Теллермановский лес. Первый связывают с тюркскими словами «орман» – лес и «тилео» – холм, невысокая гора, поэтому получается Тилеорман, то есть «лес на холме». Это название берет начало в глубине веков, во время татаро-монгольских нашествий.

Второй вариант происхождения более близок к нашему времени. В начале XVIII в., когда

по распоряжению Петра I в Борисоглебске была построена верфь и начались судостроительные работы, ими руководил голландец Франц Тиммерман. Считается, что его фамилия легла в основу названия леса, но ее записали с ошибками, и вместо Тиммермановского лес стал Теллермановским.

Впоследствии Теллермановский лес был постоянным источником высокоценной, в том числе экспортной, древесины. В 1900 г. на Всемирной выставке в Париже древесина дуба (*Quercus* L.) из Теллермановской рощи получила одну из высших оценок. В конце XIX в. Лесным департаментом России здесь было организовано Опытное лесничество, где в 1887–1907 гг. жил и работал Григорий Андреевич Корнаковский – создатель особого (чересполосного) способа рубок в дубовых лесах, способствующих их естественному возобновлению. В настоящее время в его доме находится контора Теллермановского опытного лесничества, перед входом в которую стоит памятник выдающемуся российскому лесоводу.

Более подробная информация об истории Теллермановского леса и научных исследованиях, выполненных на его территории, содержится в монографии Е. И. Еньковой (1976) и в коллективной монографии «Экосистемы Теллермановского леса» (2004).

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теллермановское опытное лесничество (далее ТОЛ) Института леса АН СССР было создано почти одновременно с Институтом, в конце 1944 г. Для этого В. Н. Сукачев совершил две поездки по Теллермановскому лесу в сопровождении Елизаветы Ивановны Еньковой, работавшей инженером в лесхозе. Весной 1944 г. он приехал один, спустя несколько месяцев – вместе с С. В. Зонном и Л. Ф. Правдиным. В результате был выбран участок небольшой по площади, но на нем были представлены основные ландшафтно-рельефные особенности и типы растительного покрова всего Борисоглебского лесного массива.

По мнению М. Г. Романовского (2010а), фундаментальные исследования, охватившие все компоненты биогеоценоза в соответствии с замыслами В. Н. Сукачева и его коллег, сотрудники Института лесоведения РАН (до 1991 г. – Лаборатория лесоведения АН СССР) наиболее последовательно осуществили именно в ТОЛ, что

связано со спецификой объекта исследований, длительностью и разносторонностью мониторинговых наблюдений, личными интересами «отцов-основателей» (по-видимому, имеются в виду В. Н. Сукачев и А. А. Молчанов), сформировавших долговременные исследовательские программы.

Согласно М. Г. Романовскому (2010а), ТОЛ было выбрано как опорный пункт биогеоэкологических исследований в лесостепи еще и потому, что Теллермановский лесной массив давно и достаточно хорошо описан как историками, так и лесоведами. Помимо многочисленных научных трудов, начиная с 1847 г. сохранились материалы лесоустройств Теллермановской рощи.

Климат района, где находится Теллермановский лес, как и всей юго-восточной части Воронежской области, умеренно континентальный, со значительными колебаниями температуры и осадков, низкой относительной влажностью летнего периода при довольно высокой температуре.

За время существования ТОЛ и регулярных наблюдений отмечено несколько периодов с разными погодными показателями (Енькова, 1960, 1976; Состояние..., 1989; Рубцов, Уткина, 2008; и др.). Было отмечено, что в последние 20–30 лет произошло постепенное изменение климата в сторону уменьшения континентальности: зимы стали теплее, а летние периоды немного прохладнее, с увеличением количества осадков в период вегетации исчезли суховеи, которые раньше были довольно частыми в мае, стали очень редкими поздние весенние и ранние осенние заморозки. В целом температурные условия описываемого района и наблюдаемая тенденция их изменения вполне благоприятны для роста и развития многих древесных и кустарниковых пород.

Почвы на территории ТОЛ разнообразные: в нагорной части распространены темно-серые лесные, на которых произрастают высокопроизводительные насаждения, но есть также солонцовые почвы и осолоделые солонцы, в пойме р. Хопер и днищах балок присутствуют лугово-лесные почвы, богатые питательными веществами.

Общая площадь ТОЛ 2025 га. Из них не-лесные угодья (солонцовые поляны, сенокосы, пашни и озера, усадьба и др.) составляют 155 га.

Основные типы дубрав: снытево-осоковые, осоково-снытевые ясеновые дубравы I–II классов бонитета на темно-серых лесных почвах; предсклоновые леса III–V классов бонитета, которые перед южными склонами замещают степные солонцовые поляны; склоновые по-

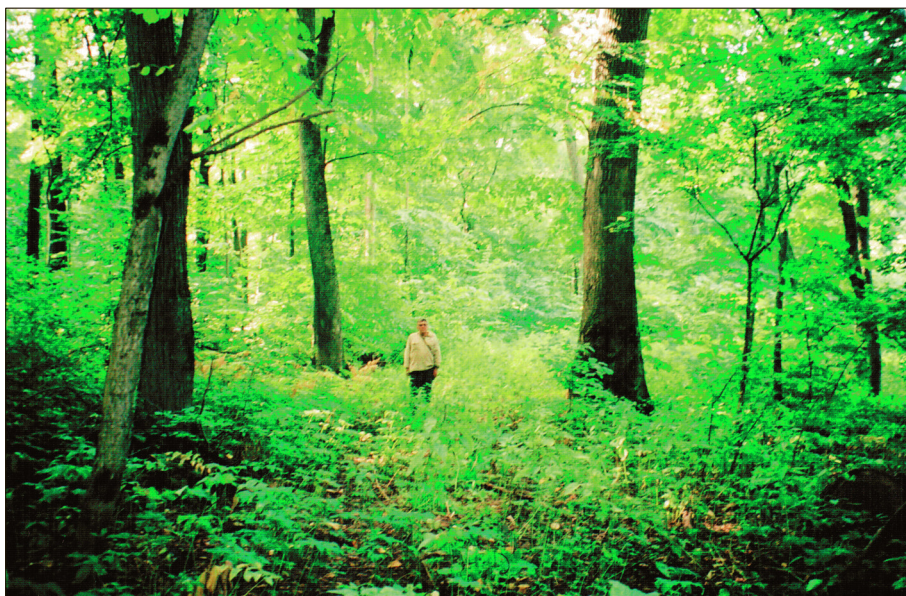


Рис. 1. Перестойная ясеневая снытево-осоковая дубрава 180–200 лет (фото В. В. Рубцова).

лево-кленовые и бересклетовые дубравы III–IV классов бонитета на более легких суглинках и супесях; солонцеватые и солонцовые дубравы IV–V классов бонитета на солонцах и солонцеватых глинистых почвах; ландышевые и ландышево-ежевичные дубравы II–III классов бонитета на лугово-лесных почвах.

Подробная характеристика типов леса ТОЛ содержится в работах А. П. Петрова (1957), И. Н. Елагина (1963) – в нагорной части, А. А. Матвеевой (1963) – в пойменной.

Половина площади дубрав – спелые и перестойные насаждения, приспевающие представлены преимущественно низкобонитетными древостоями порослевого происхождения.

В первые годы существования ТОЛ В. Н. Сукачев выделил ряд из пяти заповедных кварталов, занятых в основном 200-летними (теперь 280-летними) дубравами. В 1972 г. по инициативе М. М. Вересина, профессора Воронежского лесотехнического института, был начат процесс выделения всех нагорных кварталов ТОЛ с перестойными дубравами в «Памятник природы областного значения», но положительно вопрос был решен только в 1986 г. В настоящее время перестойные 180–250-летние нагорные дубравы на 250 га площади ТОЛ имеют статус «Памятник природы Воронежской области» (рис. 1, 2).

Важно отметить, что на территории ТОЛ дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) представлен двумя фенологическими разновидностями: ранней (*Quercus robur* var. *praecox* Chern.) и поздней

(*Q. robur* var. *tardiflora* Chern.). Особенности роста и территориального размещения обеих феноформ дуба, свойств древесины, реакции на биотические и абиотические факторы – постоянный объект наблюдений нескольких поколений исследователей ТОЛ.



Рис. 2. Ствол одного из деревьев дуба в перестойной дубраве 250–280 лет (фото В. В. Рубцова).

Дуб ранней формы произрастает в основном в дубравах пойменной части, в нагорной части – в дубняках бересклетовых, солонцовых и солонцеватых.

В дубравах нагорной части на темно-серых лесных почвах преобладает дуб поздней формы с небольшой примесью ранней формы и промежуточных между ними форм. Наиболее подробно приуроченность феноформ дуба к тем или иным условиям произрастания в ТОЛ и за его пределами обсуждается в работах Е. И. Еньковой (1950а, 1976 и др.), а также К. В. Зворыкиной и И. Н. Елагина (1965).

Дубравы Теллермановского лесного массива, в том числе на территории ТОЛ, неоднократно подвергались усыханию. В первую очередь страдали пойменные и старовозрастные нагорные насаждения, ослабленные неблагоприятными климатическими факторами, частыми размножениями насекомых, грибными заболеваниями. Эти процессы описаны в работах А. Т. Вакина (1954), И. Н. Елагина и К. В. Зворыкиной (1954), Г. В. Линдемана (1975), А. А. Молчанова (1978), В. В. Рубцова и Н. Н. Рубцовой (1984), Н. Н. Селочник (1999, 2015), В. В. Рубцова и И. А. Уткиной (2008) и др.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ландшафтно-типологическое богатство ТОЛ, близкое соседство контрастных почвенных, микроклиматических условий на его территории всегда вызывали большой интерес у специалистов разного профиля. Как типичный образец зонального широколиственного леса лесничество стало местом сравнительных исследований флоры и фауны, в том числе почвенной, продуктивности лесов, процессов почвообразования. Здесь проводились комплексные научные исследования, посвященные всестороннему изучению роста и состояния деревьев и древостоев дуба черешчатого, других лесообразующих пород, проблеме усыхания дубрав и многим другим вопросам.

С момента основания ТОЛ в течение 36 лет (1945–1981) его научным руководителем был выдающийся ученый, член-корреспондент АН СССР Александр Алексеевич Молчанов, внесший большой вклад в изучение биогеоценотических взаимодействий в дубравах лесостепи. По мнению М. Г. Романовского (2010а, с. 29), «в разнообразии и структуре собираемой информации большую роль сыграла личность А. А. Молча-

нова, курировавшего работу научных стационаров в опытном лесничестве. Неоспоримые и казавшиеся на первых порах неоправданно широкими интересы А. А. Молчанова определили возможность создания спустя 25 лет после его кончины достаточно полных моделей жизни дубравных биогеоценозов».

Работы в ТОЛ под руководством и при непосредственном участии А. А. Молчанова можно разбить на два периода.

Первый этап (1945–1951 гг.) связан с изучением и инвентаризацией природного разнообразия лесничества. Были описаны элементы ландшафта, почв (Зонн, 1950а; Мина, 1954, 1955), рост и развитие феноформ дуба (Енькова, 1950а, б; Иванова, 1953), особенности цветения и плодоношения дуба (Минина, 1954), строение и свойства древесины дуба в разных условиях произрастания (Вихров, 1954; Елагин, 1962), типы растительности (Петров, 1957; Елагин, 1963; Матвеева, 1963), сукцессионные смены (Зонн, 1950б), микрофлора почв (Пушкинская, 1953), грибные сообщества (Вакин, 1954; Шуманов, 1954), фауна наземных позвоночных (Образцов, 1951) и др.

Постепенно формировался коллектив постоянных научных сотрудников: А. А. Молчанов – многолетний научный руководитель стационара, лесоводы Е. И. Енькова, И. Н. Елагин, В. В. Смирнов и В. Е. Вихров, почвоведы С. В. Зонн и В. Н. Мина, геоботаники А. А. Матвеева и К. В. Зворыкина, микробиолог О. Н. Пушкинская, фитопатологи А. Т. Вакин и Е. А. Шуманов, зоолог Б. В. Образцов и многие другие. В этот период в ТОЛ часто приезжал В. Н. Сукачев, с интересом осматривая заложенные пробные площади и беседуя с сотрудниками стационара (рис. 3).

Второй этап (1952–1981 гг.) – период наивысшего развития исследований в ТОЛ. В эти годы большое развитие получает материально-техническая база научно-исследовательских работ: на территории стационара функционировали 6 метеостанций, 9 водосливов и 5 стоковых площадок, 6 лизиметрических установок, 5 вышек высотой 20–28 м для работы в кронах, 5 скважин глубиной 15 м для наблюдения за уровнем грунтовых вод.

К Строяновскому кордону – основному месту проживания и работы научных сотрудников – и в некоторые кварталы лесничества была проложена линия электропередач; число постоянных пробных площадей превысило 70 (рис. 4).



Рис. 3. Посещение В. Н. Сукачевым Теллермановского стационара в 1951 г. Слева направо: Е. И. Енькова, В. Н. Мина, А. А. Молчанов, А. А. Матвеева, Б. В. Образцов, В. Н. Сукачев (фото из архива Института лесоведения РАН).

Интенсивность научных работ была очень высока. Одновременно на стационаре работало до 30 научных сотрудников разного профиля, лаборантов и аспирантов. В систему объектов, обслуживающих активные эксперименты и наблюдения 1945–1981 гг., вошли водосливы по тальвегу балки, градиентные вышки, установки для регистрации количества осадков, поступающих в лес и перераспределяемых лесным пологом и стволами; скважины для определения

уровня грунтовых вод; лизиметры и т. д. Но главным достоянием ТОЛ стала сеть постоянных пробных площадей, возрастные и экологические ряды которых охватили практически все разнообразие условий роста дубрав (Романовский, 2010а).

Были проведены обширные исследования гидрологии массива и водного режима насаждений, средообразующей роли леса, определены запасы фитомассы, продуктивность дре-



Рис. 4. Вид на Строяновский кордон в 2004 г. с вышки для экофизиологических исследований (фото И. А. Уткиной).



Рис. 5. А. А. Молчанов с участниками совещания на одной из пробных площадей в нагорной дубраве (фото из архива В. В. Рубцова).

востоев в разных типах леса, заложен цикл лесоводственных экспериментов. Всестороннее изучение биогеоценозов включало также исследования корневых систем, а также фенологические, геоботанические, зоологические, энтомологические, микробиологические и микологические. Часть из них проводилась в рамках Международной биологической программы. Осуществлен цикл работ по выяснению причин массового усыхания дуба в 1970-е годы, происходящего в тот период во многих странах Европы. Продолжилось изучение особенностей разных феноформ дуба.

Основные работы этого периода – коллективные монографии: «Биогеоценологические исследования в дубравах лесостепной зоны» (1963), «Дубравы лесостепи в биогеоценологическом освещении» (1975), публикации Е. И. Еньковой «Теллермановский лес и его восстановление» (1976); А. А. Молчанова «Гидрологическая роль леса» (1960), «Лес и климат» (1961), «Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи» (1964), «Продуктивность органической массы в лесах различных зон» (1971), «Влияние леса на окружающую среду» (1973), «Воздействие антропогенных факторов на лес» (1978), А. А. Молчанова и В. А. Губаревой «Взаимосвязи в лесном биогеоценозе» (1980), а также многочисленные статьи в тематических сборниках и

ведущих научных журналах (Ватковский, 1969; Молчанов, 1970; Смирнов, 1970; Чжан Шичзюй, 1970; Боханова, 1971; и мн. др.).

На базе Теллермановского опытного лесничества было проведено три всесоюзных научных совещания: в 1960, 1970 и 1974 гг. (рис. 5).

После завершения профессиональной деятельности А. А. Молчановым начался новый этап исследований в ТОЛ. Научными руководителями стационара были кандидат сельскохозяйственных наук Владимир Васильевич Осипов (1982–1991 гг.), доктор биологических наук Михаил Георгиевич Романовский (1991–2007 гг.), с 2007 г. – доктор биологических наук Василий Васильевич Рубцов. Произошло значительное обновление состава сотрудников, работающих на территории ТОЛ, что привело к сокращению одних научных направлений и появлению новых.

Проводившиеся исследования экологии широколиственных лесов были направлены на количественное изучение их функционирования, продуктивности, средообразующей роли и устойчивости в сравнении с другими лесными экосистемами Европейской России, обобщенные и проанализированные М. Г. Романовским (Экосистемы Теллермановского леса, 2004; Романовский и др., 2008; Романовский, 2010а, б; и др.).



Рис. 6. В. В. Мамаев в вырытой им почвенной яме (фото В. В. Рубцова).

Были продолжены начатые в 1950–1960-х годах работы по изучению морфологии крон дуба (Состояние дубрав..., 1989; Ильюшенко, Романовский, 2000; Каплина, Селочник, 2009; Каплина, 2018, 2022; и др.), водному режиму дубрав (Жосу, 1988; Иванов, 1991; Романовский, Мамаев, 2002; и др.).

Благодаря возможности использовать современное для 1980–1990-х годов оборудование, в этот период экофизиологические исследования в ТОЛ были проведены на более высоком уровне, чем раньше. Под руководством Александра Георгиевича Молчанова изучены фотосинтез дуба при разных условиях влагообеспечения (Молчанов, 1992, 2007, 2012 и др.), предрассветный водный потенциал листьев дуба (Молчанов, Молчанова, 2000; и др.), фитомасса сеянцев дуба в условиях искусственной почвенной засухи (Молчанов и др., 1994; и др.). С помощью специально сконструированной автономной измерительной системы исследован ток пасоки в стволах дуба и определено водопотребления растениями (Жиренко, 1994, 2003; Zhirenko, 2003; и др.).

Исследование корневых систем дуба и их связи с кронами на протяжении длительного времени осуществлялось Владимиром Викторовичем Мамаевым (рис. 6). Особое внимание

при этом было обращено на функционирование тонких поглощающих корней под действием внешних факторов (Мамаев, 2000; Мамаев и др., 2001, 2002; и др.).

Фитопатологические наблюдения в насаждениях ТОЛ на протяжении более 30 лет вела Нелли Наумовна Селочник, оценивая состояние грибных сообществ в дубравах ТОЛ и за его пределами (Селочник, 1999, 2008, 2015 и др.).

В последние годы этим занимается Галина Борисовна Колганихина (Рубцов и др., 2019).

Энтомологические исследования в ТОЛ ведутся практически непрерывно с середины 1950-х годов: сначала А. С. Моравской (1957, 1960, 1975 и др.) и Г. Е. Корольковой (1963), затем Н. Н. Рубцовой (1973, 1974, 1978, 1981 и др.). Особый интерес вызывают наблюдения за листовертками на поздней форме дуба (Рубцова, 1978, 1981), так как традиционно считается, что их гусеницы питаются листвой именно ранней формы. Накопленные за много лет данные о взаимодействии листогрызущих насекомых и дуба и анализ их популяционной динамики с помощью математического моделирования изложены в монографии В. В. Рубцова и Н. Н. Рубцовой (1984).

В середине 1980-х годов одновременно стали выполняться наблюдения за состоянием по-



Рис. 7. Культуры дуба на вырубке в нагорной дубраве при нарезке полос (а) и после окашивания травы (б) (фото В. В. Чеботаревой).

пуляций филлофагов и за приростом стволовой древесины и восстановлением листвы в кронах деревьев дуба после дефолиации разной интенсивности (Уткина, Рубцов, 1989, 1994; Рубцов, Уткина, 1995, 2008; и др.). В настоящее время продолжают наблюдения за основными видами филлофагов в дубравах ТОЛ (Рубцов, Уткина, 2014; Уткина, Рубцов, 2019; и др.) и за реакцией разных фенотипов дуба на биотические (включая потребление листвы насекомыми) и абиотические факторы (Уткина, Рубцов, 2016, 2017).

Стволовых вредителей в насаждениях лесничества в 1960–1970-х годах наблюдал Г. В. Линдеман (1975 и др.), в настоящее время – А. В. Петров с соавт. (2019).

Фауна почвенных беспозвоночных – одно из традиционных научных направлений в ТОЛ. Наиболее подробно результаты многолетних исследований изложены в коллективной монографии «Структура и функционирование почвенного населения дубрав Среднерусской лесостепи» (1995) и обзорной работе М. Г. Романовского (2010б).

Важно отметить, что в последнее десятилетие в ТОЛ возросло число публикаций, посвященных проблеме деградации дубовых лесов в зоне лесостепи и их трансформации в менее ценные лиственные насаждения с участием ясеня (*Fraxinus* L.), клена (*Acer* L.), липы (*Tilia* L.), вяза (*Ulmus* L.) в регионах коренного произрастания дуба (Стороженко и др., 2018, 2019, 2021, 2022). Считается, что в существующих естественных и искусственных древостоях возобновление дуба отсутствует, так как он не выдерживает конкуренции с другими породами. Одна из причин

такой смены – несовершенство существующей системы создания дубовых древостоев на площадях после рубки спелых насаждений, так как она не обеспечивает качественную всхожесть желудей, а традиционная система рубок не способствует формированию высокопродуктивных древостоев с максимальным участием дуба и сохранению генофонда этой породы. Разработана подробная программа восстановления дубовых лесов (Чеботарева и др., 2021; Стороженко и др., 2022; Чеботарев и др., 2022). Предполагается, что такой метод воспроизводства дуба с непрерывным и сокращенным сроком проведения рубок ухода позволит к возрасту главной рубки получить высокобонитетные, чистые по составу дубовые древостои со значительным экономическим эффектом.

В соответствии с предложенной программой работники ТОЛ уже заложили культуры дуба в нескольких кварталах лесничества и осуществляют за ними регулярный уход (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теллермановское опытное лесничество Института лесоведения РАН существует 80 лет.

За это время в нем проведены разнообразные научные исследования, в основе которых – комплексный биогеоценотический подход в процессе длительных наблюдений на постоянных пробных площадях. В первые годы работы стационара была проведена инвентаризация территории: описаны элементы ландшафта, почв, типы растительности, сукцессионных смен и прочего, изучены особенности взаимодействия лесной растительности и почв, водный режим

насаждений, средообразующая роль леса, определены запасы фитомассы, продуктивность биогеоценозов. Позднее исследованы физиологические процессы в стволах и листьях дуба в разных условиях, рост и функционирование корней, динамика численности почвенных безпозвоночных, насекомых-филлофагов, прирост стволовой древесины и восстановление листвы в кронах после дефолиации.

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме изучения механизмов адаптации дубрав к неблагоприятным внешним факторам, в том числе к изменению климатической ситуации и увеличению антропогенной нагрузки на лес. Разработаны научные основы для создания культур дуба черешчатого в лесостепи, учитывающие его формовое разнообразие и результаты лесоводственных экспериментов, заложенных в первые десятилетия существования лесничества. Определение лесохозяйственных аспектов деградации дубовых древостоев позволило разработать практические методы воспроизводства дубрав на вырубках древостоев, смешанных с дубом, посевом желудей с сокращенным периодом рубок ухода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биогеоценологические исследования в дубравах лесостепной зоны* / Под ред. В. Н. Сукачева. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 184 с.
- Боханова Н. С. Надземная фитомасса пойменных дубрав // Лесоведение. 1971. № 2. С. 71–75.
- Вакин А. Т. Фитопатологическое состояние дубрав Теллермановского леса // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1954. Т. 16. С. 50–109.
- Ватковский О. С. Фитомасса солонцовых дубрав // Лесоведение. 1969. № 1. С. 90–94.
- Вихров В. Е. Строение и физико-механические свойства древесины дуба. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 264 с.
- Дубравы лесостепи в биогеоценологическом освещении / Под ред. А. А. Молчанова. М.: Наука, 1975. 374 с.
- Елагин И. Н. Методика изучения процессов формирования годичного кольца у дуба // Физиология древесных растений. К 90-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР Л. А. Иванова. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 262–275.
- Елагин И. Н. Типы леса нагорной части Теллермановского опытного лесничества и их хозяйственное значение // Биогеоценологические исследования в дубравах лесостепной зоны. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 52–98.
- Елагин И. Н., Зворыкина К. В. Древесная и кустарниковая растительность некоторых типов дубового леса // Сообщ. Ин-та леса АН СССР. 1954. Вып. 2. С. 5–29.
- Енькова Е. И. Территориальное размещение рано- и поздне-распускающихся форм черешчатого дуба // Докл. АН СССР. 1950а. Т. 74. № 1. С. 139–142.
- Енькова Е. И. Рост и развитие рано- и поздне-распускающихся форм дуба в географических культурах // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1950б. Т. 3. С. 147–189.
- Енькова Е. И. Влияние температуры воздуха на набухание и раскрытие листовых почек черешчатого дуба *Quercus robur* L. // Науч. зап. ВЛТИ. 1960. Т. 21. С. 71–84.
- Енькова Е. И. Теллермановский лес и его восстановление. Воронеж: ВГУ, 1976. 216 с.
- Жиренко Н. Г. Изучение сокодвижения в стволе дуба черешчатого термoeлектрическим методом // Лесоведение. 1994. № 6. С. 46–52.
- Жиренко Н. Г. Автономная измерительная система для определения водопотребления растениями // Физиол. раст. 2003. Т. 50. № 5. С. 781–784.
- Жосу В. П. Влагообеспеченность снытево-осоковых дубрав лесостепи // Лесоведение. 1988. № 4. С. 17–26.
- Зворыкина К. В., Елагин И. Н. Приуроченность ранней и поздней форм дуба к элементам рельефа // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1965. № 3. С. 287–290.
- Зонн С. В. Геоморфологические и почвенные условия произрастания леса в Теллермановском опытном лесничестве // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1950а. Т. 3. С. 19–65.
- Зонн С. В. Влияние леса на эволюцию солонцов и развитие лесных полей в южной части лесостепи // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1950б. Т. 3. С. 66–74.
- Иванов В. В. Водный режим пойменной и нагорной дубрав южной лесостепи // Лесоведение. 1991. № 5. С. 33–41.
- Иванова Н. Е. Рост дубовых молодняков на темносерых лесных суглинистых почвах нагорных дубрав лесостепи. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 168 с.
- Ильющенко А. Ф., Романовский М. Г. Формирование вторичной кроны дуба и ее роль в динамике состояния древостоев // Лесоведение. 2000. № 3. С. 65–72.
- Каплина Н. Ф. Динамика продуктивности древесных пород в нагорных дубравах под влиянием рубок ухода и массового усыхания дуба // Лесотех. журн. 2018. Т. 8. № 4. С. 88–96.
- Каплина Н. Ф. Цикличность радиального прироста ствола и жизненного состояния дуба черешчатого в нагорной и пойменной дубравах южной лесостепи // Лесоведение. 2022. № 1. С. 21–33.
- Каплина Н. Ф., Селочник Н. Н. Морфология крон и состояние дуба черешчатого в средневозрастных насаждениях лесостепи // Лесоведение. 2009. № 3. С. 32–42.
- Королькова Г. Е. Влияние птиц на численность насекомых-вредителей леса. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 124 с.
- Линдеман Г. В. Деятельность древоядных насекомых (стволовых вредителей и разрушителей древесины) // Дубравы лесостепи в биогеоценологическом освещении. М.: Наука, 1975. С. 218–228.
- Мамаев В. В. Сезонные изменения биомассы молодых поглощающих корней дуба в южной лесостепи // Лесоведение. 2000. № 4. С. 44–50.
- Мамаев В. В., Рубцов В. В., Уткина И. А. Влияние дефолиации крон дуба на ростовую активность поглощающих корней // Лесоведение. 2001. № 5. С. 43–49.
- Мамаев В. В., Рубцов В. В., Уткина И. А. Сезонная динамика роста поглощающих корней при повторяющихся дефолиациях пойменных дубрав // Лесоведение. 2002. № 5. С. 39–43.
- Матвеева А. А. Типы леса поймы р. Хопра в пределах Теллермановского лесного массива // Биогеоценологичес-

- кие исследования в дубравах лесостепной зоны. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 99–124.
- Мина В. Н. Почвенные условия произрастания некоторых дубовых древостоев // Сообщ. Ин-та леса АН СССР. 1954. Вып. 2. С. 30–37.
- Мина В. Н. Круговорот азота и зольных элементов в дубравах лесостепи // Почвоведение. 1955. № 6. С. 32–44.
- Минина Е. Г. Биологические основы цветения и плодоношения дуба // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1954. Т. 17. С. 5–97.
- Молчанов А. А. Гидрологическая роль леса. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 487 с.
- Молчанов А. А. Лес и климат. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 280 с.
- Молчанов А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи. М.: Наука, 1964. 256 с.
- Молчанов А. А. Комплексные исследования в дубравах лесостепи // Взаимоотношения компонентов биогеоценоза в лиственных молодняках. М.: Наука, 1970. С. 32–77.
- Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 276 с.
- Молчанов А. А. Влияние леса на окружающую среду. М.: Наука, 1973. 359 с.
- Молчанов А. А. Воздействие антропогенных факторов на лес. М.: Наука, 1978. 139 с.
- Молчанов А. А., Губарева В. А. Взаимосвязи в лесном биогеоценозе. М.: Наука, 1980. 150 с.
- Молчанов А. Г. Дневная динамика фотосинтеза дуба черешчатого при недостаточной влажности почвы // Лесоведение. 1992. № 1. С. 80–84.
- Молчанов А. Г. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.
- Молчанов А. Г. Интенсивность фотосинтеза фенологических форм дуба черешчатого в условиях недостаточного увлажнения // Лесоведение. 2012. № 4. С. 31–38.
- Молчанов А. Г., Мамаев В. В., Гопиус Ю. А. Фракционный состав фитомассы семян дуба в условиях почвенной засухи // Лесоведение. 1994. № 1. С. 71–76.
- Молчанов А. Г., Молчанова Т. Г. Предрасветный водный потенциал листьев дуба как показатель влагообеспеченности растений // Лесоведение. 2000. № 2. С. 72–74.
- Моравская А. С. Повреждаемость насекомыми рано- и позднораспускающихся форм дуба и ильмовых пород // Сообщения Ин-та леса АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Вып. 8. С. 44–61.
- Моравская А. С. Биология и некоторые закономерности изменения численности зимней пяденицы в Теллермановском лесу // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1960. Т. 48. С. 59–101.
- Моравская А. С. Насекомые-фитофаги дубравных лесов // Дубравы лесостепи в биогеоэкологическом освещении. М.: Наука, 1975. С. 199–217.
- Образцов Б. В. Очерк фауны наземных позвоночных Теллермановского опытного лесничества (Борисоглебский лесной массив) // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1951. Т. 7. С. 80–98.
- Петров А. В., Уткина И. А., Рубцов В. В. Изучение дендрофильных насекомых на стационарах Института лесоведения РАН // Лесохоз. инф. 2019. № 4. С. 32–43.
- Петров А. П. Типы леса Теллермановского лесного массива // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1957. Т. 33. С. 16–58.
- Пушкинская О. Н. Микрофлора почв Теллермановского опытного лесничества // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1953. Т. 12. С. 171–194.
- Романовский М. Г. Теллермановское опытное лесничество – объект фундаментальных биогеоэкологических исследований // Лесн. вестн. 2010а. № 3. С. 26–35.
- Романовский М. Г. Продуктивность гетеротрофов и их роль в формировании НЕР Теллермановского леса (южная лесостепь) // Лесн. вестн. 2010б. № 3. С. 35–46.
- Романовский М. Г., Гопиус Ю. А., Мамаев В. В., Щекалев Р. В. Автотрофное дыхание степных дубрав. Архангельск: Правда Севера, 2008. 92 с.
- Романовский М. Г., Мамаев В. В. Грунтовые воды нагорных дубрав Теллермановского леса // Лесоведение. 2002. № 5. С. 4–9.
- Рубцов В. В., Рубцова Н. Н. Анализ взаимодействия листогрызущих насекомых с дубом. М.: Наука, 1984. 184 с.
- Рубцов В. В., Уткина И. А. Влияние насекомых-филлофагов на прирост древесины дуба черешчатого // Лесоведение. 1995. № 2. С. 22–30.
- Рубцов В. В., Уткина И. А. Адаптационные реакции дуба на дефолиацию. М.: Гриф, 2008. 302 с.
- Рубцов В. В., Уткина И. А. Особенности последней вспышки массового размножения зимней пяденицы в южной лесостепи // Лесн. вестн. 2014. Т. 18. № 6. С. 86–92.
- Рубцов В. В., Уткина И. А., Каплина Н. Ф., Колганихина Г. Б., Молчанов А. Г., Мучник Е. Э., Стороженко В. Г., Чеботарёва В. В., Чеботарёв П. А. Долгосрочные экологические исследования в Теллермановском опытном лесничестве Института лесоведения РАН // Лесохоз. инф. 2019. № 4. С. 98–112.
- Рубцова Н. Н. О термическом режиме ветвей дуба в местах яйцекладки зеленой дубовой листовертки // Лесоведение. 1973. № 1. С. 78–82.
- Рубцова Н. Н. Состояние популяции *Tortrix viridana* L. в дубравах Теллермановского опытного лесничества в 1969–1972 гг. и ее биологическая продуктивность // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974. С. 162–188.
- Рубцова Н. Н. О массовом размножении боярышниковой листовертки в дубравах позднораспускающегося дуба // Экология. 1978. № 3. С. 101–103.
- Рубцова Н. Н. Зеленая дубовая листовертка в древостоях позднораспускающегося дуба // Лесоведение. 1981. № 1. С. 83–88.
- Селочник Н. Н. Лесопатологическое состояние дубрав лесостепи // Лесоведение. 1999. № 1. С. 60–67.
- Селочник Н. Н. Факторы деградации лесных экосистем // Лесоведение. 2008. № 5. С. 52–60.
- Селочник Н. Н. Состояние дубрав Среднерусской лесостепи и их грибные сообщества. М.; СПб.: Нестор-История, 2015. 216 с.
- Смирнов В. В. Ход роста осинового древостоя Теллермановской рощи в типе леса осинник снытево-осоковый // Взаимоотношения компонентов биогеоценоза в лиственных молодняках. М.: Наука, 1970. С. 264–269.
- Состояние дубрав лесостепи / Отв. ред. А. Я. Орлов, В. В. Осипов. М.: Наука, 1989. 230 с.
- Стороженко В. Г., Чеботарёва В. В., Чеботарёв П. А. Состояние древесных пород и воспроизводство дубовых древостоев в зоне лесостепи // Лесохоз. инф. 2018. № 3. С. 51–63.

- Стороженко В. Г., Чеботарёва В. В., Чеботарёв П. А. Формирование структуры дубовых насаждений естественного и искусственного происхождения // Лесохоз. инф. 2019. № 2. С. 46–54.
- Стороженко В. Г., Чеботарева В. В., Чеботарев П. А. Структура древостоев естественного формирования на вырубках дубовых лесов XIX в. (Филиал Теллермановское опытное лесничество ИЛАН РАН) // Лесн. вестн. 2021. Т. 25. № 3. С. 14–23.
- Стороженко В. Г., Чеботарёва В. В., Чеботарёв П. А. Деградация и воспроизводство дубрав лесостепи (результаты экспериментальных исследований). М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2022. 133 с.
- Структура и функционирование почвенного населения дубрав Среднерусской лесостепи / Всеволодова-Перель Т. С., Кудряшева И. В., Грюнталь С. Ю. и др. М.: Наука, 1995. 152 с.
- Уткина И. А., Рубцов В. В. Прорастание почек и регенеративное побегообразование у дуба после дефолиации насекомыми // Лесоведение. 1989. № 3. С. 46–54.
- Уткина И. А., Рубцов В. В. Рефолиация дуба черешчатого после повреждений насекомыми // Лесоведение. 1994. № 3. С. 23–31.
- Уткина И. А., Рубцов В. В. Исследования фенологических форм дуба черешчатого // Лесоведение. 2016. № 6. С. 466–475.
- Уткина И. А., Рубцов В. В. Устойчивость фенологических форм дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) к неблагоприятным внешним факторам // Изв. СПбЛТА. 2017. Вып. 220. С. 200–211.
- Уткина И. А., Рубцов В. В. Дубовая широколинирующая моль – давно известный, но до сих пор мало изученный вид // Изв. СПбЛТА. 2019. Вып. 228. С. 42–57.
- Чеботарёв П. А., Чеботарёва В. А., Стороженко В. Г. Влияние копытных на состояние и рост культур дуба черешчатого в условиях южной лесостепи Европейской России (Теллермановское опытное лесничество ИЛАН РАН) // Лесохоз. инф. 2022. № 4. С. 22–29.
- Чеботарева В. В., Чеботарев П. А., Стороженко В. Г. Инновационный метод интенсивного восстановления дубрав лесостепи // Устойчивое лесопользование. 2021. № 2 (66). С. 13–19.
- Чжан Ши-цзюй. Связь прироста дерева по диаметру с особенностями его кроны как основа для классификации деревьев в лесу (на примере ясеня обыкновенного в Теллермановской нагорной дубраве) // Взаимоотношения компонентов биогеоценоза в лиственных молодняках. М.: Наука, 1970. С. 200–224.
- Шуманов Е. А. К вопросу о болезнях и повреждениях молодого дуба в Борисоглебском лесном массиве // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1954. Т. 16. С. 110–113.
- Экосистемы Теллермановского леса / Отв. ред. В. В. Осипов. М.: Наука, 2004. 340 с.
- Zhirenko N. G. Autonomous system for measuring water consumption in plants // Rus. J. Plant Physiol. 2003. V. 50. Iss. 5. P. 701–703 (Original Rus. Text © 2003, N. G. Zhirenko, publ. in Fiziol. Rast. 2003. V. 50. N. 5. P. 781–784).

TELLERMAN EXPERIMENTAL FORESTRY OF THE INSTITUTE OF FOREST SCIENCE, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES: 80-YEAR POLYGON OF STATIONARY BIOCENOTIC STUDIES

I. A. Utkina, V. V. Rubtsov

*Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences
Sovetskyay Street, 21, Uspenskoe village, Odintsovskiy District, Moscow Oblast,
143030 Russian Federation*

E-mail: UtkinaIA@yandex.ru, VRubtsov@mail.ru

Received 13.03.2024

The Tellerman experimental forestry of the Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, located in the southeast of Voronezh Oblast, has a long history. It was established on the initiative of Academician V. N. Sukachev in 1944 as a place to conduct complex long-term studies in broad-leaved forests on the border between forest-steppe and steppe. For almost 80 years specialists of different profiles worked in the territory of the forest area: foresters, geobotanists, soil scientists, zoologists, microbiologists, entomologists, phytopathologists. Extensive studies were carried out on the hydrology of the massif and water regime of stands, the environment-forming role of the forest, phytomass reserves were determined, productivity of stands in different forest types was determined, and a cycle of silvicultural experiments was established. The comprehensive study of biogeocenoses also included root systems, phenological, geobotanical, zoological, entomological, microbiological and mycological studies. The scientific basis for the establishment of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) crops in the forest-steppe was developed, taking into account its form diversity and the results of silvicultural experiments laid down in the first decades of the forest region's existence. The study of silvicultural aspects of oak stands degradation allowed us to develop practical methods of reproduction of oak forests on clear cuts of stands mixed with oak by sowing acorns with a shortened period of thinning.

Keywords: *forest-steppe, oak forests, long-term studies, restoration of oak forests, Voronezh Oblast.*

How to cite: *Utkina I. A., Rubtsov V. V. Tellerman experimental forestry of the Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences: 80-year polygon of stationary biocenotic studies // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 25–36 (in Russian with English abstract and references).*

УДК 630*182+581.55+582.475

ПОТОКИ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

А. В. Панов¹, А. В. Махныкина^{1,2}, А. В. Урбан¹, В. И. Зырянов¹, Д. А. Полосухина^{1,2},
Е. А. Кукавская¹, В. Е. Арясов¹, Р. А. Колосов¹, И. Р. Путилин¹, П. Д. Третьяков¹,
Д. В. Трусков¹, Р. Т. Садыков¹, А. С. Прокушкин^{1,2}

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

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

Наблюдаемый рост температуры, вызванный увеличением концентраций климатически активных (парниковых) газов в атмосфере, в первую очередь диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄), может быть причиной прогнозируемого высвобождения углерода, аккумулированного за тысячелетия на обширных территориях северных широт. Масштабы и длительность ожидаемого эффекта остаются открытым вопросом, что обусловлено спорадичностью количественных оценок потоков углерода. В работе отражены текущий статус, направления и основные результаты многолетних инструментальных исследований потоков углерода в экосистемах подзоны средней тайги Центральной Сибири, на базе Средне-Енисейского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (обсерватории ZOTTO). Представлена динамика концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере с 2009 по 2020 г. Приведены данные чистого экосистемного обмена CO₂ для лесоболотных комплексов, свидетельствующие, что они выступают поглотителем (стоком) CO₂ атмосферы. Для репрезентативных экосистем дана оценка почвенных эмиссионных потоков CO₂ и сезонный ход фотосинтетической ассимиляции углерода доминантами подчиненного яруса растительности. Выявлены закономерности поведения растворенных форм углерода в водах ручьев, дренирующих олиготрофный и эвтрофный болотные массивы в районе исследований, представлены показатели эмиссии CO₂ с водной поверхности.

Ключевые слова: атмосфера, климат, диоксид углерода, метан, обменные потоки углерода.

DOI: 10.15372/SJFS20240305

ВВЕДЕНИЕ

Выступая масштабным резервуаром наземного углерода (McGuire et al., 2009; Dolman et al., 2012; Hugelius et al., 2014), экосистемы северных широт играют существенную роль в регулировании глобальных и региональных углеродных и гидрологических циклов, газового режима атмосферы и климатических обратных связей (Bonan, 2008). Наблюдаемый рост температуры, вызванный стабильным увеличением концентраций климатически активных (парниковых) газов (ПГ) в атмосфере, среди которых основная роль

отводится диоксиду углерода (CO₂) и метану (CH₄), может выступать потенциальным триггером нестабильности и высвобождения углерода, аккумулированного за тысячелетия в зоне высоких широт (Hayes et al., 2014; Schuur et al., 2015; Romanovsky et al., 2015). Оценки обменных потоков углерода (C) свидетельствуют, что обширные территории арктической зоны являются стоками для CO₂ (200–400 Тг С/год) (Dolman et al., 2012; McGuire et al., 2012; Швиденко, Щепаченко, 2014; Richter-Menge et al., 2019) и источниками для CH₄ (33–46 Тг С/год) (McGuire et al., 2009, 2012). Будут ли современные резервуары

углерода претерпевать изменения при потеплении климата, остается открытым вопросом, что обусловлено спорадичностью количественных оценок баланса углерода в наземных экосистемах высоких широт.

Начало развитию наблюдений углеродно-го обмена в экосистемах Центральной Сибири положено в 1996 г., с проведением первых пилотных измерений чистого экосистемного обмена (ЧЭО) в сосняках среднетаежной подзоны методом турбулентных (микродинамических) пульсаций (ТП) (Schulze et al., 1999). Более детальные исследования энерго- и массообмена в экосистемах запущены в 1998 г. в районе п. Зотино Туруханского р-на Красноярского края в рамках реализации международного проекта «Евросибирские потоки углерода» (Eurosiberian carbonflux) в 1998–2000 гг. (Heimann et al., 2002). На протяжении 3 лет исследования проводились на базе эколого-климатических станций (ЭКС), размещенных в сосняке лишайниковом и торфяном болоте (Arneeth et al., 2002; Schulze et al., 2002; Tchebakova et al., 2002; Lloyd et al., 2002; Shibistova et al., 2002). В 2000 г. в сезонном режиме измерения ЧЭО были дополнительно реализованы на правом берегу р. Енисей, в районе п. Ворогово Туруханского района Красноярского края, с размещением ЭКС в березняке, смешанном насаждении и пихтарнике (Röser et al., 2002). Продолжение исследований в экосистемах соснового леса и торфяного болота было реализовано в рамках международного проекта «Система наблюдения наземного углерода – Сибирь» (TCOS-Siberia) (2002–2004 гг.), после чего, в связи с окончанием международных программ, измерительные системы были демонтированы. Дальнейшее развитие мониторинговых исследований произошло в 2004–2006 гг. с созданием международной обсерватории ZOTTO в подзоне средней тайги и запуском круглогодичных прецизионных измерений динамики ПГ в пограничном слое атмосферы (ПСА) на базе 300-метровой высотной мачты (Winderlich et al., 2010; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018; Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019). Измерения обсерватории охватывают существенный территориальный домен, который более смещен на территорию Западной Сибири из-за характерного для района западного переноса. В период с 2012 по 2015 г. с привлечением международного и российского финансирования в районе обсерватории были размещены три ЭКС для измерений ЧЭО в ключевых экосистемах района исследований методом ТП: в лесоболотных ком-

плексах средней тайги – сосняке лишайниковом и верховом олиготрофном болоте (с 2012 г. по настоящее время) (Park et al., 2021) и среднетаежном пихтарнике Енисейского края (2015–2019 гг.).

Водотоки, дренирующие болотные комплексы Западной Сибири обогащены растворенным органическим углеродом (РОУ) и являются вектором переноса терригенного органического углерода из наземных экосистем в конечный водоем стока – Северный Ледовитый океан (СЛО) (Frey, Smith, 2005). Пресноводные экосистемы характеризуются перенасыщением CO_2 и CH_4 относительно их уровней в атмосфере (Serikova et al., 2018) и представляют собой значимый источник ПГ в атмосферу. По оценкам (Karlsson et al., 2021), ежегодная эмиссия CO_2 с водного зеркала в Западной Сибири составляет до 0.1 Пг С/год при уровне глобальных эмиссий 3.9 Пг С/год (Drake et al., 2018). Годовые показатели эмиссии CO_2 могут превышать экспорт С в форме РОУ более чем в 2 раза (Serikova et al., 2018). Несмотря на подобные оценки, механизмы формирования стока углерода в различных болотных ландшафтах, его трансформация и минерализация в водотоках, и отклик этих процессов на происходящие изменения климата также требуют дальнейших исследований.

Цель настоящей работы: отразить текущий статус, направления и основные результаты многолетних инструментальных исследований потоков углерода в экосистемах подзоны средней тайги Центральной Сибири, на базе Средне-Енисейского стационара ИЛ СО РАН (обсерватории ZOTTO).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современная стратегия количественной оценки углероддепонирующего потенциала (УДП) наземных экосистем, выбросов и поглощения ПГ предполагает комбинацию прямых инструментальных наблюдений потоков углерода (С) между экосистемой и атмосферой, инверсионного и процессного моделирования. В отличие от прямых инструментальных оценок потоков С в отдельных биогеоценозах методом динамических камер или турбулентных (микродинамических) пульсаций (так называемый восходящий режим моделирования, подход – bottom-up), инверсионное (обратное) моделирование выбросов и поглощения ПГ (нисходящий режим моделирования, подход – top-down) основан на использовании данных по газовому составу

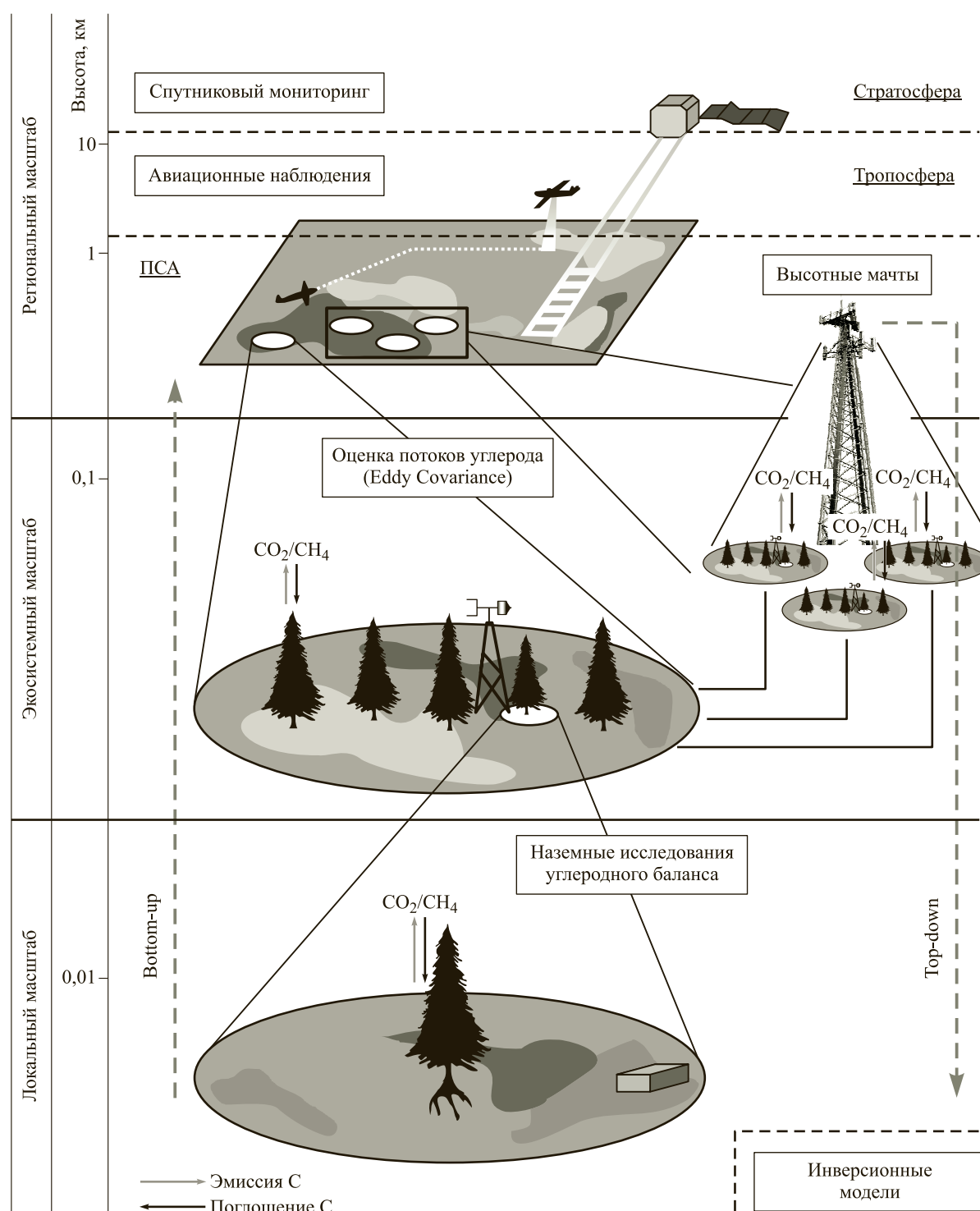


Рис. 1. Стратегия исследований углеродного обмена.

ву атмосферы, полученных на основе сочетания методов дистанционного зондирования Земли и определения содержания ПГ в столбе атмосферы с помощью космических аппаратов (например, GOSAT, GOSAT-2, GHGSat-D/CLAIRE, Метеор-М (Голомолзин и др., 2022; Golomolzin et al., 2022)), авиационных наблюдений и наземных мониторинговых площадок (рис. 1).

В последнем случае мониторинг газового режима на высоте относительно однородной части атмосферы (пограничный слой) осуществляется с использованием высотных мачт, а атмосфера выступает своеобразным интегратором процессов, отражающих текущие компенсационные способности биосферы. Наблюдения на таких мачтах (Winderlich et al., 2010) позволяют по-

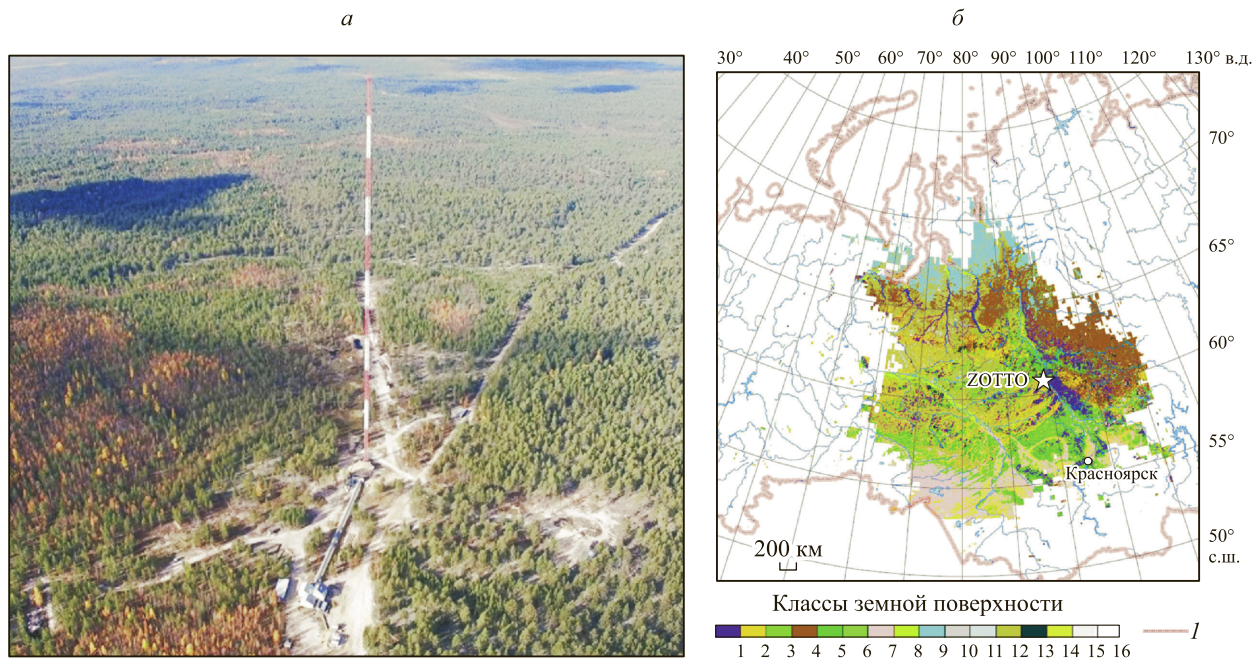


Рис. 2. Обсерватория ZOTTO (а) и пример расчета сезонного футпринта обсерватории (75 %) за 2012 г. (б) с классами подстилающей поверхности, согласно RLC (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019).

лучать сигналы потоков ПГ, интегрированных над значительным территориальным доменом ($> 1000 \text{ км}^2$), и избежать «шума», вызванного суточными колебаниями в экосистемных процессах обмена ПГ с атмосферой, инверсионными процессами накопления углеродсодержащих газов у поверхности земли и пр. Длительные мониторинговые исследования газового режима атмосферы дают возможность оценки вариаций в процессах энерго- и массообмена между атмосферой и наземными экосистемами, вызванных климатическими и антропогенными факторами.

Многолетняя программа мониторинговых исследований углеродного обмена в экосистемах Центральной Сибири, реализуемая в районе Средне-Енисейского опорного экспедиционного пункта (ОЭП) ИЛ СО РАН (обсерватории ZOTTO), предполагает сопряжение восходящей и нисходящей стратегий оценки УДП, что позволяет получить как локальные (биогеоценотические), так и интегрированные (ландшафтные) сигналы потоков углерода. Реализация нисходящего режима моделирования базируется на потенциале высотной (304 м) мачты обсерватории ZOTTO ($60^{\circ}48' \text{ с. ш.}, 89^{\circ}23' \text{ в. д.}$, высота 112 м н. у. м.), расположенной в среднетаежной подзоне Центральной Сибири (Winderlich et al., 2010; Heintzenberg et al., 2011; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018), в 25 км западнее

п. Зотино Туруханского района Красноярского края (рис. 2, а).

Тип климата территории, по Кёппен-Гейгеру, – Dfc, холодный (континентальный), без сухого сезона, холодное лето. Среднегодовая температура воздуха составляет -3.7°C , суммарное годовое количество осадков – 536 мм (метеостанция п. Бор, WMO ID: 23884). Рельеф территории представлен чередованием уплощённых холмов, валов и грив. Геоморфология, литология и климат способствуют значительной заболоченности, составляющей около 60 % территории. Структура растительного покрова определяется мозаикой лесных и болотных биогеоценозов, приуроченных к различным элементам ландшафта (Белов, 1984).

Вместе с тем территориальный домен интегрирования углеродных сигналов атмосферы на базе высотной мачты существенно шире и простирается от южной тайги до лесотундры и тундры. Так, среднегодовая зона охвата измерений (далее футпринт от англ. footprint) обсерватории (рис. 2, б), отражающая степень влияния подстилающей поверхности на регистрируемую динамику ПГ атмосферы, рассчитанная с использованием стохастической инверсионной транспортной модели STILT (Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport) (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019), варьирует в диапазоне от 2.4×10^6 до $4.2 \times 10^6 \text{ км}^2$. 75 % футпринт мачты

составляет 2 190 980 км² (1/68 площади планеты Земля). Область футпринта смещена к западу. Вероятный вклад отдельных категорий земель в суммарную величину футпринта: вечнозеленые хвойные леса – 39 ± 2 %, тундры – 11 ± 3 %, болота – 11 ± 1 %, смешанные леса – 10 ± 1 %, листопадные хвойные леса (лиственничники) – 9 ± 1 % и лиственные леса – 6 ± 2 % (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019).

На базе обсерватории с 2009 г. проводится квазинепрерывный прецизионный мониторинг концентраций CO₂, CH₄ и H₂O в пограничном слое атмосферы (ПСА) по вертикальному градиенту на 6 уровнях мачты (4, 52, 92, 158, 227 и 301 м) посредством газоанализатора EnviroSense 3000i (Picarro Inc., США). Регулярная калибровка инструмента сохраняет точность измерений на уровне, удовлетворяющем требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО). Помимо измерений ПГ атмосферы реализуется комплексная программа метеорологических наблюдений (вертикальный профиль мачты, наземные метеорологические площадки) с помощью широкого спектра метеорологического оборудования, сертифицированного ВМО. Подробное описание приборно-инструментальной базы обсерватории представлено ранее в работах J. Winderlich с соавт. (2010), J. Heintzenberg с соавт. (2011), А. В. Тимохиной с соавт. (2018; Timokhina et al., 2018). Перед аналитическими расчетами на основе алгоритма F. Reum с соавт. (2019) проводится коррекция первичных рядов данных ПГ атмосферы относительно содержания H₂O, при этом применяются калибровочные поправки и корректировки временного дрефта значений (Winderlich et al., 2010; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018).

Восходящий режим наблюдений реализован непосредственно в районе обсерватории ZOTTO на основе прямых инструментальных измерений обменных (ЧЭО), эмиссионных и фотоассимиляционных потоков углерода на эколого-климатических станциях в двух ключевых биогеоценозах территории: сосняк лишайниковый (рис. 3, а) и сосновый рям (рис. 3, б) (Куричева и др., 2023). Футпринты ЭКС, полученные на основе модельных расчетов с помощью Flux Footprint Prediction (Kljun et al., 2015), представлены на рис. 3, в, г.

ЭКС в экосистеме сосняка лишайникового расположена в 900 м к северо-востоку от обсерватории (рис. 3, а, в).

Ландшафт территории автоморфный. Тип почвы – подзол иллювиально-железистый, без

наличия подстилающих многолетнемерзлых пород (Dymov et al., 2022). Состав древостоя – 10С, представленный сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с возрастным диапазоном 80–180 лет.

Густота древостоя составляет 448 ± 88 шт./га, средняя высота – 20 м (Park et al., 2021). В структуре живого напочвенного покрова представлены брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.) (30 %), багульник болотный (*Ledum palustre* L.) (5 %), кладонии звездчатая (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vezda) и оленья (*Cladonia rangiferina* (L.) F. H. Wigg.) (75 %) и плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. Ex Brid.) Mitt.) (10 %).

ЭКС на участке соснового ряма (среднего) расположена в ~ 2 км к северо-востоку от обсерватории ZOTTO (рис. 3, б, г). Ландшафт участка: олиготрофное сфагновое болото, грядово-мочажинный комплекс. Тип почвы – торфяная олиготрофная типичная. Возраст торфа варьирует от 9397 ± 134 года по окрайкам до 13617 ± 190 лет в центральной части болота (Карпенко, Прокушкин, 2018). Глубина торфа характеризуется широким диапазоном – от 1.6 до 5.1 м, с увеличением от краев к центру болота. Состав древостоя – 10С. Древесный ярус представлен болотными формами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* f. *litwinowii*) (Park et al., 2021). Средняя высота деревьев на участке наблюдений – 2.5 м. В структуре живого напочвенного покрова представлены багульник болотный, голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum* L.), хамедафне обыкновенная (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench), сфагновые мхи (*Sphagnum* spp.) (90 %), лишайники рода кладония (*Cladonia* spp.) (5 %).

Приборный комплекс ЭКС состоит из инфракрасных газоанализаторов (ИКГА) закрытого типа LI-7200/7200RS (LI-COR Inc., США), а также обогреваемых ультразвуковых анемометров модели METEK USA-1 (METEK GmbH, Германия), установленных на высоте 30 и 10 м в сосняке лишайниковом и сосновом ряме соответственно (Park et al., 2021; Куричева и др., 2023). Круглогодичные измерения ЧЭО проводятся методом турбулентных пульсаций (Burba, 2013; Куричева и др., 2023). Статистическая обработка первичных данных осуществлялась посредством специализированного программного обеспечения EddyPro® (LI-COR Inc., США) с применением общепринятых методических подходов, изложенных в работе G. Burba (2013).

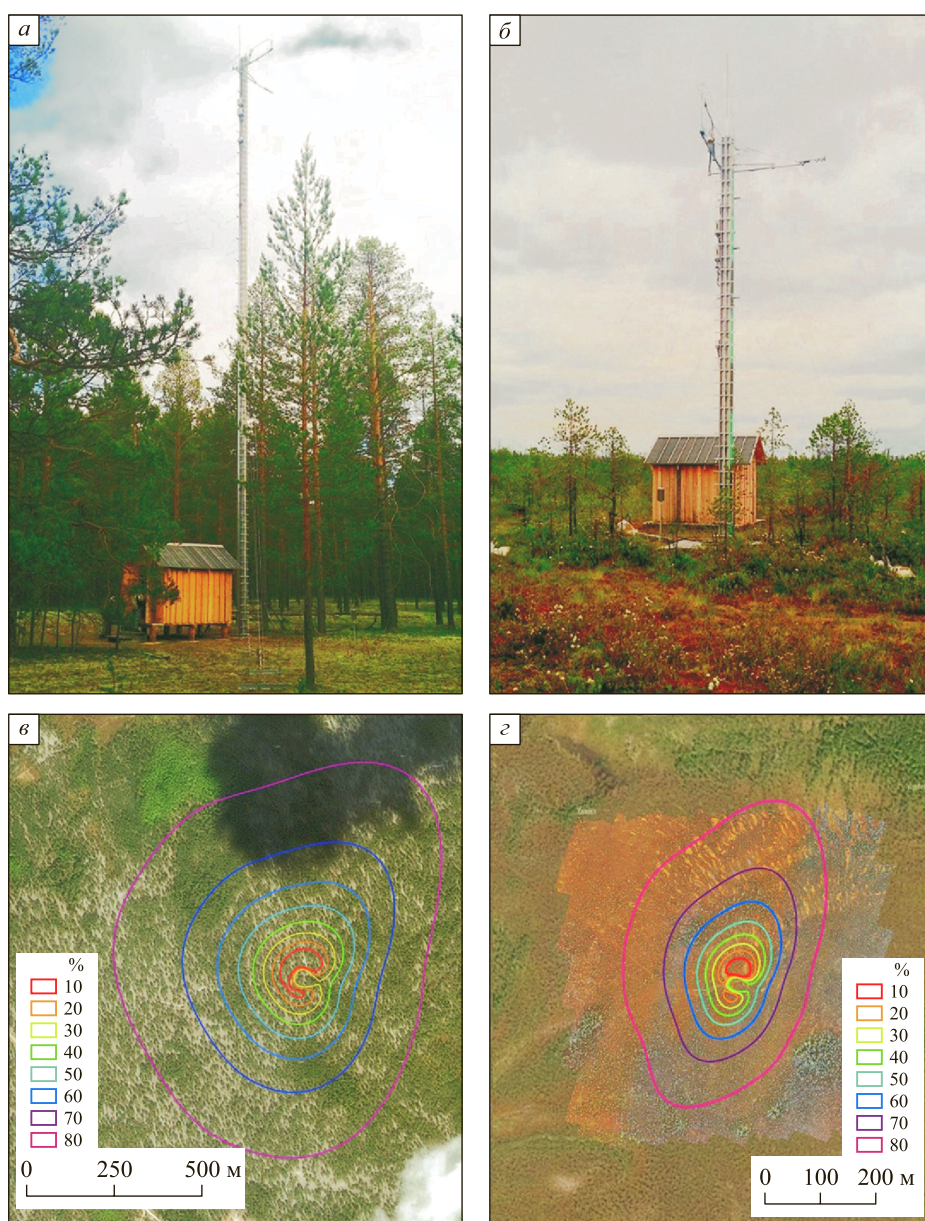


Рис. 3. Эколого-климатические станции (ЭКС) на репрезентативных тестовых участках в сосняке лишайниковом (а) и сосновом рязе (б), с футпринтами (80 %) для данных ЭКС (в, г) соответственно.

Эмиссионные потоки CO_2 с поверхности почвы измеряли при помощи ИКГА-модели LI 8100A (LI-COR Inc., США) с использованием камеры 8100-103 Survey Chamber (LI-COR Inc., США) в дневное время, в период с 11:00 до 16:00. Измерения проводились на регулярной основе с 2012 г., в безморозный период – с июня по сентябрь включительно (Махныкина и др., 2016). В зимний сезон наблюдения носили эпизодический характер. Чистый почвенный обмен CO_2 (Net Soil Exchange; NSE) определяли с 2020 г. с помощью ИКГА-модели LI 8100A (LI-COR Inc., США) и прозрачной камеры (8100-104C Clear Long-Term Chamber). Измерения эмиссионных

потоков CO_2 сопровождалась замерах температуры почвы на глубинах 5, 10 и 15 см с помощью почвенного температурного датчика Soil Temperature Probe Type E (Omega Engineering Inc., США) и объемной влажности почвы на глубине 5 см с использованием влагомера модели Theta Probe Model ML (Delta T Devices Ltd., Великобритания).

Определение показаний фотосинтетической ассимиляции углерода для абсолютных доминантов подчиненного яруса растительности проводилось на участках сосняка зеленомошного (10С), лишайникового (10С) и смешанного леса (5БЗС2Ос + П) как производном

после нарушения (рубки) (Koshurnikova et al., 2015a). Объекты исследования были представлены видами вечнозеленых (брусника обыкновенная, багульник болотный) и листопадных (голубика обыкновенная, черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), водяника черная (*Empetrum nigrum* L.), линнея северная (*Linnaea borealis* L.)) кустарничков, а также перьевыми мхами (плевроциум Шребера, гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), дикранум метловидный (*Dicranum scoparium* (Hedw.)) и лишайниками (кладонии звездчатая и оленья, цетрария исландская (*Cetraria islandica* (L.) Ach.)) (Polosukhina et al., 2020). Фотосинтетическую активность регистрировали с помощью портативной системы газообмена Walz GFS-3000 (Heinz Walz GmbH, Германия) со специализированной кюветой для высших растений и лишайников/мохов модели 3010-V32. Сезонные измерения фотосинтеза для каждого вида проводили параллельно с оценкой влияния абиотических факторов (ФАР, температура воздуха, концентрация CO₂ в атмосферном воздухе) (Polosukhina et al., 2020, 2023).

Для мониторинга латеральных потоков углерода в районе исследований были созданы стационарные посты долговременных наблюдений на водотоках второго порядка – ручьях Развилки и Горбатый, относящихся к бассейну р. Дубчес (левый приток р. Енисей). Ручьи дренируют соответственно преимущественно олиготрофный (грядово-мочажинные комплексы и ямы) и эвтрофный болотные массивы. Пост на руч. Развилки оборудован автоматическими логгерами-регистраторами уровня воды HOBO U20L-04 (Onset Computer Corp., США), удельной электропроводности HOBO U24 (Onset Computer Corp., США), растворенного диоксида углерода GMT222 (Vaisala, Финляндия) и мультипараметрическим зондом модели EXO2 (YSI Corp., США) с сенсорами флуоресцентного органического вещества (fDOM), pH, ОВП и УЭП. Регулярный отбор проб осуществляется также на р. Хойба (река четвертого порядка).

На стационарных постах регулярный отбор воды руслового стока осуществлялся с 2012 г. в период открытой воды (май – сентябрь) каждые 3–10 дней и ежемесячно в зимний (октябрь – апрель) период. Образцы воды фильтровались непосредственно после отбора (GF/F, Whatman) и хранились при 2 °C до проведения лабораторных анализов. Содержание РОУ и РНУ определялось с помощью анализатора TOC vario cube (Elementar, Германия). Спектраль-

ные (например, SUVA) свойства растворенного органического углерода получены с помощью УФ-вид спектрофотометра Cary 100 (Agilent, США). Эмиссионные потоки CO₂ измерялись методом плавающей камеры высотой 10 см, оборудованной ИК-сенсором GMT222 (Vaisala, Финляндия), помещенным в насос GM70PUMP (Vaisala, Финляндия) (Serikova et al., 2018), параллельно с отбором проб воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика концентрации климатически активных газов. Концентрация CO₂ в ПСА в районе обсерватории ZOTTO за многолетний период наблюдений (2009–2020 гг.) демонстрирует сезонный ход с минимальными значениями в летние периоды и максимумами зимой (рис. 4, а).

Снижение уровня атмосферного CO₂ начинается в апреле, что обусловлено запуском процессов фотосинтеза в более южных районах зоны охвата высотной мачты и достигает минимальных значений в конце июля – начале августа, периоде наибольшей вегетационной активности наземных экосистем на территории всей области футпринта.

В сравнении с более северными территориями бассейна р. Енисей (эстуарная зона) в период с 2019 по 2020 г. летний минимум CO₂ в среднетаежной подзоне, с учетом влияния и более южных областей футпринта, достигает ~ 45 дней, с первых чисел июля до середины августа (рис. 4, в), тогда как в при одноклиматических условиях полярного пояса Сибири он не превышает ~ 10 дней и сдвинут на более поздние сроки (первая декада июля), что обусловлено существенной разницей физиологической активности растительного покрова и в продолжительности периодов вегетации (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022a, b). С августа в районе обсерватории ZOTTO отмечается возрастание доли вклада эмиссионного потока и его превалирование над процессами фотосинтетической ассимиляции углерода атмосферы растительным покровом, что приводит к росту содержания CO₂. Пиковых значений концентрация диоксида углерода в атмосфере достигает в декабре-январе. При этом весь период наблюдений характеризуется устойчивым приростом концентрации атмосферного CO₂ на уровне 2.5 млн⁻¹/год (~ 0.6 % в год от глобального уровня в атмосфере).

В отличие от CO₂, сезонный ход CH₄ в районе исследований (рис. 4, б) менее выражен, но в

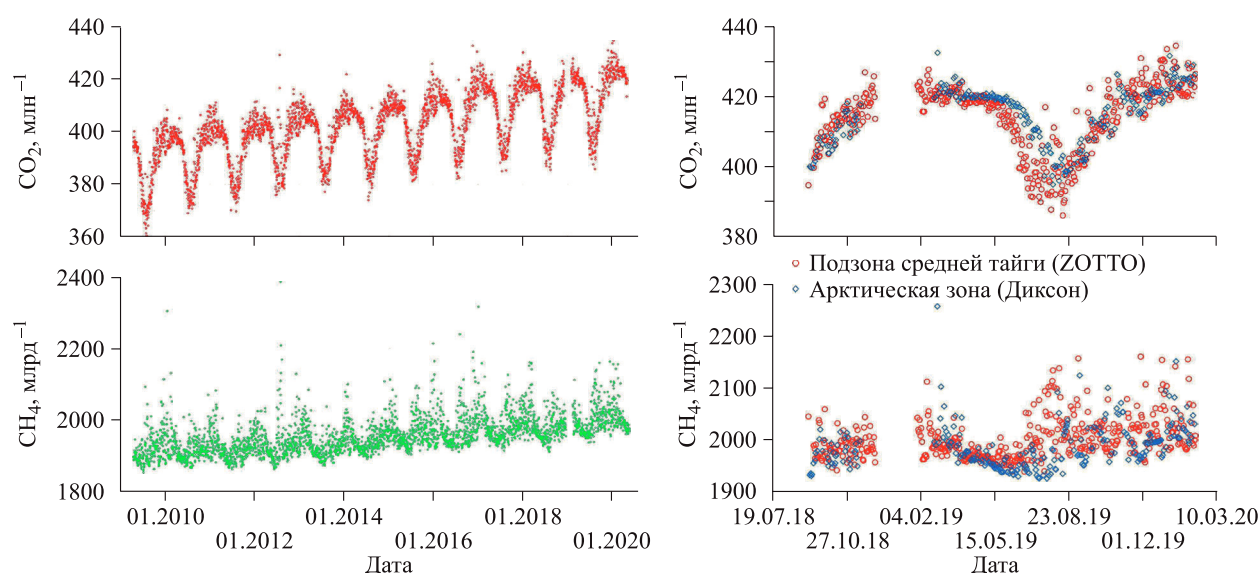


Рис. 4. Сезонный ход концентрации CO₂ (а) и CH₄ (б) в атмосфере среднетаежной подзоны Центральной Сибири за 10-летний период измерений (04.2009–04.2020 гг.) и сравнение сезонной динамики концентрации CO₂ (в) и CH₄ (г) в подзоне средней тайги (обсерватория ZOTTO) и эстуарной зоне р. Енисей (ст. DIAMIS, г. п. Диксон (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022a, b)) за период 09.2018–02.2020 гг.

нем прослеживаются два максимума – в летний (август) и зимний (январь-февраль) периоды (Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018). Концентрация метана летом увеличивается с середины июня вместе с прогреванием почвы, что обуславливает возрастание активности метаногенных микроорганизмов, и достигает максимальных значений в августе в связи с активными процессами выделения CH₄ болотными экосистемами Западной Сибири. Это подтверждается и сравнением летних значений мольных фракций метана в атмосфере средней полосы Центральной Сибири с эстуарной зоной р. Енисей в 2019–2020 гг. (рис. 4, г), которое демонстрирует более выраженный летний минимум CH₄ в природно-климатических условиях полярного пояса (~1902 млрд⁻¹), тогда как в атмосфере района исследований (обсерватория ZOTTO) минимальный уровень метана выше (~1940 млрд⁻¹/год) (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022a), что обусловлено его эмиссией из болотных экосистем. Вместе с тем среднегодовой уровень CH₄ в районе исследований ниже в сравнении с районами Западной Сибири, что связано со снижением площади заболоченных территорий в направлении с запада на восток (Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018). С середины осени (октябрь) сезонный ход CH₄ в районе исследований демонстрирует рост его концентрации вплоть до достижения максимальных значений в январе-феврале. За период наблюдений отмечен прирост содержания метана в атмосфере на

уровне 9 млрд⁻¹/год (~ 0.4 % в год от глобального уровня в атмосфере). Следует также отметить, что на базе обсерватории ZOTTO проводятся работы по сопоставлению данных газового режима атмосферы с продуктами спутникового мониторинга гелиогеофизического назначения (данные отечественного космического аппарата «Метеор-М» № 2) для валидации оценок общего содержания CO₂ над территорией РФ (Голомолзин и др., 2022; Golomolzin et al., 2022).

Обменные потоки CO₂ в экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири. Ретроспективные оценки показателей нетто-обмена CO₂ в ключевых экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири, полученные в ходе измерений на ЭКС с 1996 по 2004 г., представлены в таблице. В целом все биогеоценозы подзоны средней тайги в течение вегетационного сезона (апрель – сентябрь) выступали стоком атмосферного диоксида углерода, варьируя от 29 до 269.9 г C/(м² · сезон) (см. таблицу).

Актуализированные значения ЧЭО, полученные в период наблюдений с 2012 по 2022 г., по данным функционирующих в районе исследований ЭКС, также свидетельствуют, что экосистемы выступали в качестве стока атмосферного CO₂ (пределы варьирования: 86–253 г C/(м² · сезон)).

Вместе с тем показатели поглощения CO₂ биогеоценозами характеризуются существенной межгодовой изменчивостью, обусловленной динамикой метеоклиматических условий.

Чистый экосистемный обмен CO_2 в экосистемах Средней Сибири за период инструментальных наблюдений 1996–2004 гг.

Биогеоценоз	Координаты, с. ш. / в. д.	Годы	ЧЭО, г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сезон})$	Источник
Березняк	61°01' / 89°34'	2000	–247	Röser et al., 2002
Смешанный лес	61°01' / 89°34'	2000	–99.7	Röser et al., 2002
Пихтарник	61°01' / 89°34'	2000	–269.9	Röser et al., 2002
Сосняк лишайниковый	60°44' / 89°09'	1996–1997	–168.0	Schulze et al., 1999
Сфагновое болото	–	1996–1997	–60.0	Schulze et al., 1999
Сосняк лишайниковый (200 лет)	60°45' / 89°23'	1999–2000	–145.2 ... –163.2	Lloyd et al., 2002
Сфагновое болото	60°45' / 89°23'	1998–2000	–52.0 ... –62.6 –29.0 (год)	Arneeth et al., 2002; Чебакова и др., 2014

За период круглогодичных измерений с 2013 по 2022 г. сосняк лишайниковый был источником диоксида углерода в зимнее время ($\sim 0.24 \dots 0.26$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) и стоком CO_2 атмосферы в безморозный период года ($-1.32 \dots -1.50$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$). Переход экосистемы из источника CO_2 атмосферы в его сток отмечался, как правило, во второй декаде мая, обратный переход – в конце сентября – первой декаде октября. На протяжении вегетационного периода скорость ЧЭО в экосистеме возрастала пропорционально росту температуры воздуха, с достижением пиковых значений ($-3.4 \dots -3.9$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) в конце июня – начале июля.

На участке соснового рьяма за период круглогодичных наблюдений с 2013 по 2022 г. среднесуточное значение ЧЭО в холодное время года (октябрь – третья декада апреля) достигало $\sim 0.36\text{--}0.40$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Переход экосистемы из состояния источника CO_2 в атмосферу к его поглощению наблюдался в конце мая (~ 10 дней позднее участка в сосновом лесу), обратный переход происходил в третьей декаде сентября – начале октября. В период вегетационного сезона среднее значение суточного нетто-обмена составляло $-1.2 \dots -1.6$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Максимальные значения ($-2.8 \dots -3.2$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) отмечались в конце июня – начале июля.

Сезонные показатели фотоассимиляционных потоков в экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири. Фотосинтетическая активность кустарничкового яруса растительности находится в пределах $130\text{--}380$ мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. При этом прослеживается четкий сезонный ход с максимумом в июле, а наибольший вклад вносят листопадные кустарнички – голубика обыкновенная (35 %) и багульник болотный (27 %). Сезонная фотоассимиляция CO_2 у голубики обыкновенной изменяется от 42.8 ± 0.3 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (25 % от

суммарной величины) в июне до 59.4 ± 0.8 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (46 %) в августе, а у багульника болотного варьирует от 59.7 ± 0.9 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (34 %) в июне до 30.3 ± 1.0 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (23 %) в августе.

В сосняках поглощение атмосферного CO_2 в моховых синузиях в течение вегетационного сезона варьирует в дневные часы от 140 до 180 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (рис. 5, а). Доминирующую роль по количеству поглощаемого атмосферного CO_2 играет мох плевроциум Шребера. Фотоассимиляционный поток CO_2 на его синузиях может варьировать от 89.1 ± 0.1 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (61 % от суммарной величины) в июне до 99.1 ± 0.1 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (55 %) в августе (рис. 5, а).

Поглощение CO_2 атмосферы в лишайниковых синузиях существенно ниже, что, вероятно, обусловлено меньшим содержанием фотосинтетических пигментов в талломах лишайников (в 4–10 раз) по сравнению с высшими растениями, однако сезонная динамика поглотительной способности более выражена: от 40 до 70 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ в июне и августе соответственно (рис. 5, б).

За исключением начала вегетационного сезона (июнь), кладония звездчатая вносит наибольший вклад в фотоассимиляцию CO_2 лишайниковым покровом (рис. 5, б), варьируя в диапазоне от 12.2 ± 0.2 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (31 %) в июне до 33.4 ± 0.2 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ в августе (46 %).

Эмиссионные потоки CO_2 в экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири. Годовой ход почвенной эмиссии CO_2 на исследованных тестовых участках в экосистемах средней тайги имеет, как правило, типичный для биогеоценозов бореальной зоны вид. Низкие скорости наблюдаются в зимний период, максимальные потоки приходятся на конец июля – начало августа, что в большинстве случаев обусловлено ходом температуры почвы и ее

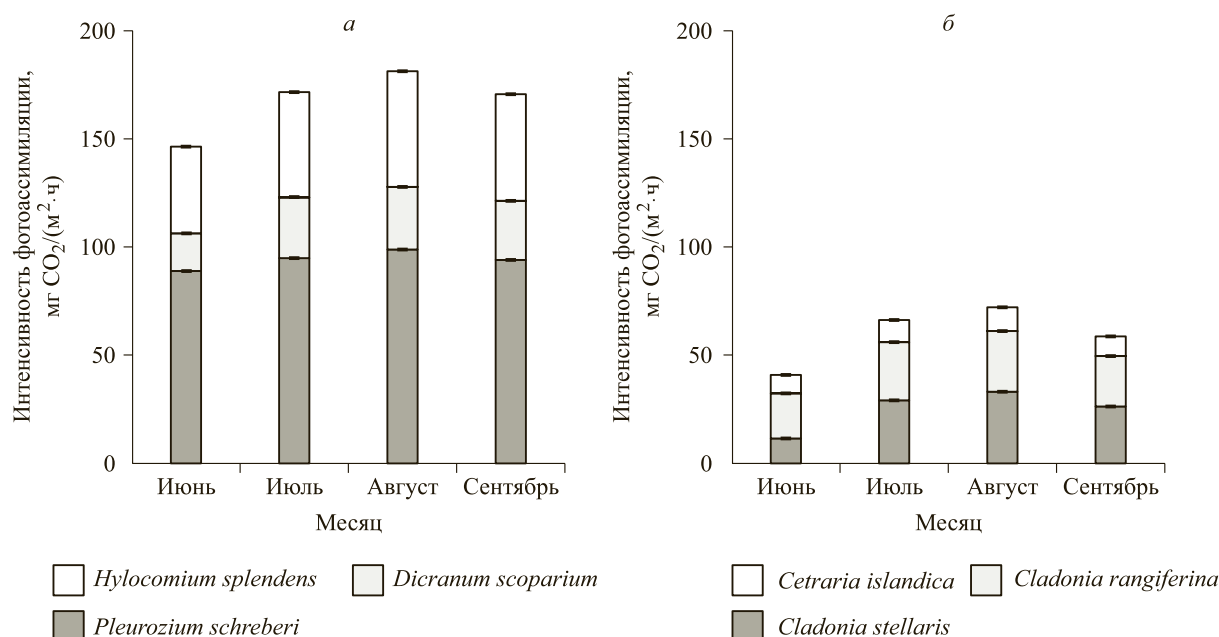


Рис. 5. Сезонная динамика фотосинтетической активности на примере доминантов мхов (а) и лишайников (б) в сосняках среднетаежной подзоны.

влиянием на активность авто- и гетеротрофного звена биогеоценозов. Согласно полученным оценкам (Панов и др. 2021; Panov et al., 2021), зимние потоки для ключевых биогеоценозов в районе исследований в среднем составляют 0.9 ± 0.4 $\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, варьируя от 0.6 до 1.2 $\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Максимальные потоки — в зимний сезон наблюдались в сосняке зеленомошном, минимальные — в сосново-березовом насаждении разнотравного типа леса. Исходя из ранее полученных результатов (Shibistova et al., 2002), в период схода снега (первая декада мая) эмиссия CO_2 с поверхности почвы в среднем может повышаться еще на 0.5 $\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Основные динамические изменения интенсивности почвенной эмиссии приходятся на безморозный период. Установлено, что лесорастительные условия и нарушенность территории оказывают существенное влияние на эмиссионный поток CO_2 с поверхности почвы (рис. 6). Так, на нарушенном участке вариации сезонного хода почвенной эмиссии минимальны (1.1 ± 0.1 $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), а абсолютные значения в среднем в 8 раз ниже, чем на лесопокрываемых участках (Махныкина и др., 2020; Makhnykina et al., 2020). Среди лесных участков минимальными величинами усредненного за сезон эмиссионного потока CO_2 характеризовались площадки в сосняке лишайниковом и зеленомошном, составляя 3.0 ± 1.7 и 3.7 ± 1.6 $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, соответственно. Максимальные потоки CO_2 с поверхности почвы отмечены на те-

стовом участке в смешанном лесу, где средние потоки CO_2 за сезон значимо ($P < 0.01$) отличались от других участков наблюдений и достигали 7.0 ± 1.2 $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Установлено, что условия увлажнения оказывают существенное влияние на кумулятивный эмиссионный поток CO_2 за сезон, а влияние типа леса проявлялось только во влажные годы. Так, в засушливый сезон наблюдался спад эмиссионного потока CO_2 в среднем на 35–42 % в сравнении с сезонами, характеризующимися достаточным количеством осадков. Для сосняка лишайникового отмечено, что сильные дожди могут обуславливать резкие спорадические всплески CO_2 в атмосферу, что, в зависимости от погодных условий конкретного сезона, может вносить существенный (до 40 %) вклад в кумулятивный эмиссионный поток с поверхности почвы (Makhnykina et al., 2024).

Насаждения в районе исследований характеризуются значительной нарушенностью пожарами и рубками (Koshurnikova et al., 2015b), а преобладающие сосняки лишайниковой и зеленомошной групп типов леса характеризуются высокой природной пожарной опасностью (Иванова, Иванов, 2015). Для оценки трансформации компонентов углеродного обмена после нарушений проведено исследование интенсивности эмиссионного потока CO_2 с поверхности почвы на участках в сосняке лишайниковом на разных стадиях послепожарной сукцессии (рис. 7).

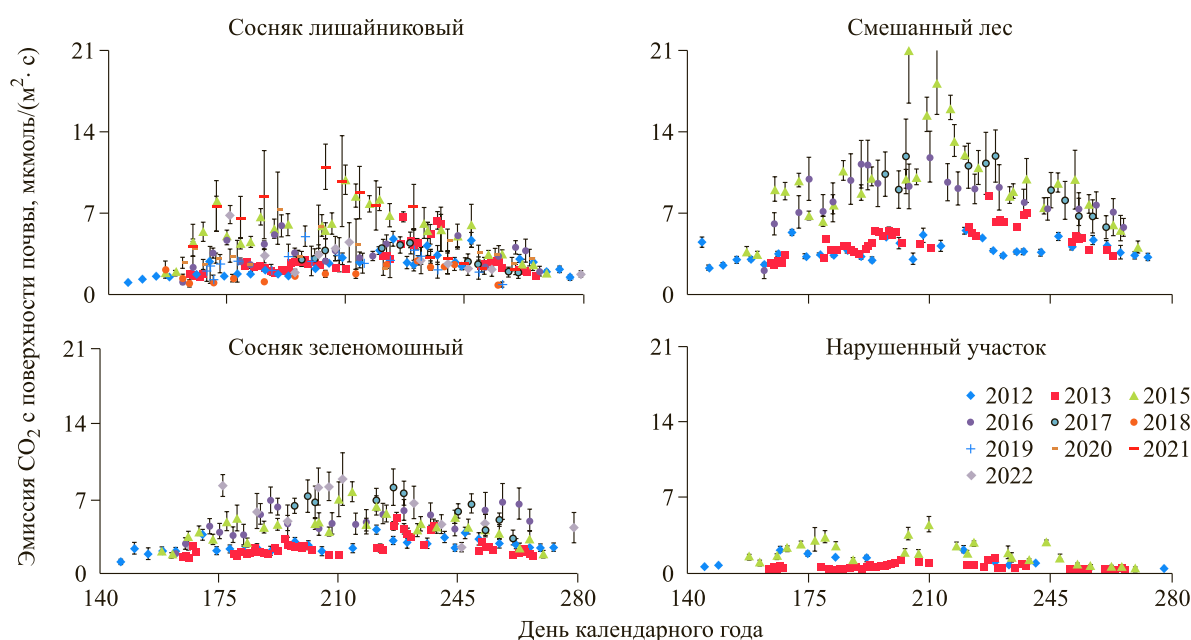


Рис. 6. Сезонный ход эмиссионного потока CO_2 с поверхности почвы в различных типах леса и на нарушенном участке в среднетаежной подзоне Центральной Сибири за период инструментальных измерений (2013–2022 гг.). Приведены средние значения со стандартными ошибками ($n = 5$).

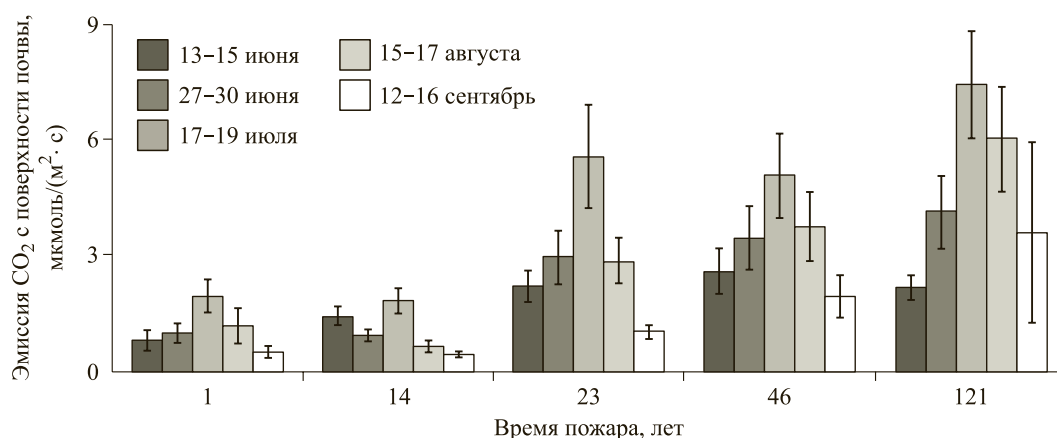


Рис. 7. Сезонный ход эмиссионного потока CO_2 с поверхности почвы в сосняке лишайниковом среднетаежной подзоны Центральной Сибири на разных стадиях послепожарной сукцессии.

Установлено, что на свежей гари эмиссионный поток был в 4 раза ниже в сравнении с ненарушенным насаждением (Makhnykina et al., 2023). При этом наблюдаемые значения потока на гари (до 15 лет после пожара) были сопоставимы с показателями эмиссии CO_2 на участке после сплошной рубки (7 лет после рубки), разница между ними не превышала 5–10 %. Спустя ~ 20 лет после пожара наблюдается восстановление скорости эмиссионного потока, до значений, характерных для ненарушенных сосновых насаждений. Отмечено, что ключевым абиотическим фактором, определяющим почвенную эмиссию CO_2 , выступала температура почвы,

а на ранних стадиях послепожарного восстановления – влажность почвы.

Для уточнения роли параметров климата и лесорастительных условий в трансформации баланса углерода нарушенных экосистем с 2022 г. в сосняке лишайниковом на четырех участках, характеризующихся различной степенью нарушения (ненарушенное насаждение; насаждение, пройденное пожаром; вырубка; вырубка, пройденная пожаром), размещены системы круглогодичного автоматического мониторинга метеорологических условий и проводятся сезонные измерения эмиссионных потоков CO_2 (рис. 8).

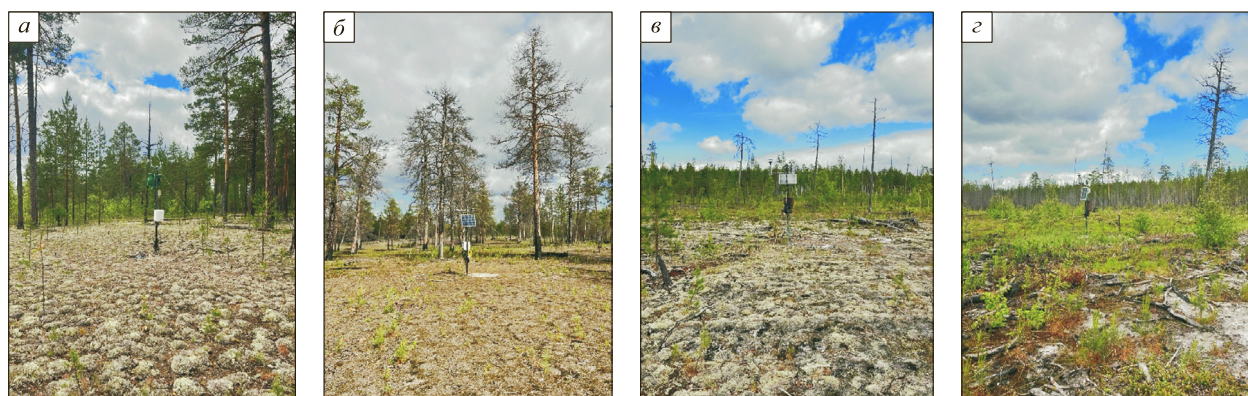


Рис. 8. Системы круглогодичного автоматического мониторинга метеорологических условий в ненарушенном насаждении (а), насаждении, пройденном пожаром (б), вырубке (в), вырубке, пройденной пожаром (з).

Кроме того, мониторинговые системы установлены на трех участках в чистых сосновых молодняках разной густоты, сформировавшихся на вырубке.

Мониторинг латеральных потоков углерода в районе исследований. На основе многолетнего мониторинга вод выявлены общие закономерности поведения растворенных форм углерода в водах ручьев, дренирующих преимущественно олиготрофный (грядово-мочажинные комплексы и рямы) и эвтрофный болотные массивы. На примере руч. Развилки показана среднесезонная (2012–2022 гг.) динамика концентраций растворенного органического углерода (РОУ) и растворенного неорганического углерода РНУ: минимальные значения РОУ характерны для зимней межени (около 3 мг С/л) и максимальные – периодам весеннего половодья (май–июнь) и при повышенном стоке в сентябре (около 13 мг С/л) (рис. 9).

Обратная закономерность характерна поведению РНУ при варьировании от 1.5 до 4.5 мг С/л. Среднегодовое значение этих форм углерода в руч. Развилки составило 12.6 и 0.6 мг С/л соответственно. Ручей Горбатый, дренирующий эвтрофный болотный массив, характеризуется более низкими концентрациями РОУ (среднегодовое значение 8.8 мг С/л) и повышенными уровнями РНУ (7.6 мг С/л). Степень ароматизации в сравниваемых ручьях также отлична: руч. Развилки характеризуется значениями $SUVA\ 3.91 \pm 0.35$, а руч. Горбатый – $2.69 \pm 0.16\ л/(м \cdot мг\ С)$. Данный факт свидетельствует о значительно более высокой доле аллохтонного (терригенного) углерода, поступающего из олиготрофных болот, и, наоборот, преобладание автохтонного органического вещества в стоке ручьев, дренирующих болота эвтрофного ряда.

Более детальная картина временной изменчивости концентраций растворенных форм угле-

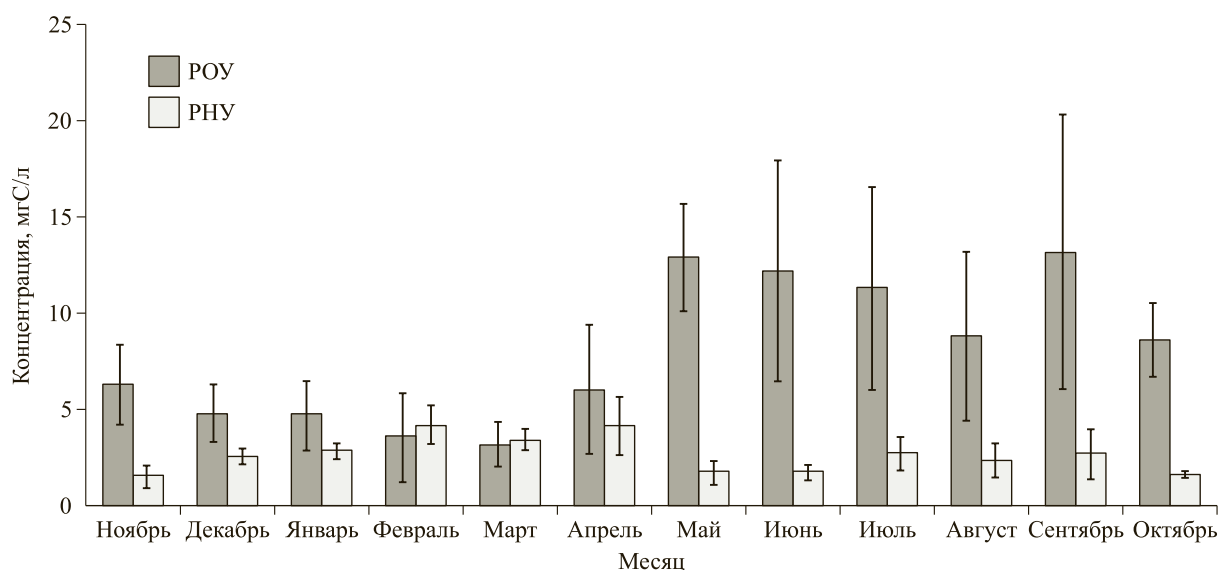


Рис. 9. Среднемесячные концентрации РОУ и РНУ в водах руч. Развилки за 2012–2022 гг.

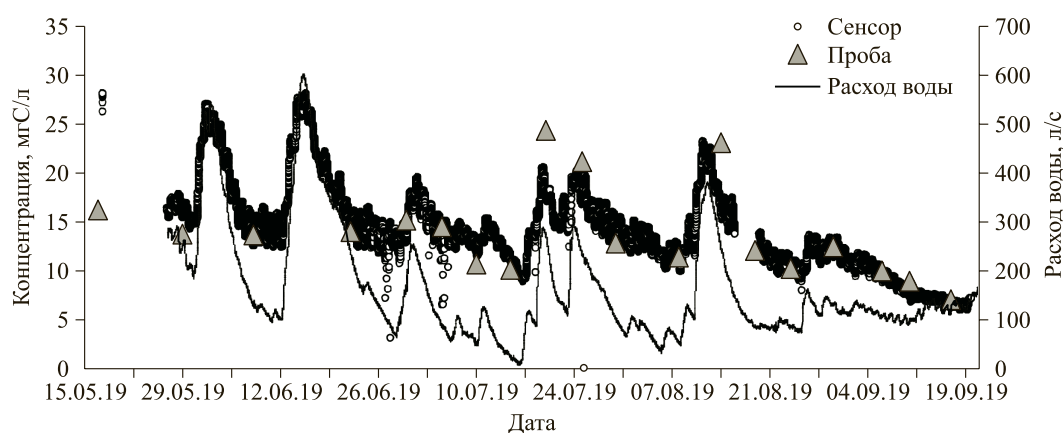


Рис. 10. Расход воды и концентрации РОУ в руч. Развилки, полученные с 10-минутным интервалом с помощью сенсора fDOM EXO2, и измеренные в пробах, отобранных с частотой в 5–7 дней (на примере 2019 г.).

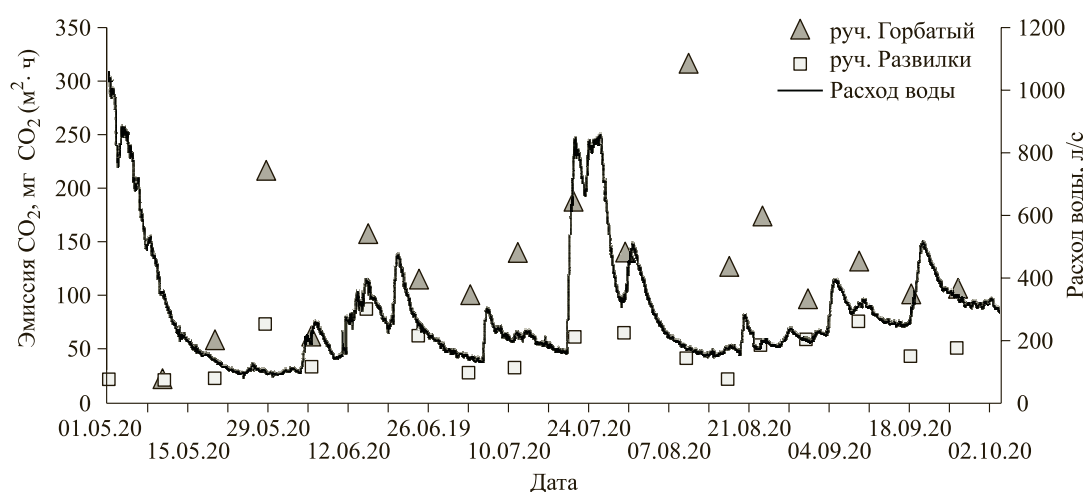


Рис. 11. Расходы воды и эмиссии CO_2 с водной поверхности ручьев Развилки и Горбатый в 2020 г., полученные с помощью плавающей камеры.

рода и эмиссий CO_2 с водной поверхности может быть получена с помощью автоматических регистраторов. В период открытой воды концентрация РОУ (сенсор fDOM зонда EXO2) характеризуется существенными флуктуациями (10–27 мг C/л) с достаточно тесной корреляцией ($R = 0.75$, $p < 0.05$) с расходами воды ручья (рис. 10).

Эмиссионные потоки CO_2 с поверхности водного зеркала варьируют в руч. Развилки в пределах 200–860 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, а в руч. Горбатый – от 215 до 3100 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (рис. 11).

Повышенные эмиссии CO_2 , как правило, отмечены при паводковых режимах в летний период. В весеннее половодье, несмотря на значительные концентрации РОУ и высокие значения расходов воды, эмиссии CO_2 относительно низки и не превышают 200 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Следует подчеркнуть, что ручьи, дренирующие преимущественно олиготрофные болотные мас-

сивы (грядово-мочажинные комплексы и рямы), характеризуются близкими или меньшими уровнями эмиссий по сравнению с сосновыми и болотными экосистемами их водосборных бассейнов (2–6 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

Для ручья, дренирующего эвтрофный болотный массив, эмиссионный поток соответствует почвенным эмиссиям в смешанных лесах (2–20 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) с большей продуктивностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует целый ряд документальных свидетельств происходящих изменений баланса углерода и трансформации природной среды на климатически уязвимых территориях высоких широт. Из всех лесных регионов планеты наибольшие изменения ожидаются в бореальных (северных) районах Евразии – здесь они про-

являются в первую очередь и с наибольшими амплитудами, затрагивая целый спектр природных объектов и сред в системе «атмосфера – растительность – почва – гидросфера». Газовый состав атмосферы в данной связке особенно информативен, выступая своеобразным интегратором процессов, определяющих текущие компенсационные способности биосферы. Именно на изучение динамики атмосферы и ее неразрывной связи с наземными природными и водными объектами и климатом направлены работы уникальной мониторинговой платформы – обсерватории ZOTTO (Средне-Енисейского ОЭП ИЛ СО РАН). Многие годы обсерватория служит мультидисциплинарной научной площадкой для реализации широкого спектра мониторинговых и экспериментальных исследований окружающей среды и ее динамики.

В ходе многолетних квазинепрерывных исследований на базе обсерватории установлено, что в фоновых природно-климатических условиях Центральной Сибири наблюдается ежегодный прирост концентрации CO_2 на уровне $2.5 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ ($\sim 0.6 \%$ в год от глобального уровня в атмосфере) и $\text{CH}_4 - 9 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ ($\sim 0.4 \%$ в год соответственно), что в целом соответствует общемировому тренду увеличения ПГ в атмосфере. Анализ нетто-обмена CO_2 между ключевыми биогеоценозами подзоны средней тайги и атмосферой свидетельствует, что биогеоценозы, как правило, выступают в качестве стока (поглотителя) атмосферного CO_2 . Вместе с тем поглощение CO_2 биогеоценозами характеризуется значительной межгодовой изменчивостью, обусловленной динамикой метеоклиматических условий. При этом отмечен существенный вклад фотосинтетической ассимиляции подчиненных ярусов растительности в поглощение CO_2 .

Итоги многолетнего мониторинга эмиссии CO_2 с поверхности почвы на лесных участках свидетельствуют, что наименьшими показателями эмиссии характеризуются сосняки лишайниковые и зеленомошные, а максимальными – смешанный лес. Вместе с тем лесорастительные условия и степень нарушенности территории оказывают существенное влияние на почвенный эмиссионный поток CO_2 в атмосферу.

По результатам оценки латеральных потоков С в районе исследований, отмечена значительно более высокая доля аллохтонного (терригенного) углерода, поступающего из олиготрофных болот, а в стоке ручьев, дренирующих болота эвтрофного ряда, выявлено преобладание автохтонного органического вещества.

Продолжение и дальнейшее развитие исследований на базе обсерватории позволит отследить динамику разнонаправленных изменений углероддепонирующего потенциала наземных экосистем, дать прогнозные оценки отклика УДП на флуктуации погодных условий, структурно-функциональное состояние растительного покрова и изменения параметров окружающей среды применительно к физико-географическим, растительным и климатическим условиям Сибири.

Исследования на базе обсерватории ZOTTO (Средне-Енисейского ОЭП ИЛ СО РАН) выполнены в рамках проектов государственного задания № FWES-2024-0040 и № FWES-2024-0023, финансовой поддержки Общества Макса Планка (Германия) и реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Исследования газового режима атмосферы на станции DIAMIS (г. п. Диксон) в эстуарной зоне р. Енисей выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 24-27-20064.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А. В. Растительность Западной Сибири и ее картографирование. М.: Наука, 1984. 121 с.
- Голомолзин В. В., Рублев А. Н., Киселева Ю. В., Козлов Д. А., Прокушкин А. С., Панов А. В. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата «Метеор-М» № 2 // Метеорол. и гидрол. 2022. № 4. С. 79–95.
- Иванова Г. А., Иванов А. В. Пожары в сосновых лесах Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 2015. 240 с.
- Карпенко Л. В., Прокушкин А. С. Генезис и история послеледникового развития лесного болота в долине р. Дубчес // Сиб. лесн. журн. 2018. № 5. С. 33–44.
- Куричева О. А., Авиллов В. К., Варлагин А. В., Гитарский М. Л., Дмитриченко А. А., Дюкарев Е. А., Загирова С. В., Замолодчиков Д. Г., Зырянов В. И., Карелин Д. В., Карсанаев С. В., Курганова И. Н., Лапина Е. Д., Максимов А. П., Максимов Т. Х., Мамкин В. В., Марунин А. С., Мигловец М. Н., Михайлов О. А., Панов А. В., Прокушкин А. С., Сиденко Н. В., Шилкин А. В., Курбатова Ю. А. Мониторинг экосис-

- темных потоков парниковых газов на территории России: сеть RUFLUX // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 4. С. 512–535.
- Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Ваганов Е. А., Верховец С. В., Рубцов А. В. Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журн. СФУ. Сер. «Биол.» 2016. Т. 9. № 3. С. 338–357.
- Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Меняйло О. В., Верховец С. В., Тычков И. И., Урбан А. В., Рубцов А. В., Кошурникова Н. Н., Ваганов Е. А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO₂ из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. 2020. № 1. С. 48–58.
- Панов А. В., Прокушкин А. С., Зражевская Г. К., Урбан А. В., Зырянов В. И., Сиденко Н. В., Хайманн М. Зимнее почвенное дыхание в экосистемах Средней Сибири: сравнительные оценки с использованием трех методов измерений // Экология. 2021. № 2. С. 112–122.
- Панов А. В., Прокушкин А. С., Кюблер К., Корец М. А., Урбан А. В., Зражевская Г. К., Бондарь М. Г., Хайманн М., Заале З. Прецизионный мониторинг концентрации диоксида углерода и метана в приземной атмосфере полярного пояса Приенисейской Сибири // Метеорол. и гидрол. 2022. № 11. С. 19–31.
- Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Панов А. В., Колосов Р. А., Сиденко Н. В., Лаврич Й., Хайманн М. Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009–2015 гг.) // Метеорол. и гидрол. 2018. № 5. С. 20–29.
- Урбан А. В., Прокушкин А. С., Корец М. А., Панов А. В., Гербиг К., Хайманн М. Влияние подстилающей поверхности на концентрации парниковых газов в Центральной Сибири // Геогр. природ. рес. 2019. № 3. С. 32–40.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Чебакова Н. М., Выгодская Н. Н., Арнет А., Белелли Маркезини Л., Курбатова Ю. А., Парфенова Е. И., Валентини Р., Верховец С. В., Ваганов Е. А., Шульце Е.-Д. Энерго и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций) 2. Углеродный обмен и продуктивность // Изв. РАН. Сер. биол. 2014. № 1. С. 65–75.
- Arneth A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O. B., Lloyd J., Vygodskaya N. N., Schulze E.-D. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Inter-seasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // Tellus B: Chem. Phys. Meteorol. 2002. V. 54. Iss. 5. P. 514–530.
- Bonan G. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. V. 320. N. 5882. P. 1444–1449.
- Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln, NE, USA: LI-COR Biosciences, 2013. 331 p.
- Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., Molen M. K. van der, Beletti Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. V. 9. N. 12. P. 5323–5340.
- Drake T. W., Raymond P. A., Spencer R. G. M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty // Limnol. Oceanogr. Lett. 2018. V. 3. Iss. 3. P. 132–142.
- Dymov A. A., Grodnitskaya I. D., Yakovleva E. V., Dubrovskiy Y. A., Kutayvin I. N., Startsev V. V., Milanovsky E. Y., Prokushkin A. S. Albic podzols of boreal pine forests of Russia: Soil organic matter, physicochemical and microbiological properties across pyrogenic history // Forests. 2022. V. 13. Iss. 11. Article 1831.
- Frey K. E., Smith L. C. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100 // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Iss. 9. Article 022025.
- Golomolzin V. V., Rublev A. N., Kiseleva Yu. V., Kozlov D. A., Prokushkin A. S., Panov A. V. Retrieval of total column carbon dioxide over Russia from Meteor-M No. 2 satellite data // Rus. Meteorol. Hydrol. 2022. V. 47. N. 4. P. 304–314 (Original Rus. Text © V. V. Golomolzin, A. N. Rublev, Yu. V. Kiseleva, D. A. Kozlov, A. S. Prokushkin, A. V. Panov, 2022, publ. in Meteorologiya i Gidrologiya. 2022. N. 4. P. 79–95).
- Hayes D. J., Kicklighter D. W., McGuire A. D., Chen M., Zhuang Q., Yuan F., Melillo J. M., Wullschlegel S. D. The impacts of recent permafrost thaw on land-atmosphere greenhouse gas exchange // Environ. Res. Lett. 2014. V. 9. N. 4. P. 1–12.
- Heimann M. The EUROSIBERIAN CARBONFLUX project // Tellus B: Chem. Phys. Meteorol. 2002. V. 54. Iss. 5. P. 417–419.
- Heintzenberg J., Birmili W., Otto R., Andreae M. O., Mayer J.-C., Chi X., Panov A. Aerosol particle number size distributions and particulate light absorption at the ZOTTO tall tower (Siberia), 2006–2009 // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. N. 1. P. 8703–8719.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirmermeister L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'Donnell J. A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. V. 11. N. 23. P. 6573–6593.
- Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S. N., Rocher-Ros G., Denfeld B., Pokrovsky O. Carbon emission from Western Siberian inland waters // Nat. Comm. 2021. V. 12. Iss. 1. Article 825.
- Kljun N., Calanca P., Rotach M. W., Schmid H. P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP) // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. P. 3695–3713.
- Koshurnikova N. N., Verkhovets S. V., Antamoshkina O. A., Trofimova N. V., Zlenko L. V., Zhuikov A. V., Garmash A. A. Structure of the organic matter pool in *Pinus sibirica* dominated forests of Central Siberia // Folia For. Pol. Ser. A. 2015a. V. 57. N. 4. P. 218–223.
- Koshurnikova N. N., Verkhovets S. V., Antamoshkina O. A., Trofimova N. V., Zlenko L. V., Zhuikov A. V. Assessment of Central Siberia forest ecosystems sustainability to forest fires: academic research outcomes // Proc. Soc. Behav. Sci. 2015b. V. 214. P. 1008–1018.

- Lloyd J., Shibistova O., Zolotoukhine D., Kolle O., Arneth A., Wirth C., Styles J. M., Tchebakova N. M., Schulze E.-D. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest // *Tellus B: Chem. Phys. Meteo.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 590–610.
- Makhnykina A. V., Prokushkin A. S., Menyaylo O. V., Verkhovets S. V., Tychkov I. I., Urban A. V., Rubtsov A. V., Koshurnikova N. N., Vaganov E. A. The impact of climatic factors on CO₂ emissions from soils of middle-taiga forests in central Siberia: Emission as a function of soil temperature and moisture // *Rus. J. Ecol.* 2020. V. 51. N. 1. P. 46–56 (Original Rus. Text © A. V. Makhnykina, A. S. Prokushkin, O. V. Menyaylo, S. V. Verkhovets, I. I. Tychkov, A. V. Urban, A. V. Rubtsov, N. N. Koshurnikova, E. A. Vaganov, 2020, publ. in *Ekologiya*. 2020. N. 1. P. 48–58).
- Makhnykina A. V., Panov A. V., Prokushkin A. S. The impact of wildfires on soil CO₂ emission in middle taiga forests in Central Siberia // *Land*. 2023. V. 12. Iss. 8. Article 1544.
- Makhnykina A. V., Vaganov E. A., Panov A. V., Koshurnikova N. N., Prokushkin A. S. The pulses of soil CO₂ emission in response to rainfall events in Central Siberia: revisiting the overall frost-free season CO₂ flux // *Forests*. 2024. V. 15. N. 2. Article 355.
- McGuire A. D., Anderson L. G., Christensen T. R., Dallimore S., Guo L., Hayes D. J., Heimann M., Lorensen T. D., Macdonald R. W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecol. Monogr.* 2009. V. 79. N. 4. P. 523–555.
- McGuire A. D., Christensen T. R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J. S., Koven C., Lafleur P., Miller P. A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: Comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. N. 8. P. 3185–3204.
- Panov A. V., Prokushkin A. S., Zrazhevskaya G. K., Urban A. V., Zyryanov V. I., Sidenko N. V., Heimann M. Winter CO₂ fluxes in ecosystems of Central Siberia: comparative estimates using three different approaches // *Rus. J. Ecol.* 2021. V. 52. N. 2. P. 126–135 (Original Rus. Text © A. V. Panov, A. S. Prokushkin, G. K. Zrazhevskaya, A. V. Urban, V. I. Zyryanov, N. V. Sidenko, M. Heimann, 2021, publ. in *Ekologiya*. 2021. N. 2. P. 112–122).
- Panov A. V., Prokushkin A. S., Kubler K., Korets M. A., Urban A. V., Zrazhevskaya G. K., Bondar' M. G., Heimann M., Zaehle S. Precise observations of atmospheric carbon dioxide and methane mole fractions in the polar belt of Near-Yenisei Siberia // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2022. V. 47. N. 11. P. 829–838 (Original Rus. Text © A. V. Panov, A. S. Prokushkin, K. Kubler, M. A. Korets, A. V. Urban, G. K. Zrazhevskaya, M. G. Bondar', M. Heimann, S. Zaehle, 2022, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2022a. N. 11. P. 19–31).
- Panov A., Prokushkin A., Semiletov I., Kübler K., Korets M., Putilin I., Urban A., Bondar M., Heimann M. Atmospheric CO₂ and CH₄ fluctuations over the continent-sea interface in the Yenisei River sector of the Kara Sea // *Atmosphere*. 2022b. V. 13. Iss. 9. Article 1402.
- Park S.-B., Knohl A., Migliavacca M., Thum T., Vesala T., Peltoniemi O., Mammarella I., Prokushkin A., Kolle O., Lavrič J., Park S. S., Heimann M. Temperature control of spring CO₂ fluxes at a coniferous forest and a peat bog in central Siberia // *Atmosphere*. 2021. V. 12. Iss. 8. Article 0984.
- Polosukhina D. A., Prokushkin A. S., Masyagina O. V. Carbon photoassimilation by dominant species of mosses and lichens in pine forests of Central Siberia // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. N. 11. Article 012031.
- Polosukhina D. A., Makhnykina A. V., Aryasov V. E., Trusov D. V., Prokushkin A. S. Photosynthesis of widespread lichen species in pine forests of Central Siberia // *Lesovedenie (For. Sci.)*. 2023. N. 6. P. 690–696.
- Reum F., Gerbig C., Lavric J. V., Rella C. W., Göckede M. Correcting atmospheric CO₂ and CH₄ mole fractions obtained with Picarro analyzers for sensitivity of cavity pressure to water vapor // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. N. 2. P. 1013–1027.
- Richter-Menge J., Druckenmiller M. L., Jeffries M. Arctic report card: Update for 2019. 2019. <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019>
- Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., Vonk J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520. P. 171–179.
- Röser C., Montagnani L., Schulze E.-D., Mollicone D., Kolle O., Meroni M., Papale D., Beletti Marchesini L., Federici S., Valentini R. Net CO₂ exchange rates in three different successional stages of the “Dark Taiga” of central Siberia // *Tellus B: Chem. Phys. Meteo.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 642–654.
- Schulze E.-D., Lloyd J., Kelliher F. M., Wirth C., Reimann C., Lühker B., Mund M., Knohl A., Milyukova I. M., Schulze W., Ziegler W., Varlagin A. V., Sogachev A. F., Valentini R., Dore S., Grigoriev S., Kolle O., Panfyorov M. I., Tchebakova N., Vygodskaya N. N. Productivity of forests in the EuroSiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink – a synthesis // *Global Change Biol.* 1999. V. 5. Iss. 6. P. 703–722.
- Schulze E. D., Prokushkin A. S., Arneth A., Knorre N., Vaganov E. A. Net ecosystem productivity and peat accumulation in a Siberian Aapa mire // *Tellus B: Chem. Phys. Meteo.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 531–536.
- Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schadel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Koven C. D., Kuhry P., Lawrence D. M., Natali S. M., Olefeldt D., Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., Vonk J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520. P. 171–179.
- Serikova S., Pokrovsky O. S., Ala-Aho P., Kazantsev V., Kirpotin S. N., Kopysov S. G., Krickov I. V., Laudon H., Manasypov R. M., Shirokova L. S., Soulsby C., Tetzlaff D., Karlsson J. High riverine CO₂ emissions at the permafrost boundary of Western Siberia // *Nat. Geosci.* 2018. V. 11. P. 825–829.
- Shibistova O., Lloyd J., Evgrafova S., Savushkina N., Zrazhevskaya G., Arneth A., Knohl A., Kolle O., Schulze E.-D. Seasonal and spatial variability in soil CO₂ efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest // *Tellus B: Chem. Phys. Meteo.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 552–567.
- Tchebakova N. M., Kolle O., Zolotoukhine D., Arneth A., Styles J. M., Vygodskaya N. N., Schulze E.-D., Shibistova O., Lloyd J. Inter-annual and seasonal variations of energy and water vapour fluxes above a *Pinus sylvestris* forest in the Siberian middle taiga // *Tellus B: Chem. Phys. Meteo.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 537–551.

- Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Panov A. V., Kolosov R. A., Sidenko N. V., Lavrich J., Heimann M. Interannual variability of atmospheric CO₂ concentrations over central Siberia from ZOTTO data for 2009–2015 // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2018. V. 43. Iss. 5. P. 288–294 (Original Rus. Text © A. V. Timokhina, A. S. Prokushkin, A. V. Panov, R. A. Kolosov, N. V. Sidenko, J. Lavric, M. Heimann, 2018, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2018. N. 5. P. 20–29).
- Urban A. V., Prokushkin A. S., Korets M. A., Panov A. V., Gerbig K., Heimann M. Influence of the underlying surface on greenhouse gas concentrations in the atmosphere over Central Siberia // *Geogr. Nat. Res.* 2019. V. 40. Iss. 3. P. 221–229 (Original Rus. Text © A. V. Urban, A. S. Prokushkin, M. A. Korets, A. V. Panov, K. Gerbig, M. Heimann, 2019, publ. in *Geogr. i prirod. res.* 2019. V. 40. N. 3. P. 32–40).
- Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavric J. V., Kaiser C., Hofer A., Heimann M. Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3. N. 4. P. 1113–1128.

CARBON FLOWS IN THE ECOSYSTEMS OF THE MIDDLE TAIGA OF CENTRAL SIBERIA

A. V. Panov¹, A. V. Makhnykina^{1, 2}, A. V. Urban¹, V. I. Zyryanov¹, D. A. Polosukhina^{1, 2}, E. A. Kukavskaya¹, V. E. Aryasov¹, R. A. Kolosov¹, I. R. Putilin¹, P. D. Tretyakov¹, D. A. Trusov¹, R. T. Sadykov¹, A. S. Prokushkin^{1, 2}

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 Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

The observed increase in temperature, caused by increasing concentrations of climate-active (greenhouse) gases in the atmosphere, primarily carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), may be responsible for the projected release of carbon accumulated over millennia in large areas of northern latitudes. The scale and duration of the expected effect remains an open question, due to the sporadic nature of quantitative estimates of carbon flows. The work reflects the current status, directions and main results of long-term instrumental studies of carbon flows in the ecosystems of the middle taiga subzone of Central Siberia, on the basis of the Middle Yenisei experimental station of V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ZOTTO observatory). The dynamics of CO₂ and CH₄ concentrations in the atmosphere from 2009 to 2020 are presented. The values of net ecosystem exchange of CO₂ for forest-swamp complexes are given, indicating that they act as a sink (sink) of atmospheric CO₂. For representative ecosystems, an assessment of soil CO₂ emission fluxes and the seasonal variation in the values of photosynthetic carbon assimilation by dominants of the subordinate vegetation layer are presented. The patterns of behavior of dissolved forms of carbon in the waters of streams draining oligotrophic and eutrophic swamps in the study area were revealed, and the values of CO₂ emission from the water surface were presented.

Keywords: atmosphere, climate, carbon dioxide, methane, carbon exchange flows.

How to cite: Panov A. V., Makhnykina A. V., Urban A. V., Zyryanov V. I., Polosukhina D. A., Kukavskaya E. A., Aryasov V. E., Kolosov R. A., Putilin I. R., Tretyakov P. D., Trusov D. A., Sadykov R. T., Prokushkin A. S. Carbon flows in the ecosystems of the middle taiga of Central Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 37–53 (in Russian with English abstract and references).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 582.475.4:58.02+575.167(571.16)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ КЕДРА СИБИРСКОГО

С. Н. Горошкевич, Е. А. Жук, О. Г. Бендер

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, просп. Академический, 10/3

E-mail: pearldiver@yandex.ru, eazhuk@yandex.ru, obender65@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2024 г.

В 30-летнем клоновом архиве на научном стационаре «Кедр» Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН изучены фенология, продуктивность, интенсивность газообмена и устойчивость к биотическим факторам у климатических экотипов кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) с широтного (от лесотундры Западной Сибири до низкогорий Западного Саяна) и долготного (от Урала до Северного Прибайкалья) профилей. Установлено, что для кедра сибирского характерен высокий уровень наследственно обусловленной эколого-географической дифференциации по продуктивности и устойчивости к биотическим факторам (вредителям и болезням) при выращивании вегетативного потомства на юге лесной зоны. Главным фактором различий между экотипами является теплообеспеченность вегетационного периода в местах их происхождения. С севера на юг она увеличивается значительно сильнее, чем с востока на запад, поэтому различия между широтными экотипами значительно больше, чем между долготными. Интенсивность дыхания в большей степени, чем интенсивность фотосинтеза, зависит от климата, в котором сформировалась данная популяция. У экотипов из холодных местообитаний значительно выше наследственно обусловленные затраты на дыхание. Это является важным фактором снижения их продуктивности в более теплом климате. Будучи ослаблены дисбалансом между фотосинтезом и дыханием, они повреждаются вредителями и болезнями, что становится важным фактором дальнейшего снижения продуктивности. В условиях глобального потепления экотипы из более теплого климата не уступают местному экотипу по устойчивости и превосходят его по продуктивности, поэтому их рекомендуется активно использовать в селекционной работе.

Ключевые слова: *Pinus sibirica* Du Tour; географические экотипы, продуктивность, устойчивость, газообмен, фотосинтез, дыхание.

DOI: 10.15372/SJFS20240306

ВВЕДЕНИЕ

Научный стационар «Кедр» основан в 1985 г. одновременно с Отделом кедровых лесов Института леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР. Он располагается в 30 км к юго-востоку от Томска на крайнем юге таежной зоны и является базой для работ в области экологии, морфологии, физиологии, генетики и селекции лесных древесных растений, в первую очередь кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour). Здесь проводятся исследования характера и природы

всех форм его разнообразия, в том числе эколого-географической дифференциации.

Растения, в отличие от животных, не могут генерировать собственное тепло или осуществлять сезонные климатически обусловленные миграции, поэтому у них роль климата как комплекса факторов, регулирующих жизнедеятельность, чрезвычайно велика, особенно у деревьев, надземные органы которых круглый год находятся под прямым воздействием атмосферных явлений (Saxe et al., 2001). Факторы (ресурсы) среды в ареале у бореальных видов хвойных

изменяются в очень широких пределах (Тихонова, Корец, 2021; Klisz et al., 2023). Естественный отбор приводит генотипический состав популяций в адаптивное соответствие с лесорастительными условиями, дифференцирует вид на экотипы (Lowry, 2012). Чтобы исследовать структуру вида, создаются специальные опытные объекты, на которых потомство из разных районов выращивается в одинаковых условиях, проводятся наблюдения (Schwinning et al., 2022).

По результатам этих наблюдений до самого последнего времени общепризнанным был принцип «местный – значит лучший» (Hereford, 2009; Johnson et al., 2010), который лег в основу лесосеменного районирования (Morgonstern, 1996; Ying, Yanchuk, 2006; Федорков, 2020). Однако после начала современных изменений климата во многих регионах бореальной зоны зафиксировано массовое повреждение естественных лесов, вплоть до усыхания (Krankina et al., 1997; Evans et al., 2017). При этом анализ состояния географических культур в новых условиях показал, что местные экотипы во многих случаях стали уступать экотипам из более теплообеспеченных частей ареала не только по скорости роста, но и по комплексной устойчивости (Jones, 2013; Rehfeldt et al., 2014).

Для повышения эффективности управления лесными генетическими ресурсами в связи с текущим изменением климата обсуждается превентивное перемещение генетического материала в районы, где именно перемещенные популяции оптимально соответствовали бы настоящему и/или будущему климату (Gross et al., 2017; Klapste et al., 2022). В первую очередь речь идет о перемещении относительно «южных» экотипов на север (McLane, Aitken, 2012). Эта идея получила название «assisted migration» и широко распространилась в последние 10–15 лет (Aitken, Whitlock, 2013; Chen et al., 2022). Очевидно, что внедрение assisted migration в практику лесного хозяйства должно проводиться осторожно, на основе достоверных результатов. Единственным способом оценить, какие именно экотипы будут наиболее перспективны в новом климате, являются эксперименты по их испытанию *ex situ*.

Кедр сибирский как важнейший лесообразующий вид, конечно, тоже был объектом для создания географических культур и соответствующих исследований (Кузнецова, 2007а, б; Николаева и др., 2022). В этих исследованиях показано, что он – не исключение: его климатические экотипы существенно различались по

продуктивности и устойчивости в соответствии с общими принципами организации разнообразия. Однако набор экотипов в этих исследованиях был ограничен, они не представляли все разнообразие климатических условий в пределах ареала. Кроме того, в упомянутых выше работах не ставилась задача причинной интерпретации наблюдаемых различий, в первую очередь физиологической.

Ключевыми физиологическими процессами, определяющими состояние растений, являются фотосинтез и дыхание, активность которых зависит от эндогенных особенностей растительных организмов и климатических факторов, в первую очередь от температуры. Баланс между поглощением (фотосинтез) и выделением (дыхание) углекислоты играет важную роль в глобальном углеродном цикле, так как определяет первичную продуктивность экосистем (Chapin et al., 2002). Исследования показали, что в ответ на увеличение температуры интенсивность дыхания может снижаться (Atkin, Tjoelker, 2003), а скорость ассимиляции углерода повышаться (Way, Oren, 2010). Большинство видов при потеплении климата могут сдвигать тепловой оптимум фотосинтеза в область более высоких температур (Crous et al., 2013). Метаанализ результатов, полученных в результате экспериментов, моделирующих потепление климата, показал, что у растений, обитающих в холодном климате амплитуда прогнозируемой интенсификации газообмена будет выше, чем у растений теплого климата (Liang et al., 2013).

В то же время результаты исследования газообмена хвойных не столь однозначны. Изучение их физиологических реакций показало как отсутствие температурной акклимации фотосинтеза высокогорных экотипов, например у ели лицзянской (*Picea likiangensis* (Franch.) E. Pritz.) (Zang et al., 2015), так и увеличение скорости ассимиляции углекислоты, например у сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) в ответ на повышение температуры при выращивании в климатических камерах (Teskey, Will, 1999).

Такие же противоречивые данные получены при исследовании дыхания хвойных в географических культурах. Выращивание в одинаковых условиях семян сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) из различных точек ареала показало отсутствие различий между популяциями по интенсивности дыхания (Tjoelker et al., 2008). В то же время при выращивании популяций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с разных широт было показано достоверно повышенное

дыхание у северных популяций (Reich et al., 1996).

Потепление климата не только изменяет активность газообменных процессов на сезонном пике температуры, но и увеличивает продолжительность вегетационного периода, особенно в бореальной зоне. Эти изменения влекут за собой более раннее распускание почек, формирование листа, начало активного фотосинтеза (Richardson et al., 2009). Поэтому актуальна количественная оценка сезонных изменений фотосинтеза и дыхания для моделирования чувствительности видов к изменениям климата.

На нашем экспериментальном объекте изначально была поставлена задача организовать варианты опыта (экотипы) в градиентные ряды (широтный, долготный и высотный профили) (Жук, Горошкевич, 2012), а также объяснить наблюдаемые различия методами физиологии (Бендер, Горошкевич, 2020) и биохимической генетики (Петрова и др., 2014; Petrova et al., 2014).

Цель настоящей статьи – обобщить результаты комплексных многолетних наблюдений за экотипами кедра сибирского с широтного и долготного профиля, включая физиологическое обоснование наблюдаемых различий, а также выявить возможности использования отдельных экотипов для селекции сортов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа была проведена в клоновом архиве географических экотипов кедра сибирского на Научном стационаре «Кедр» Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в 30 км к югу от г. Томска. Черенки для

создания этого экспериментального объекта были заготовлены весной 1997 г. в различных частях ареала (табл. 1). Для этого в каждом из 10 естественных насаждений было выбрано от 10 до 25 средних по размеру деревьев 2-го класса Крафта. Черенки с этих деревьев были сразу же привиты на 6–7-летние подвой местного экотипа. Привитые деревья выращивали в однородных условиях с размещением 3×6 м. К моменту исследования сохранились все исходные клоны, каждый из них включал 8–10 рамет, размещенных в разных блоках клонового архива для того, чтобы нивелировать влияние микрорельефа и микроклимата.

Фенологические исследования проводились ежегодно с 2005 по 2008 г. С момента набухания почечных чешуй до полного окончания роста годичных побегов и хвои измеряли длину вегетативных побегов и хвои на осях первого порядка ветвления в верхней части кроны с периодичностью 5–7 дней. Рост побегов и хвои был проанализирован в связи с данными о накоплении среднесуточных температур выше 5°C в течение вегетационного сезона (по данным метеостанции «Томск» Росгидромета). В 2007, 2014 и 2019 гг. проводили измерение высоты деревьев и диаметра ствола в основании. По этим данным для каждого дерева был вычислен объем ствола.

На всем протяжении периода наблюдений оценивали устойчивость деревьев к повреждению филлофагом хермесом сибирским (*Pineus cembrae* Chol.) и грибными патогенами. Определяли долю поврежденных от этих факторов деревьев в экотипе, а также степень повреждения в баллах. Для оценки интенсивности трофической связи хермеса с деревьями использовали шкалу С. А. Кривец и Е. Н. Коровинской (2009): единичное заселение (наличие мелких разроз-

Таблица 1. Происхождение экотипов кедра сибирского

Экотип	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Природная зона или высотный пояс
<i>Широтный профиль на Западно-Сибирской равнине с юга на север</i>				
Абаза	52°30' с. ш.	90°05' в. д.	350	Нижняя часть лесного пояса
Томск	56°14' с. ш.	84°30' в. д.	150	Южная часть южной подзоны тайги
Стрежевой	60°45' с. ш.	77°30' в. д.	40	Северная часть средней тайги
Ноябрьск	63°10' с. ш.	75°20' в. д.	110	Южная часть северной тайги
Уренгой	65°50' с. ш.	78°10' в. д.	40	Зона предтундровых редколесий
<i>Долготный профиль с запада на восток</i>				
Невьянск	57°15' с. ш.	60°10' в. д.	300	Средняя часть южной подзоны тайги
Слюдянка	51°30' с. ш.	103°40' в. д.	900	Нижняя часть лесного пояса
Северобайкальский	55°40' с. ш.	109°25' в. д.	700	» » » »

Таблица 2. Характеристика деревьев для физиологических исследований

Экотип	Высота дерева	Протя- женность кроны	Диаметр, см
	м		
Томск	9.0 ± 0.5	8.5 ± 0.5	18 ± 3
Уренгой	5.6 ± 0.3	3.4 ± 0.7	13 ± 1
Абаза	9.7 ± 0.3	9.0 ± 0.4	20.8 ± 1.2
Граница леса	6.3 ± 0.3	4.2 ± 0.2	15.3 ± 0.5

ненных колоний), слабое заселение (от 1/3 до 2/3 брахибластов и молодых побегов заселена колониями) и сильное заселение (заселено более 2/3 брахибластов и молодых побегов). Наличие колоний вредителя устанавливалось по характерному белому налету (пушку), покрывающему насекомых.

Жизненное состояние деревьев также определяли в баллах (Алексеев, 1989): 1 – здоровое дерево, нет внешних повреждений кроны и ствола, 2 – поврежденное дерево со сниженным на 30 % охвоением, 3 – сильно поврежденное дерево со снижением охвоения до 60 %, 4 – отмирающее дерево с разрушенной кроной и густотой менее 15–20 %, 5 – погибшее дерево.

Для физиологических исследований были использованы два экотипа с Западно-Сибирского широтного профиля – северный (Уренгой) и южный (Томск), а также два экотипа с Западно-Саянского высотного профиля – низкогорье (Абаза, 350 м н. у. м.) и высокогорье (верхняя граница леса, 1900 м н. у. м.). В каждом экотипе были отобраны 3 средних по размеру и жизненному состоянию дерева из разных клонов, возраст деревьев 32 года, в том числе возраст привоя 26 лет (табл. 2).

Для анализов использовали побеги второго порядка ветвления длиной около 20 см из верхней трети кроны. Побеги срезали, затем их нижние концы помещали в емкость с водой, после этого немедленно приступали к замерам газообмена однолетней хвои на инфракрасном газоанализаторе Li 6400 XT (LiCor Ltd, США) с использованием листовой камеры Standart 2 × 3 (Li-Cor Ltd, США) и искусственного источника света 6400-02B LED (LiCor Ltd, США). С конца мая по июль, во время активного роста хвои, замеры проводили один раз в неделю, в августе – октябре, т. е. в период затухания физиологических функций, – один раз в месяц. Весной и осенью температуру в листовой камере устанавливали равной температуре окружающего

воздуха, летом 22–24 °С. В листовой камере интенсивность фотосинтетически активной радиации составляла 1500 мкмоль/(м² · с), скорость потока CO₂ – 400 мкмоль/с, а его содержание – 400 мкмоль/моль.

На начальных этапах роста хвои, когда ее длина была меньше размеров ассимиляционной камеры, 5 пучков хвои отделяли от побега, помещали в капроновую сеточку и в таком виде закрепляли в листовой камере. В дальнейшем пучки хвои помещали либо вдоль, либо поперек камеры в зависимости от размеров хвои. После определения скорости фотосинтеза в листовой камере выключали свет и через 10–15 мин измеряли темновое дыхание (Chi et al., 2013). Замеры проводили с 10 до 13 ч. На этих же побегах линейкой измеряли длину хвои точно до 1 мм.

Массу органического вещества, синтезированного хвойной за вегетационный период, рассчитывали по методике И. С. Малкиной (1984). Коэффициент перехода от CO₂ к клетчатке принимали равным 0.647. Активность газообмена и накопления органического вещества в хвое рассчитывали на сухую массу хвои. Для этого хвойники высушивались при температуре 70 °С в течение 48 ч, затем взвешивались на весах Pioneer (Ohaus, China) с точностью до третьего знака.

С помощью критерия Шапиро – Уилкса установлено, что все морфологические признаки имели нормальное распределение. По этим признакам экотипы сравнивали между собой с помощью теста Ньюмана – Кейлса. Физиологические признаки не имели нормального распределения, поэтому по этим признакам экотипы сравнивали между собой с помощью U-критерия Манна–Уитни. Различия считали значимыми при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фенология. Для начала роста северным и восточным экотипам требовалось накопление суммы эффективных температур 70 °С, а южным, западным и местному (Томск) – не менее 90 °С. Клоны северных экотипов начинали и заканчивали рост побега на 7–10 дней раньше южного и местного, а клоны восточных экотипов – на 5–7 дней раньше западного и местного (рис. 1).

Рост хвои начинался при достижении побегом 25–35 % от окончательного размера, т. е. через 16–20 дней после начала его роста. У северных экотипов этот процесс начинался и заканчивался на 7–10 дней раньше, чем

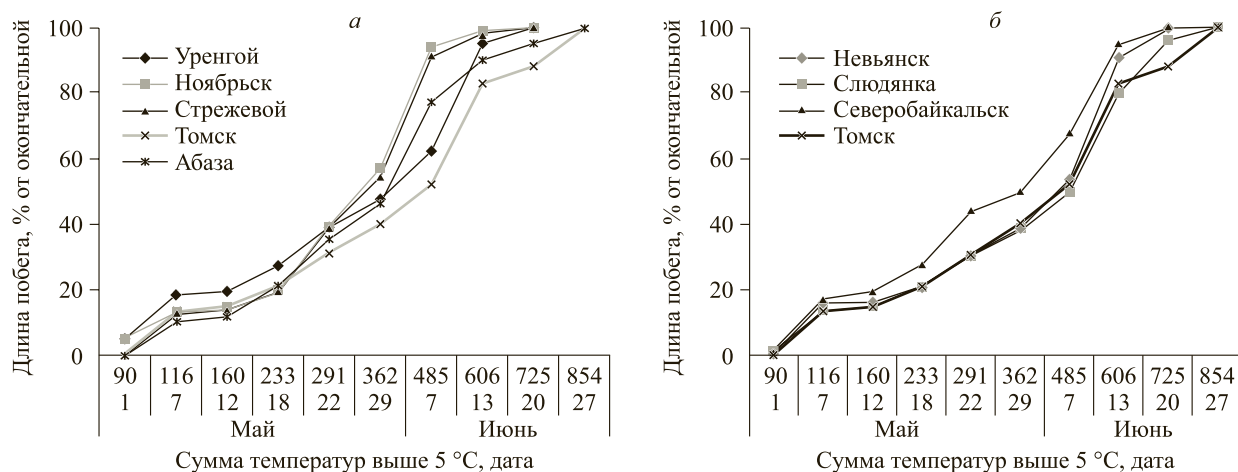


Рис. 1. Рост побегов у экотипов с широтного (а) и долготного (б) профилей.

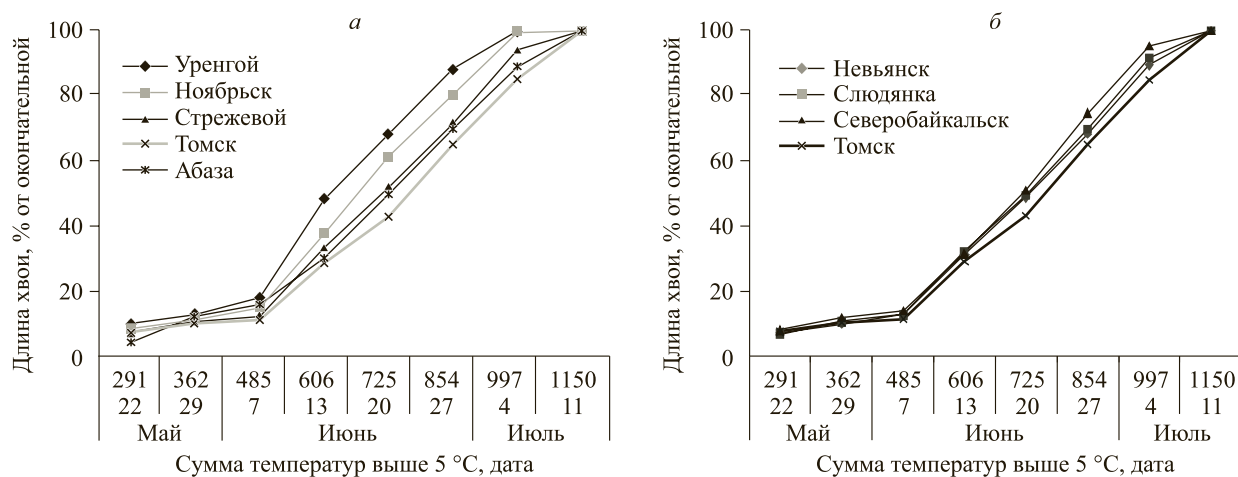


Рис. 2. Рост хвои у деревьев из широтных (а) и долготных (б) экотипов кедра сибирского.

у южного и местного, а у восточных экотипов – на 5 дней раньше, чем у западного и местного (рис. 2). Темпы роста хвои у деревьев местного экотипа были схожи с таковыми у южного и западного экотипов. Различия по срокам прохождения фаз между клонами внутри экотипов не превышали 2–3 дней.

Продуктивность. В возрасте 10 лет клоны самого северного экотипа уступали по высоте привоя всем остальным: на 11 % клонам местного экотипа и на 38 % клонам южного экотипа (рис. 3). Различия между восточным и западным экотипом не превышали 11 % в пользу последнего. Клоны местного экотипа были близки по росту к экотипу из середины широтного профиля.

К 17-летнему возрасту южный (западно-сибирский) экотип опередил в росте северные в 1.5–2 раза. Он значительно превосходил все остальные экотипы, включая местный. Западный экотип превосходил восточный на 20 %.

Еще через 5 лет различия увеличились. Деревья южного экотипа были выше северных более чем в 2 раза и выше местных на 24 %. Различия между крайними долготными экотипами возросли до 28 %.

Различия по объему ствола были еще более выраженными. В 10-летнем возрасте большая часть экотипов слабо различалась по этому признаку, за исключением южного (Абаза) и отчасти южно-прибайкальского (Слюдянка), которые уже тогда опережали остальные в 1.2–1.5 раза, так как не только были не только выше, но и имели существенно больший диаметр ствола (рис. 4).

Через 7 лет различия стали 4–6-кратными и продолжали увеличиваться в следующие 5 лет. Западный экотип, несмотря на большое преимущество в высоте, всего в 1.3 раза превосходил восточный, так как имел относительно тонкий ствол. Местный экотип по объему ствола мало

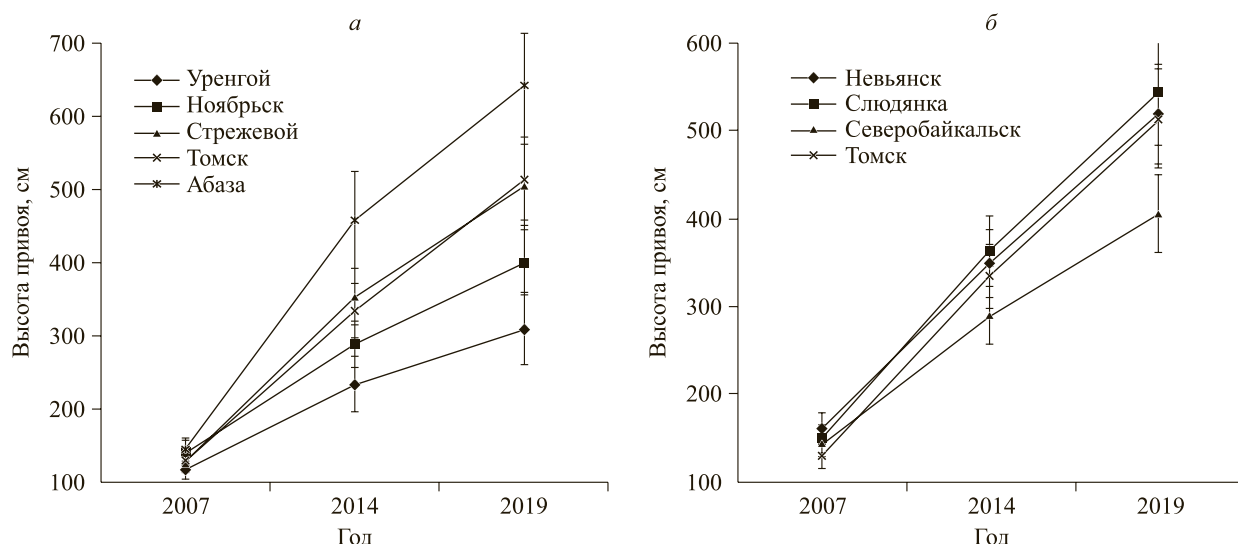


Рис. 3. Высота привоя у экотипов с широтного (а) и долготного (б) профилей по годам.

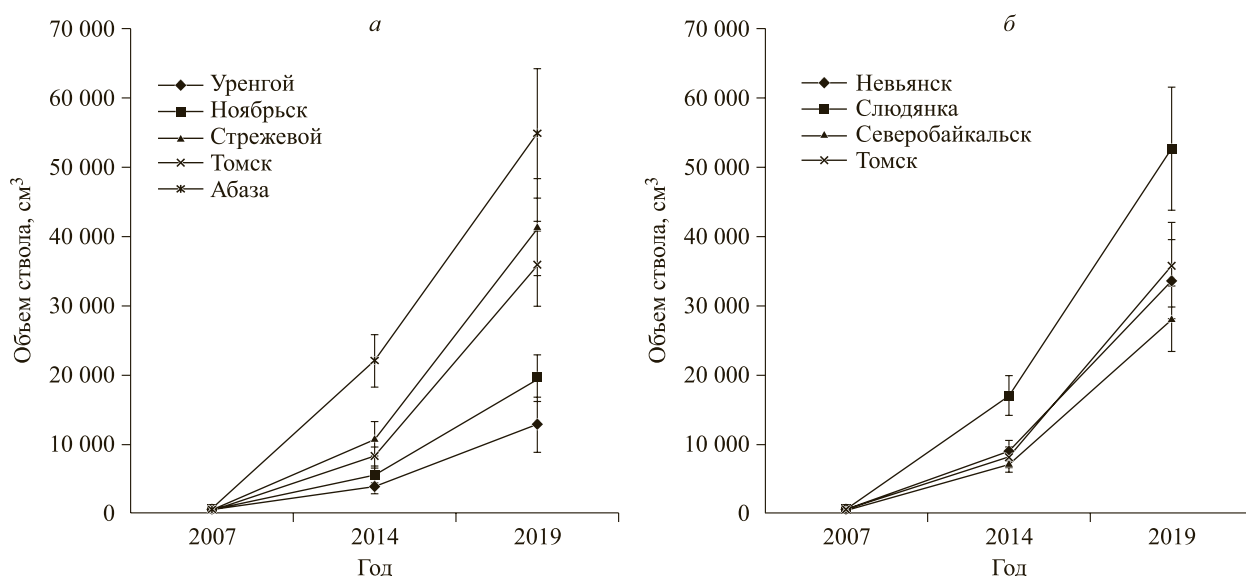


Рис. 4. Объем ствола у экотипов с широтного (а) и долготного (б) профилей по годам.

отличался от западного и ближайшего к местному экотипа из середины широтного профиля.

Устойчивость к биотическим факторам, жизненное состояние. В первые 5–7 лет жизненное состояние экотипов было примерно одинаковым. В дальнейшем все они без исключения постепенно заселялись сибирским кедровым хермесом, филлофагом из отряда Hemiptera. При этом восточный и северные экотипы были заселены сильно, центральные и западный – слабо, а южный – единично. В последующие годы эта закономерность сохранилась. Кроме того, северные экотипы дважды поражались не идентифицированными пока микромицетами. Наиболее значимые повреждения отмечены в 2023 г.: пожелтение хвои, гибель части побегов,

а в отдельных случаях – и всего дерева. В самом северном экотипе (Уренгой) было поражено не менее 90 % деревьев с глубиной повреждения от 20 до 100 %, при этом около 1 % деревьев погибли. В экотипе Ноябрьск пораженными оказалось 80 % деревьев с глубиной повреждения 10–50 %. Этим патогеном был затронут также самый восточный экотип (Северобайкальск): поражено 10 % деревьев с глубиной повреждения до 15 %.

Оценка жизненного состояния деревьев по протяженности и охвоению кроны показала, что деревья местного, а также южного и западного экотипов характеризовались как здоровые, имели высшую оценку. В северном и восточном направлении жизненное состояние ухудшалось: экотип из середины широтного профиля

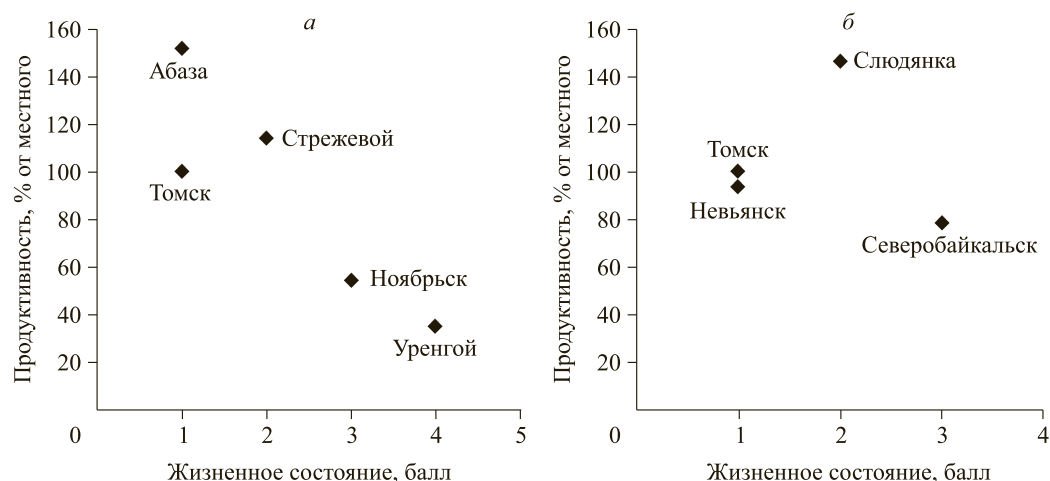


Рис. 5. Соотношение продуктивности (объема ствола) и устойчивости у экотипов широтно-го (а) и долготного (б) профилей в возрасте 23 лет.

(Стрежевой) – 1–2 балла, Ноябрьск и Северобайкальск – 2–3 балла, Уренгой – 3–5 баллов.

Таким образом, изученные климатические экотипы кедр сибирского сильно различались по прямо и тесно связанным между собой продуктивности и устойчивости к биотическим факторам (рис. 5).

К 23-летнему возрасту северные экотипы имели самую низкую, центральные – среднюю, остальные, включая местный, высокую продуктивность и устойчивость. Выдающимся по обоим показателям был единственный экотип, происходящий из более южного района, чем местный, а именно из низкогорья Западного Саяна. При идеальной устойчивости он был в 1.5 раз продуктивнее местного экотипа.

Газообмен. Измерения активности поглощения и выделения CO_2 в середине вегетационного периода на двухлетней хвое показали, что по интенсивности фотосинтеза значимых различий между экотипами не было, а интенсивность темнового дыхания у экотипов из холодных местообитаний (ЭХМ), т. е. у северного и высокогорного, была существенно выше, чем у экотипов из теплых местообитаний (ЭТМ), т. е. южного и низкогорного (рис. 6, а).

Отношение фотосинтеза к дыханию у ЭТМ было на 30–40 % выше, чем у ЭХМ (рис. 6, б). Следовательно, у последних при той же интенсивности фотосинтеза была выше доля пластических веществ, расходуемых на дыхание.

Кроме того, была изучена сезонная динамика фотосинтеза и дыхания хвои текущего и предыдущего годов формирования.

Формирование молодой (однолетней) хвои. У ЭХМ этот процесс завершался раньше. Соот-

ветственно раньше происходил переход от отрицательного баланса углерода к положительному (рис. 7, а).

В середине вегетационного периода фотосинтез достигал максимума, причем достоверных различий между экотипами не было.

В августе у ЭХМ начиналось резкое падение активности поглощения CO_2 , в то же время

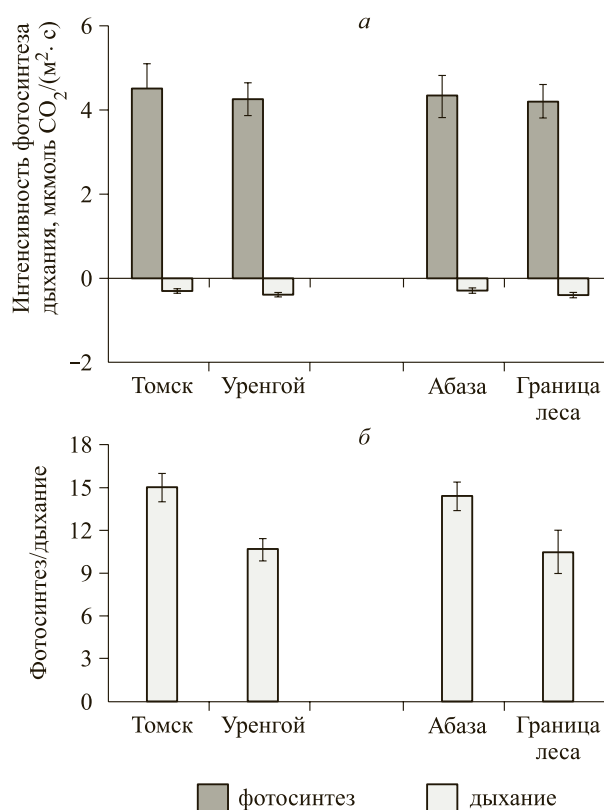


Рис. 6. Интенсивности фотосинтеза и дыхания (а) двухлетней хвои и их соотношение (б) у широтных и высотных экотипов кедр сибирского.

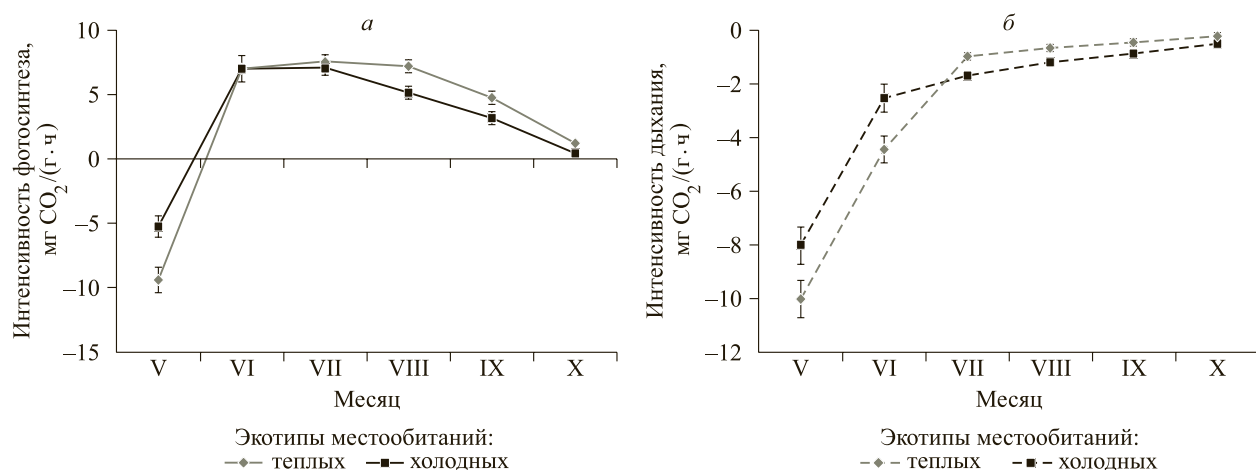


Рис. 7. Сезонная интенсивность фотосинтеза (а) и дыхания (б) хвои текущего года формирования у экотипов кедра сибирского.

у ЭТМ оно оставалось на высоком уровне и снижалось только в сентябре.

Интенсивность дыхания в начале формирования хвои была высокой у обеих групп, но у ЭХМ – существенно ниже, чем у ЭТМ, явно в связи более ранним переходом хвои к синтезу собственных ассимилятов (рис. 7, б).

В середине лета значимых различий по дыханию между экотипами не было. После этого, вплоть до осени, интенсивность темнового дыхания ЭХМ была достоверно выше, чем у ЭТМ. Таким образом, активный фотосинтез однолетней хвои ЭХМ заканчивался на месяц раньше, а интенсивность дыхания во второй половине вегетационного периода была выше, чем у ЭТМ.

Хвоя предыдущего года формирования (двухлетняя). Активный фотосинтез происходит с самого начала вегетационного периода у всех экотипов (рис. 8).

В конце мая и начале июня активность фотосинтеза была несколько выше у ЭХМ, что свя-

зано с более ранним началом ассимиляционных процессов. В то же время интенсивность их дыхания была меньше, чем ЭТМ. К середине июня активность фотосинтеза обеих групп выходила на плато и достигала максимальных показателей, значимых различий между вариантами не было.

В начале августа скорость фотосинтеза ЭХМ обитания начинала снижаться. У ЭТМ снижение фотосинтеза наблюдалось только в сентябре. Дыхание хвои лишь в мае было выше у ЭТМ по сравнению с ЭХМ. Уже к июню пары экотипов поменялись местами и до окончания вегетационного периода различия оставались существенными.

Расчет баланса углерода показал, что для однолетней и двухлетней хвои ЭХМ характерны более высокие темпы экспорта ассимилятов в первой половине вегетации. Во второй половине вегетационного периода их фотосинтетические функции затухают быстрее, чем у ЭТМ,

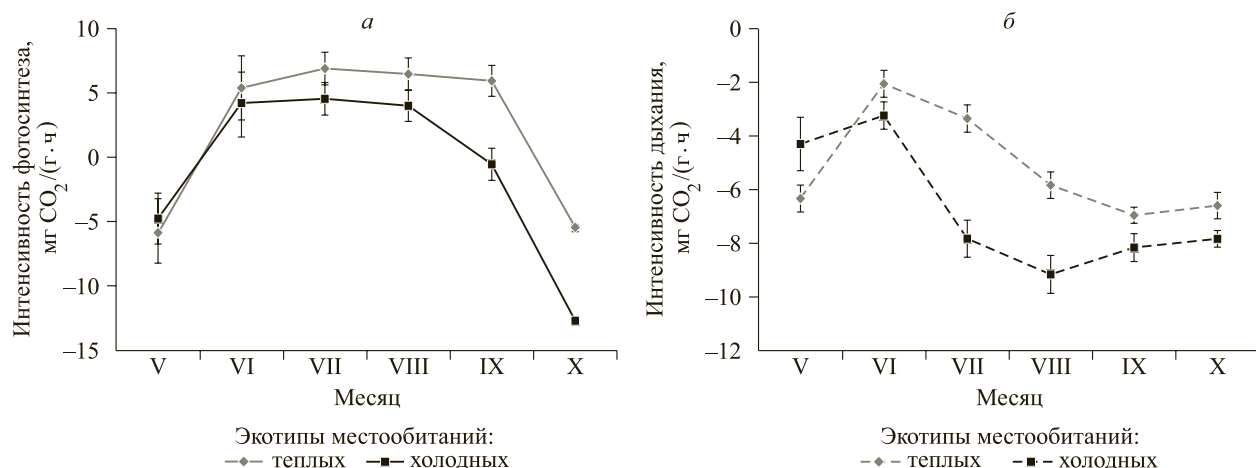


Рис. 8. Сезонная интенсивность фотосинтеза (а) и дыхания (б) двухлетней хвои у экотипов кедра сибирского.

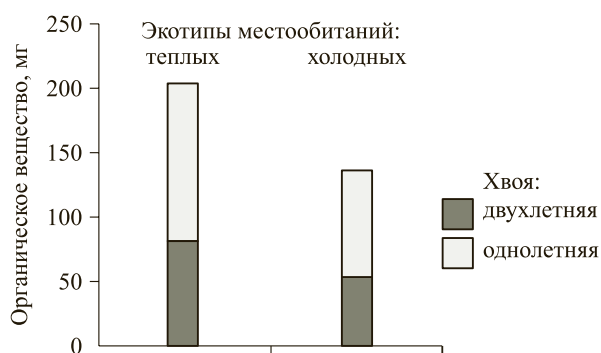


Рис. 9. Количество органического вещества, синтезированного одной хвоинкой текущего и предыдущего года за период вегетации у экотипов кедра сибирского.

вследствие чего снижается количество пластических веществ, поставляемых хвоинкой. Отток ассимилятов за весь период вегетации у них были значительно (на 34 %) ниже, чем у ЭТМ (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Температура считается главным фактором среды, регулирующим сезонный цикл развития у растений умеренного пояса (Schwalm, Ek, 2001; Mutke et al., 2003). Разным видам и экотипам для наступления одних и тех же весенних фенофаз требуется разная сумма температур (Andersson et al., 2018).

Как правило, чем ниже теплообеспеченность вегетационного периода в районе происхождения вида или экотипа, тем меньше тепла необходимо для начала роста (Wuhlich et al., 1995). При перемещении в другой климат связь фенологических процессов с накоплением эффективных температур сохраняется (Hannerz, 1998; Svystun et al., 2021).

Помимо температуры, для многих видов важное значение в регуляции начала и продолжительности роста имеет фотопериод. Так, у елей сизой (*Picea glauca* (Moench) Voss) (Partanen et al., 2001; Lesser, Parker, 2004; Hamilton et al., 2016) и обыкновенной (*P. abies* (L.) H. Karst.) (Partanen et al., 1998) начало роста у северных экотипов связано не только с суммой температур, но и с увеличением продолжительности светового периода. У других бореальных видов хвойных, например у лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) (Basler, Korner, 2012), влияние фотопериода не подтверждено или оно было небольшим, как у сосны обыкновенной (Hanninen, 1995).

Внутривидовая дифференциация кедр сибирского *ex situ* по срокам и продолжительности роста была сравнима с фенологическими различиями у экотипов сосны желтой (*Pinus ponderosa* P. Lawson & C. Lawson) (Rehfeldt, 1990), ели обыкновенной (Oleksyn et al., 1998) и лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) (Авров, 1996; Kagawa et al., 2006), у которых максимальные различия между экотипами составляли 10–14 дней. Однако у большинства хвойных видов дифференциация по срокам прохождения фенофаз более выражена: до 22 дней у сосны обыкновенной (Oleksyn et al., 1998), до 24 у лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) (Авров, 1977; Ирошников, 1977) и до 25 дней у сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) (Cannell et al., 1981). Различия между видами явно связаны с климатической структурой их ареалов. Чем разнообразней климат внутри ареала, особенно по индексу континентальности, тем сильнее дифференциация экотипов по фенологии. Ареал кедр сибирского почти целиком располагается в области умеренно-континентального климата, поэтому дифференциации его экотипов по фенологическим признакам не так уж велика.

Большие различия между климатическими экотипами кедр сибирского по продуктивности с самого начала их испытания были показаны ранее как на наших (Zhuk, 2020), так и на других экспериментальных объектах (Кузнецова, 2007a). Такие же различия найдены у большинства хвойных видов бореального и умеренного пояса (Lesser, Parker, 2004; Skulason et al., 2018). Они традиционно объясняются так: экотипы из других регионов плохо адаптированы к местному климату, поэтому не в полной мере используют его ресурсы; чем больше различия между местным климатом и климатом в местах их происхождения, тем больше различия в продуктивности между местным и неместными экотипами (Joshi et al., 2001; Bossdorf et al., 2004). Экотипы из более холодного климата медленно растут, экотипы из более теплого климата не успевают полностью завершить свой сезонный цикл развития, поэтому их продуктивность снижается (Montwé et al., 2018).

Однако принцип «местный, значит лучший» актуален лишь в стабильном климате. Если климат быстро меняется, как в настоящее время, вполне возможна ситуация, когда зрелые насаждения местного экотипа, генотипический состав которых сформировался в условиях прежнего климата, оказывается не вполне соответствующим

щим новому климату. Напротив, популяции из тех регионов, где прежний климат был похож на новый климат в месте испытания, в первую очередь по теплообеспеченности, могут показать себя более соответствующими этому новому климату. В нашем случае наиболее продуктивными были экотипы из южных по отношению к месту испытания регионов (Абаза, низкогорье Западного Саяна; Слюдянка, Южное Прибайкалье). Их превосходство с возрастом постепенно увеличивалось.

Северные экотипы кедра сибирского с самого начала наблюдений имели низкую продуктивность по сравнению с остальными. Вредители и патогены чаще повреждают деревья, уже ослабленные другими факторами (Гродницкая, Кузнецова, 2012; Кривец и др., 2023). Хуже адаптированные к местному климату и, как следствие, менее продуктивные, северные экотипы с возрастом все больше заселялись вредителями и поражались грибными болезнями, что дополнительно снижало их продуктивность. Напротив, самые продуктивные южные экотипы оказались одновременно самыми устойчивыми.

В мировой научной литературе на удивление мало информации о эколого-географической дифференциации хвойных видов по интенсивности фотосинтеза. Отсутствие температурной акклимации фотосинтеза не найдено у высокогорного вида ели лицзянской (*Picea likiangensis* (Franch.) E. Pritz.) в сравнении с двумя низкогорными видами – е. корейской (*P. koraiensis* Nakai) и е. Мейера (*P. meyeri* Rehder et E. H. Wilson) (Zhang et al., 2015). Исследование фотосинтеза у однолетнего семенного потомства сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) из трех популяций вдоль широтного профиля, помещенного в камеры с разным температурным режимом, показало отсутствие различий (Teskey, Will, 1999).

В нашем опыте активность поглощения CO_2 у контрастных экотипов кедра сибирского была примерно одинаковой, что свидетельствует о термальной акклимации фотосинтеза ЭХМ к условиям произрастания на юге Томской области. Чтобы понять причину успешной акклимации фотосинтеза, мы изучили механизмы, лежащие в ее основе. Оказалось, что на биохимическом уровне регулируется максимальная скорость карбоксилирования рибулозобисфосфата (V_{cmax}) и восстановления рибулозобисфосфата, на биофизическом уровне меняется устьичная проводимость (g_s или C_{cond}) (Бендер, Горошкевич, 2020).

Результаты исследования различий между климатическими экотипами по интенсивности дыхания довольно противоречивы. У сосны ладанной (Teskey, Will, 1999) и сосны Банка (Tjoelker et al., 2008) в одинаковых условиях среды их не найдено. С другой стороны, темновое дыхание 7-летних сеянцев ели обыкновенной из разных высотных поясов закономерно возрастало от нижней части высотного профиля к верхней (Oleksyn et al., 1998). У сосны обыкновенной то же самое наблюдалось у широтных экотипов: интенсивность дыхания заметно увеличивалась от южных экотипов к северным (Reich et al., 1996). В нашем опыте ЭХМ дышали значительно активнее, чем ЭТМ. Таким образом, наследственно обусловленные различия между экотипами кедра сибирского по интенсивности дыхания можно считать доказанными.

Проведенный в настоящей работе анализ сезонной динамики газообменных процессов позволил еще глубже понять суть различий между контрастными климатическими экотипами. В середине лета значимых различий не найдено, но период активного фотосинтеза у ЭХМ был почти на 2 мес короче. Интенсивность их дыхания была достоверно выше в середине и второй половине вегетационного периода. Последнее стало главной причиной различий в положительном балансе углерода, который у ЭТМ значительно выше. У ЭХМ весенние ростовые процессы потребляли значительное количество ассимилятов, которое не в полной мере восполнялось за вегетационный период. Предположительно именно это обстоятельство вызывало отставание ЭХМ в росте и снижение их устойчивости к негативным биотическим факторам.

ВЫВОДЫ

Опыт выращивания вегетативного потомства климатических экотипов на юге лесной зоны Западной Сибири показал, что для кедра сибирского характерен высокий уровень наследственно обусловленной эколого-географической дифференциации по продуктивности и устойчивости к биотическим факторам. Главным фактором различий между экотипами является теплообеспеченность вегетационного периода в местах их происхождения, которая сильно возрастает с севера на юг и умеренно – с востока на запад. По этой причине различия между широтными экотипами значительно больше, чем между долготными. Интенсивность дыхания в боль-

шей степени, чем интенсивность фотосинтеза, зависит от климата, в котором сформировалась данная популяция. У экотипов из холодных местообитаний значительно выше наследственно обусловленные затраты на дыхание. Ослабленные этим обстоятельством, они подвергаются повреждению вредителями и болезнями, что становится важным фактором дальнейшего снижения продуктивности. В условиях глобального потепления экотипы из более теплого климата не уступают местному климату по устойчивости и превосходят его по продуктивности, поэтому их следует активно использовать в селекционной работе.

Работа выполнена в рамках государственной бюджетной темы № 121030900196-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авров Ф. Д. Рост привоев лиственницы различного географического происхождения // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 124–153.
- Авров Ф. Д. Экология и селекция лиственницы // Проблемы региональной экологии. Томск: Спектр, 1996. Вып. 7. 213 с.
- Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
- Бендер О. Г., Горошкевич С. Н. Газообмен и содержание фотосинтетических пигментов у широтных экотипов кедра сибирского в опыте *ex situ* // Сиб. лесн. журн. 2020. № 5. С. 28–36.
- Гродницкая И. Д., Кузнецова Г. В. Заболевания *Pinus sylvestris* L. и *Pinus sibirica* Du Tour в географических культурах и лесных питомниках Красноярского края и Хакасии // Хвойные бореал. зоны. 2012. Т. 27. № 3–4. С. 55–60.
- Жук Е. А., Горошкевич С. Н. Факторы внутривидовой дифференциации кедра сибирского вдоль широтного и высотного профилей // Хвойные бореал. зоны. 2012. Т. 27. № 3–4. С. 61–66.
- Ирошников А. И. Географические культуры хвойных в Сибири // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 3–110.
- Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М., Волкова Е. С., Мельник М. А., Смирнов Н. А., Пац Е. Н. Вспышка массового размножения и оценка риска распространения союзного короеда в кедровых лесах Томской области // Лесоведение. 2023. № 2. С. 116–131.
- Кривец С. А., Коровинская Е. Н. Экология сибирского кедрового хермеса (*Pineus cembrae* Chol., Homoptera, Adelgidae) в селекционных культурах кедра сибирского в Томской области // Изв. СПбЛТА. 2009. № 187. С. 159–167.
- Кузнецова Г. В. Опыт создания клоновой плантации кедровых сосен в Красноярской лесостепи // Хвойные бореал. зоны. 2007а. Т. 24. № 2–3. С. 217–224.
- Кузнецова Г. В. Изучение изменчивости у климатипов кедра сибирского на юге Красноярского края // Хвойные бореал. зоны. 2007б. Т. 24. № 4–5. С. 423–426.
- Малкина И. С. Газообмен и образование ассимилятов в разновозрастной хвое сосны обыкновенной // Лесоведение. 1984. № 6. С. 29–33.
- Николаева М. А., Варенцова Е. Ю., Межина К. М. Оценка сохранности и состояния *Pinus sibirica* Du Tour в географических культурах Ленинградской области // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. 40. № 5. С. 381–387.
- Петрова Е. А., Горошкевич С. Н., Белоконов М. М., Белоконов Ю. С., Политов Д. В. Генетическое разнообразие кедра сибирского *Pinus sibirica* Du Tour: распределение вдоль широтного и долготного профилей // Генетика. 2014. Т. 50. № 5. С. 538–553.
- Тихонова И. В., Корец М. А. Изменчивость метеорологических условий произрастания хвойных пород в Средней Сибири с 1960 г. // Лесоведение. 2021. № 2. С. 173–186.
- Федорков А. Л. Лесосеменное районирование сосны обыкновенной на севере Европы // Сиб. лесн. журн. 2020. № 2. С. 63–68.
- Aitken S. N., Whitlock M. C. Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change // Ann. Rev. Ecol. Evol. System. 2013. V. 44. P. 367–388.
- Andersson G. B., Persson T., Fedorkov A., Mullin T. J. Longitudinal differences in Scots pine shoot elongation // Silva Fenn. 2018. V. 52. Iss. 5. Article 10040.
- Atkin O. K., Tjoelker M. G. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature // Trends Plant. Sci. 2003. V. 8. Iss. 7. P. 343–351.
- Basler D., Korner C. Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species // Agr. For. Meteorol. 2012. V. 165. P. 73–81.
- Bossdorf O., Prati D., Auge H., Schmid B. Reduced competitive ability in an invasive plant // Ecol. Lett. 2004. V. 7. Iss. 4. P. 346–353.
- Cannell M. C. R., Thompson S., Lines R. Heights of provenances and progenies of *Pinus contorta* in Britain correlated with seedling phenology and the duration of bud development // Silvae Gen. 1981. V. 30. Iss. 6. P. 166–173.
- Chapin F. S., Matson P. A., Mooney H. A. Carbon inputs to ecosystems // Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer Verlag, 2002. P. 123–156.
- Chen Z., Grossfurtherner L., Loxterman J. L., Masingale J., Richardson B. A., Seaborn T., Smith B., Waits L. P., Narum S. R. Applying genomics in assisted migration under climate change: Framework, empirical applications, and case studies // Evol. Appl. 2022. V. 15. Iss. 1. P. 3–21.
- Chi Y., Xu M., Shen R., Yang Q., Huang B., Wan S. Acclimation of foliar respiration and photosynthesis in response to experimental warming in a temperate steppe in Northern China // PLoS ONE. 2013. V. 8. Iss. 2. Article e56482.
- Crous K. Y., Quentin A. G., Lin Y. S., Medlyn B. E., Williams D. G., Barton C. V. M., Ellsworth D. S. Photosynthesis of temperate *Eucalyptus globulus* trees outside their native range has limited adjustment to elevated CO₂ and climate warming // Global Change Biol. 2013. V. 19. Iss. 12. P. 3790–3807.
- Evans P. M., Newton A. C., Cantarello E., Martin P., Sanderson N., Jones D. L. Thresholds of biodiversity and ecosystem function in a forest ecosystem undergoing dieback // Sci. Rep. 2017. V. 7. N. 1. Article 6775.

- Gross C. L., Fatemi M., Simpson I. H. Seed provenance for changing climates: early growth traits of nonlocal seed are better adapted to future climatic scenarios, but not to current field conditions // *Restor. Ecol.* 2017. V. 25. Iss. 4. P. 577–586.
- Hamilton J. A., El Kayal W., Hart A. T., Runcie D. E., Arango-Velez A., Cooke J. E. The joint influence of photoperiod and temperature during growth cessation and development of dormancy in white spruce (*Picea glauca*) // *Tree Physiol.* 2016. V. 36. Iss. 11. P. 1432–1448.
- Hannerz M. Genetic and seasonal variation in hardiness and growth rhythm in boreal and temperate conifers: A review and annotated bibliography. Rep. N. 2. Skogforsk, 1998. 140 p.
- Hanninen H. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology // *Can. J. Bot.* 1995. V. 73. N. 2. P. 183–199.
- Hereford J. A quantitative survey of local adaptation and fitness trade-offs // *Am. Naturalist.* 2009. V. 173. Iss. 5. P. 579–588.
- Johnson R., Stritch L., Ohwell P., Lambert S., Horning M. E., Cronn R. What are the best seed sources for ecosystem restoration on BLM and USFS lands? // *Native Plants J.* 2010. V. 11. Iss. 2. P. 117–131.
- Jones T. A. When local isn't best // *Evol. Appl.* 2013. V. 6. Iss. 7. P. 1109–1118.
- Joshi J., Schmid B., Caldeira M. C., Dimitrakopoulos P. G., Good J., Harris R., Hector A., Huss-Danell K., Jumpponen A., Minns A., Pereira J. S., Prinz A., Scherer-Lorenzen M., Siamantziouras A.-S. D., Terry A. C., Troumbis A. Y., Lawton J. H. Local adaptation enhances performance of common plant species // *Ecol. Lett.* 2001. V. 4. Iss. 6. P. 536–544.
- Kagawa A., Sugimoto A., Maximov T. C. Seasonal course of translocation, storage and remobilization of ¹³C pulse-labeled photoassimilate in naturally growing *Larix gmelinii* saplings // *New Phytol.* 2006. V. 171. Iss. 4. P. 793–803.
- Klapste J., Jaquish B., Porth I. Building resiliency in conifer forests: Interior spruce crosses among weevil resistant and susceptible parents produce hybrids appropriate for multi-trait selection // *PLoS ONE.* 2022. V. 18. N. 10. Article e0293160.
- Klisz M., Chakraborty D., Cyjetkovic B., Grabner M., Lintunen A., Mayer K., George J.-P., Rossi S. Functional traits of boreal species and adaptation to local conditions // *Boreal forests in the face of climate change: Sustainable management* / M. M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, & Y. Bergeron (Eds.). V. 74. Springer Cham, 2023. P. 323–355.
- Krankina O. N., Dixon R. K., Kirilenko A. P., Kobak K. I. Global climate change adaptation: examples from Russian boreal forests // *Climatic Change.* 1997. V. 36. N. 1. P. 197–216.
- Lesser M. R., Parker W. H. Genetic variation in *Picea glauca* for growth and phenological traits from provenance tests in Ontario // *Silvae Gen.* 2004. V. 53. N. 4. P. 141–148.
- Liang J., Xia J., Liu L., Wan S. Global patterns of the responses of leaf-level photosynthesis and respiration in terrestrial plants to experimental warming // *J. Plant Ecol.* 2013. V. 6. Iss. 6. P. 437–447.
- Lowry D. B. Ecotypes and the controversy over stages in the formation of new species // *Biol. J. Linnean Soc.* 2012. V. 106. Iss. 2. P. 241–257.
- McLane S. C., Aitken S. N. Whitebark pine (*Pinus albicaulis*) assisted migration potential: testing establishment north of the species range // *Ecol. Appl.* 2012. V. 22. Iss. 1. P. 142–153.
- Montwé D., Isaac-Renton M., Hamann A., Spiecker H. Cold adaptation recorded in tree rings highlights risks associated with climate change and assisted migration // *Nat. Comm.* 2018. V. 9. N. 1. Article 1574.
- Morgenstern E. K. Geographic variation in forest trees. Genetic basis and application of knowledge in silviculture. Vancouver: Univ. British Columbia Press, 1996. 214 p.
- Mutke S., Gordo J., Climent J., Gil L. Shoot growth and phenology modelling of grafted Stone pine (*Pinus pinea* L.) in Inner Spain // *Ann. For. Sci.* 2003. V. 60. Iss. 6. P. 527–537.
- Oleksyn J., Modrzyński J., Tjoelker M. G., Zytowskiak R., Reich P. B., Karolewski P. Growth and physiology of *Picea abies* populations from elevational transects: common garden evidence for altitudinal ecotypes and cold adaptation // *Funct. Ecol.* 1998. V. 12. Iss. 4. P. 573–590.
- Partanen J., Koski V., Hanninen H. Effects of photoperiod and temperature on the timing of bud burst in Norway spruce (*Picea abies*) // *Tree Physiol.* 1998. V. 18. Iss. 12. P. 811–816.
- Partanen J., Leinonen I., Repo T. Effect of accumulated duration of the light period on bud burst in Norway spruce (*Picea abies*) of varying ages // *Silva Fenn.* 2001. V. 35. N. 1. Article 608.
- Petrova E. A., Goroshkevich S. N., Belokon M. M., Belokon Yu. S., Politov D. V. Distribution of the genetic diversity of the Siberian stone pine, *Pinus sibirica* Du Tour, along the latitudinal and longitudinal profiles // *Rus. J. Genet.* 2014. V. 50. Iss. 5. P. 467–482 (Original Rus. text © E. A. Petrova, S. N. Goroshkevich, M. M. Belokon, Yu. S. Belokon, D. V. Politov, 2014, publ. in *Genetika*. 2014. V. 50. N. 5. P. 538–553).
- Rehfeldt G. E. Genetic differentiation among populations of *Pinus ponderosa* from Upper Colorado river basin // *Bot. Gazet.* 1990. V. 151. N. 1. P. 125–137.
- Rehfeldt G. E., Leites L. P., Bradley St Clair J., Jaquish B. C., Sáenz-Romero C., López-Upton J., Joyce D. G. Comparative genetic responses to climate in the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: clines in growth potential // *For. Ecol. Manag.* 2014. V. 324. P. 138–146.
- Reich P. B., Oleksyn J., Tjoelker M. G. Needle respiration and nitrogen concentration in Scots pine populations from a broad latitudinal range: a common garden test with field-grown trees // *Funct. Ecol.* 1996. V. 10. N. 6. P. 768–776.
- Richardson A. D., Hollinger D. Y., Dail D. B., Lee J. T., Munger J. W., O'Keefe J. Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests // *Tree Physiol.* 2009. V. 29. Iss. 3. P. 321–331.
- Saxe H., Cannell M. G. R., Johnsen O., Ryan M. G., Vourlitis G. Tree and forest functioning in response to global warming // *New Phytol.* 2001. V. 149. Iss. 3. P. 369–399.
- Schwalm C., Ek A. R. Climate change and site: relevant mechanisms and modelling techniques // *For. Ecol. Manag.* 2001. V. 150. Iss. 3. P. 241–257.

- Schwinning S., Lortie C. J., Esque T. C., DeFalco L. A. What common-garden experiments tell us about climate responses in plants // J. Ecol. 2022. V. 110. Iss. 5. P. 986–996.
- Skulason B., Hansen O. K., Nielsen U. B. Provenance variation in phenology and frost tolerance in Subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) planted in Denmark and Iceland // Forests. 2018. V. 9. Iss. 1. Article 17.
- Systun T., Lundstromer J., Berlin M., Westin J., Jönsson A. M. Model analysis of temperature impact on the Norway spruce provenance specific bud burst and associated risk of frost damage // For. Ecol. Manag. 2021. V. 493. Iss. 6. Article 119252.
- Teskey R. O., Will R. E. Acclimation of loblolly pine (*Pinus taeda*) seedlings to high temperatures // Tree Physiol. 1999. V. 19. Iss. 8. P. 519–525.
- Tjoelker M. G., Oleksyn J., Reich P. B., Zytowskiak R. Coupling of respiration, nitrogen, and sugars underlies convergent temperature acclimation in *Pinus banksiana* across wide-ranging sites and populations // Global Change Biol. 2008. V. 14. Iss. 4. P. 782–797.
- Way D. A., Oren R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data // Tree Physiol. 2010. V. 30. Iss. 6. P. 669–688.
- Wuhlisch G. von, Krusche D., Muhs H. J. Variation in temperature sum requirement for flushing of beech provenances // Silvae Genet. 1995. V. 44. N. 5–6. P. 343–346.
- Ying C. C., Yanchuk A. D. The development of British Columbia's tree seed transfer guidelines: purpose, concept, methodology, and implementation // For. Ecol. Manag. 2006. V. 227. Iss. 1–2. P. 1–13.
- Zhang X. W., Wang J. R., Ji M. F., Milne R. I., Wang M. H., Liu J. Q., Shi S., Yang S.-L., Zhao C.-M. Higher thermal acclimation potential of respiration but not photosynthesis in two alpine *Picea* taxa in contrast to two lowland congeners // PLoS ONE. 2015. V. 10. N. 4. Article e0123248.
- Zhuk E. Shoot structure variation in latitudinal and longitudinal ecotypes of *Pinus sibirica* in common garden experiment // Forestist. 2020. V. 70. N. 2. P. 160–165.

THE STUDY OF THE GEOGRAPHICAL DIFFERENTIATION OF SIBERIAN STONE PINE

S. N. Goroshkevich, E. A. Zhuk, O. G. Bender

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems,
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Prospekt Akademicheskiiy, 10/3, Tomsk, 634055 Russian Federation*

E-mail: pearldiver@yandex.ru, eazhuk@yandex.ru, obender65@mail.ru

The phenology, productivity, intensity of gas exchange and resistance to biotic factors in climatic ecotypes of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) from latitudinal (from the West Siberian forest tundra to the low mountains of the Western Sayan) and longitude (from the Urals to the Northern Baikal region) profiles were studied in the 30-year clone archive at the scientific field station «Kedr» of the Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. It has been established that Siberian stone pine is characterized by a high level of hereditarily determined ecological and geographical differentiation in productivity and resistance to biotic factors (pests and fungi diseases) when growing vegetative progeny in the south of the forest zone. The main factor of differences between ecotypes is the heat supply of the growing season in their places of origin. It increases significantly more from north to south than from east to west. Therefore, the differences between latitudinal ecotypes are much greater than between longitudinal ecotypes. The intensity of respiration depends more than the intensity of photosynthesis on the climate in which a given population was formed. Ecotypes from cold habitats have significantly higher respiration costs. This is an important factor in reducing their productivity in warmer climates. Being weakened by the imbalance between photosynthesis and respiration, they are damaged by pests and diseases which becomes an important factor in further reducing productivity. In conditions of global warming, ecotypes from warmer climates are not inferior to the local ecotype in terms of resistance to biotic factors and surpass it in productivity. Therefore, they are recommended to be actively used for breeding.

Keywords: *Pinus sibirica* Du Tour, geographical ecotypes, productivity, sustainability, gas exchange, photosynthesis, respiration.

How to cite: Goroshkevich S. N., Zhuk E. A., Bender O. G. The study of the geographical differentiation of Siberian stone pine // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 54–66 (in Russian with English abstract and references).

УДК 574.4(57.045)

ЛАТЕРАЛЬНЫЙ СТОК УГЛЕРОДА В КРИОЛИТОЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

А. С. Прокушкин^{1,2}, Т. Н. Гейс^{1,2}, Р. А. Колосов¹, М. А. Корец¹, А. В. Панов¹,
Д. А. Полосухина^{1,2}, М. П. Прокушкина², С. В. Титов¹, И. В. Токарева¹,
Н. В. Сиденко¹, Ю. В. Шамонина¹, С. Г. Прокушкин¹

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

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru, geys.00@mail.ru, kolosov.ra@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru,
alexey.v.panov@gmail.com, polosukhina@ksc.krasn.ru, Mprokushkina@sfu-kras.ru, titov-sergey@mail.ru,
gavrilenko@ksc.krasn.ru, nikita.v.sidenko@gmail.com, shamonina@ksc.krasn.ru, stanislav@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

Количественные оценки баланса углерода ландшафтов суши и особенно криолитозоны, где наблюдаются наиболее значимые тренды потепления, требуют учета экспорта терригенного углерода за их пределы с латеральным стоком. В работе представлены результаты многолетнего круглогодичного мониторинга внутри-сезонных и межгодовых флуктуаций концентраций растворенного органического (РОУ) и неорганического (РНУ) углерода в гидрографической сети Среднесибирского плоскогорья, осуществляемого на базе Эвенкийского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (п. Тура). Исследования проводились на более чем 100 водотоках разного порядка в среднем течении р. Нижняя Тунгуска (62–66° с. ш., 96–102° в. д.) на основе регулярного измерения концентраций всех форм углерода, а также квазинепрерывного мониторинга физико-химических параметров водотоков с помощью автоматических логгеров-регистраторов. Показано, что основными лимитирующими факторами латерального стока углерода в пределах Среднесибирского плоскогорья в настоящее время являются запасы потенциально мобилизуемого органического углерода в наземных ландшафтах и количество осадков в условиях резко континентального климата. Рост стока органического углерода прогнозируется в результате как оттаивания богатых C_{org} мерзлых толщ, так и повышения продуктивности растительного покрова, а неорганического углерода – вследствие повышения скоростей выветривания горных пород и секвестрации атмосферного CO_2 . Отрицательные прогнозы поведения РОУ связываются с увеличением глубины инфильтрации растворов с ростом сезонно-талого слоя почвы, что определяет сорбцию РОУ в почвенной толще и его микробиологическую деструкцию. Возрастание площадей и интенсивности пожаров в результате потепления климата определяет существенную трансформацию латерального стока углерода. При этом наблюдаемое сокращение стока рек в результате усиления пирогенного фактора будет определять общее снижение транспорта терригенного углерода из наземных ландшафтов.

Ключевые слова: углерод, латеральный сток, водотоки разных порядков, пожары, Среднесибирское плоскогорье.

DOI: 10.15372/SJFS20240307

ВВЕДЕНИЕ

Лиственничные леса занимают значительную часть территории Северной Евразии и приурочены к зоне распространения многолетне-мерзлых пород (Зырянова и др., 2008; Abaimov,

2010; Kirdeyanov et al., 2020; Prokushkin et al. 2021). Вследствие своих масштабов и экофизиологических особенностей они играют значимую роль как в континентальном гидрологическом цикле, так и в глобальном круговороте углерода (Vygodskaya et al., 1997; Ольчев и др., 2022;

© Прокушкин А. С., Гейс Т. Н., Колосов Р. А., Корец М. А., Панов А. В., Полосухина Д. А., Прокушкина М. П., Титов С. В., Токарева И. В., Сиденко Н. В., Шамонина Ю. В., Прокушкин С. Г., 2024

Ol'chev et al., 2022). В деятельном слое почв и мерзлоте экосистем высоких широт сосредоточены около 50 % мирового почвенного органического углерода, а также существенные запасы элементов минерального питания (Tarnosai et al., 2009; Hugelius et al., 2014, 2020). Таким образом, понимание роли листовничников в регулировании регионального климата и циклов элементов становится все более актуальным по мере повышения температур воздуха, деградации мерзлоты и смещения растительных зон к северу (Tchebakova et al., 2009).

Латеральный сток углерода из наземных ландшафтов в конечные водоемы стока через гидрографическую сеть представляет собой один из ключевых связующих элементов глобального цикла углерода. Более того, расчет баланса углерода наземных биогеоценозов требует учета экспорта терригенного углерода за пределы ландшафта, что не рассматривается в применяемых методиках оценки поглощений парниковых газов, включая метод турбулентных пульсаций (Куричева и др., 2023). Следует подчеркнуть, что существующая программа гидрохимического мониторинга системы Росгидромета, включающая определение концентраций и стока неорганического (гидрокарбонат-ион) и органического (ХПК) углерода имеет ряд существенных недостатков, а именно: расположение постов на крупных водотоках, использование устаревших методик (бихроматная окисляемость) и продолжительное время между отбором проб и их анализом. Таким образом, создание системы мониторинга латеральных потоков углерода из наземных ландшафтов в водотоки и водоемы на основе современных инструментальных измерений является необходимой и крайне важной задачей.

Углерод в пресноводных системах (речная сеть, болота, водохранилища, озера и пр.) может быть представлен растворенным и взвешенным органическим и неорганически углеродом. Образование каждой из этих форм в наземных ландшафтах, их миграция и трансформация в пресноводных системах требует детальных количественных и качественных оценок с учетом сезонности гидрологических и биогеохимических процессов, разнообразия природно-климатических условий и нарушений растительного покрова в результате пожаров и рубок.

Латеральный (гидрологический) экспорт углерода в бореальных и тундровых биомх варьируется в течение гидрологического года с преобладанием в годовом стоке периода весеннего половодья (Finlay et al., 2006; Prokushkin A. S.

et al., 2011; Holmes et al., 2012). Изменения количественного и качественного состава стока растворенного органического углерода (РОУ) и неорганического (РНУ) в течение года обусловлены изменением источников питания рек, что связано с динамикой глубины сезонно-талого слоя – деятельного слоя почвы (MacLean et al., 1999; Prokushkin et al., 2007). Анализ оптических и флуоресцентных параметров РОУ (McKnight et al., 2001; Weishaar et al., 2003) широко используется для разделения вклада в ежегодный сток его отдельных источников в наземных экосистемах. Специфические биомаркеры, например такие, как лигнин, характеризующие сигналы органического вещества растительности и его трансформации в почве, дают еще более детальное представление о процессах формирования латерального стока углерода в наземных экосистемах (Amon et al., 2012). Растворенный черный (пирогенный) углерод (BC) представляет собой еще один важный маркер, позволяющий диагностировать пожарные нарушения на речных бассейнах (Guggenberger et al., 2008; Myers-Pigg et al., 2015).

Роль рек не исчерпывается транзитом вещества, поступающего в них из наземных ландшафтов. Так, по существующим оценкам конечных водоемов стока может достигать менее 20 % растворенного органического вещества, поступающего из почв в русловой сток (Drake et al., 2018), а гидрографическая сеть представляет собой «биореактор», в котором происходит трансформация и, в конечном итоге, минерализация терригенного органического вещества до CO_2 и CH_4 (Гончарова и др., 2023; Goncharova et al., 2023). Вследствие этого пресные воды, как правило, перенасыщены («oversaturated») парниковыми газами и характеризуются значительным эмиссионным потоком с поверхности их водного зеркала. Таким образом, в задачи мониторинга латерального стока углерода необходимо включение инструментальных измерений как концентраций CO_2 и CH_4 в водных объектах, так и эмиссионных потоков с их поверхности.

На базе Эвенкийского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) (п. Тура) проводятся многолетние круглогодичные исследования внутрисезонных и межгодовых флуктуаций концентраций углерода в гидрографической сети Среднесибирского плоскогорья с целью интеграции значений латерального стока в расчеты его баланса в наземных экосистемах и определения источников на основе качественных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования латеральных потоков углерода на территории Среднесибирского плоскогорья (плато Сиверма) проводятся с 1998 г. на базе Эвенкийского опорного экспедиционного пункта ИЛ СО РАН (п. Тура Эвенкийского муниципального района Красноярского края ($64^{\circ}17'$ с. ш., $100^{\circ}11'$ в. д.)) (рис. 1).

Среднесибирское плоскогорье включает в себя обширную трапповую провинцию, сформированную на границе пермского и триасового периодов (248–252 млн л. н.) в результате длительного излияния лав.

Лавовое плато Сиверма имеет специфический характер рельефа: частое чередование плотных лавовых покровов с туфами обуславливает резко выраженную ступенчатость склонов, причем плоские поверхности ступеней сложены плотными лавами, а уступы образованы подстилающими их туфами (Кушев, Леонов, 1964). Территория имеет густое и глубокое расчленение (150–700 м) параллельно вытянутыми в юго-восточном направлении долинами рек Виви, Таймура, Ямбукан, Тембенчи, Эмбенчи-

ме, Кочечум и др. Поверхность рассматриваемой территории представляет собой средневысокое плато с наибольшей абсолютной отметкой (1331 м н. у. м.) в верховьях р. Тембенчи.

Климат. Район имеет резко континентальный климат, согласно классификации Кёппена – Dfc, холодный (континентальный), без сухого сезона, с холодным летом. По данным метеостанции в п. Тура, среднемноголетняя (1928–2023 гг.) температура воздуха в январе составляет -35.7°C , а июля 16.7°C . За период наших исследований (с 1998 по 2023 г. включительно) отмечается рост среднемесячных температур относительно всего периода метеонаблюдений: в зимние месяцы от 0.2°C в декабре и до 1.8°C в феврале, в мае и июне – на 1.1 и 1.7°C , в июле и августе – на 0.5 и 0.6°C (рис. 2).

Максимальный прирост температур приходится на март (2.3°C). Среднегодовое значение температуры воздуха за весь период составляет -8.7°C , а в 1998–2023 гг. -7.6°C . Расчеты аномалий среднегодовой температуры воздуха относительно двух базовых периодов (1961–1990 и 1991–2000 гг.) представлены на рис. 3. В 1998–2023 гг. наблюдался прирост среднегодовых температур со скоростью $0.11^{\circ}\text{C}/\text{год}$

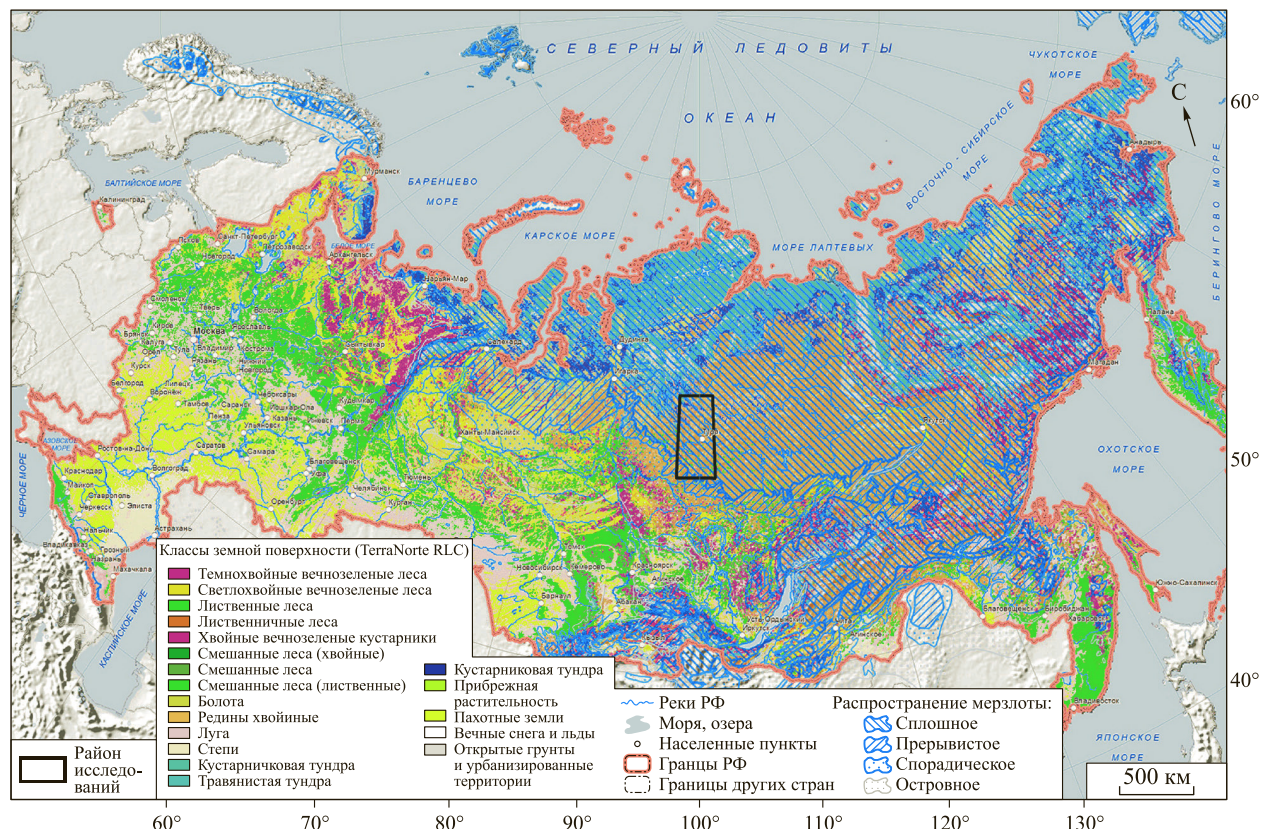


Рис. 1. Карта растительного покрова и распространения многолетней мерзлоты на территории Российской Федерации с выделенной территорией охвата исследований.

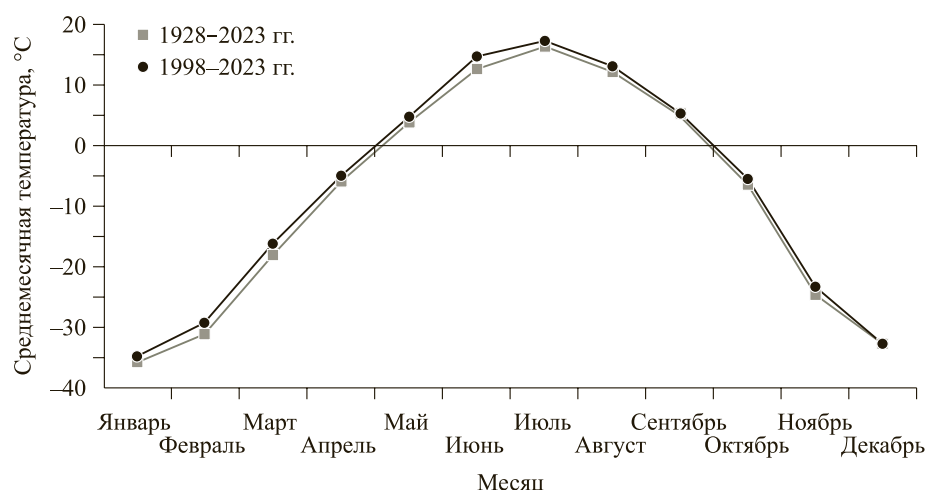


Рис. 2. Среднемесячная температура воздуха в периоды инструментальных наблюдений (1928–2023 гг.) и исследований коллектива (1998–2023 гг.) на метеорологической станции Тура.

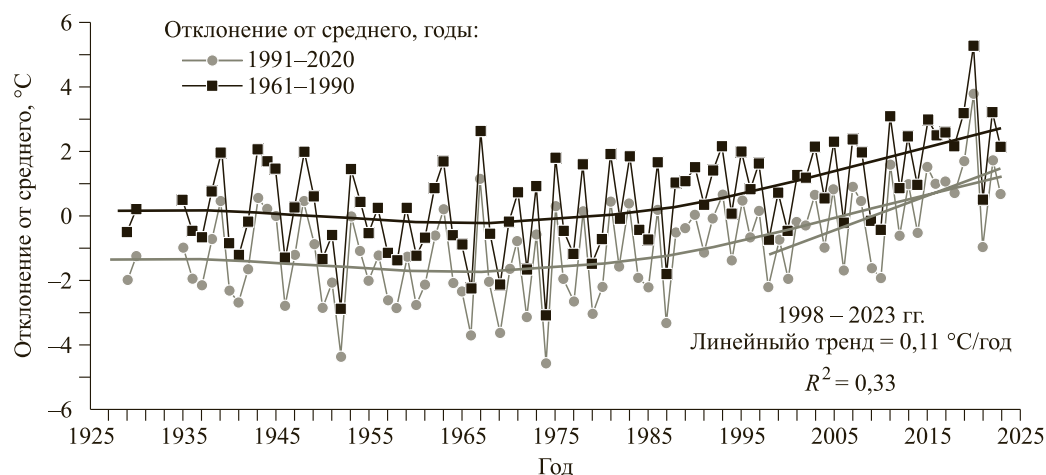


Рис. 3. Аномалии среднегодовой температуры воздуха по данным наблюдений на метеорологической станции Тура относительно двух базовых периодов – 1991–2020 и 1961–1990 гг. На рисунке приведен тренд среднегодовой температуры воздуха для периода исследований латеральных потоков углерода на Эвенкийском стационаре (1998–2023 гг.).

(или 1.1 °C/10 лет). Среднеголетняя сумма годовых осадков составляла 363 и 371 мм за периоды 1928–2023 и 1998–2023 гг. соответственно. На вегетационный период (май – сентябрь) приходится около 66 % (240 мм) выпадающих осадков за год и без существенных изменений за последние 25 лет.

Распределение по месяцам претерпело некоторые изменения, а именно, в мае и августе отмечается рост осадков (4.6 и 5.8 мм соответственно), при снижении их количества в июле, августе и сентябре (на 3.5, 3.5 и 0.5 мм).

Гидрологический режим. Для рек района исследований характерен снеговой тип питания. Так, на весеннее половодье (май–июнь) у р. Нижняя Тунгуска (гидрологический пост

«Тура» Среднесибирского УГМС) приходится 66 % годового стока при межгодовой вариации от 51 до 88 % за 1939 – 2023 гг. (рис. 4). Речной сток в период открытой воды (с июля по октябрь) составляет 32 % (10–48 %) от годового, а на зимнюю межень (ноябрь – апрель) приходится лишь около 2 % (1–10 %). Среднеголетний годовой сток р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура, согласно данным гидрологического поста, составляет 55 км³/год (37–92 км³/год) – около 50 % от стока реки в ее устьевой части (створ Большой порог – 110 км³/год).

Растительный и почвенный покров. Растительный покров Среднесибирского плоскогорья имеет четко выраженную широтную зональность от высокогорных тундр северной части

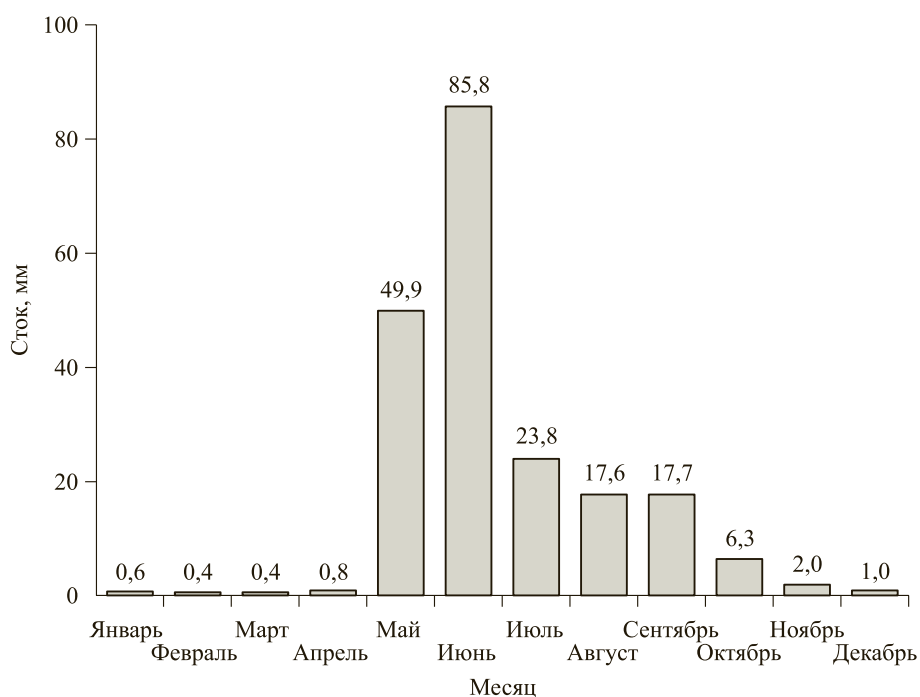


Рис. 4. Среднеголетние значения распределения годового стока по месяцам для р. Нижняя Тунгуска за 1939–2023 гг. согласно наблюдениям на гидрологическом посту «Тура» Среднесибирского УГМС.

до темнохвойных насаждений средней тайги на юге. Район проводимых нами исследований согласно зонированию растительного покрова России (Огуреева и др., 1999) относится к Среднесибирской гипоарктической (таежной) зоне – редколесно-таежный (ольховые, багульниково-зеленомошные леса – лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), заросли ольховника). На лесопокрытую площадь приходится около 80 % всей территории. Наиболее распространены такие группы типов леса, как лишайниковая, кустарничково-моховая, сфагновая. Реже встречаются толокнянковая, зеленомошная и вейниковая. Главной лесообразующей породой является лиственница Гмелина, с существенно меньшим вкладом – сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), березы повислая (*Betula pendula* Roth) и белая (*B. alba* L.). Из кустарников, формирующих самостоятельные фитоценозы, следует отметить ольху кустарниковую (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar), березу карликовую (*Betula nana* L.s.l.), виды рода ив (*Salix* L.). В живом напочвенном покрове преобладают вересковые кустарнички и сплошной мохово-лишайниковый покров.

Суровые климатические условия определяют широкое распространение многолетней мерзлоты, наблюдающуюся как в покровных четвертич-

ных отложениях (ледниковые, водно-ледниковые, аллювий надпойменных террас), так и коренных породах (нижнетриасовые образования траппового комплекса, представленные туфами и базальтами). Распространение мерзлоты в бассейнах рек варьирует от повсеместно сплошного (например, реки Кочечум, Виви, Ямбухан) и от сплошного на севере до прерывистого и островного на юге бассейна р. Нижняя Тунгуска.

Почвообразующими породами на рассматриваемой территории являются преимущественно переотложенные и перемешанные криодинамическими и склоновыми процессами продукты выветривания лавового комплекса, имеющие разные генезис (делювиально-солифлюкционный, флювиогляциальный, аллювиальный) и гранулометрический состав (мелкоземисто-глыбовый, мелкоземисто-гравийно-галечниковый, от супесей до суглинков и глин) (Ершов, 1995). Почвенный покров в пределах изучаемых водосборных бассейнов мозаичен, варьируя от подбуров грубогумусных (глубина сезонно-талого слоя (СТС) > 1 м) на хорошо прогреваемых и дренируемых склонах южных экспозиций до мало мощных криоземов глееватых (СТС < 0.3 м) на склонах северных экспозиций и торфяных олиготрофных мерзлотных почв на выположенных или пониженных участках рельефа (Старцев и др., 2017; Startsev et al., 2017).

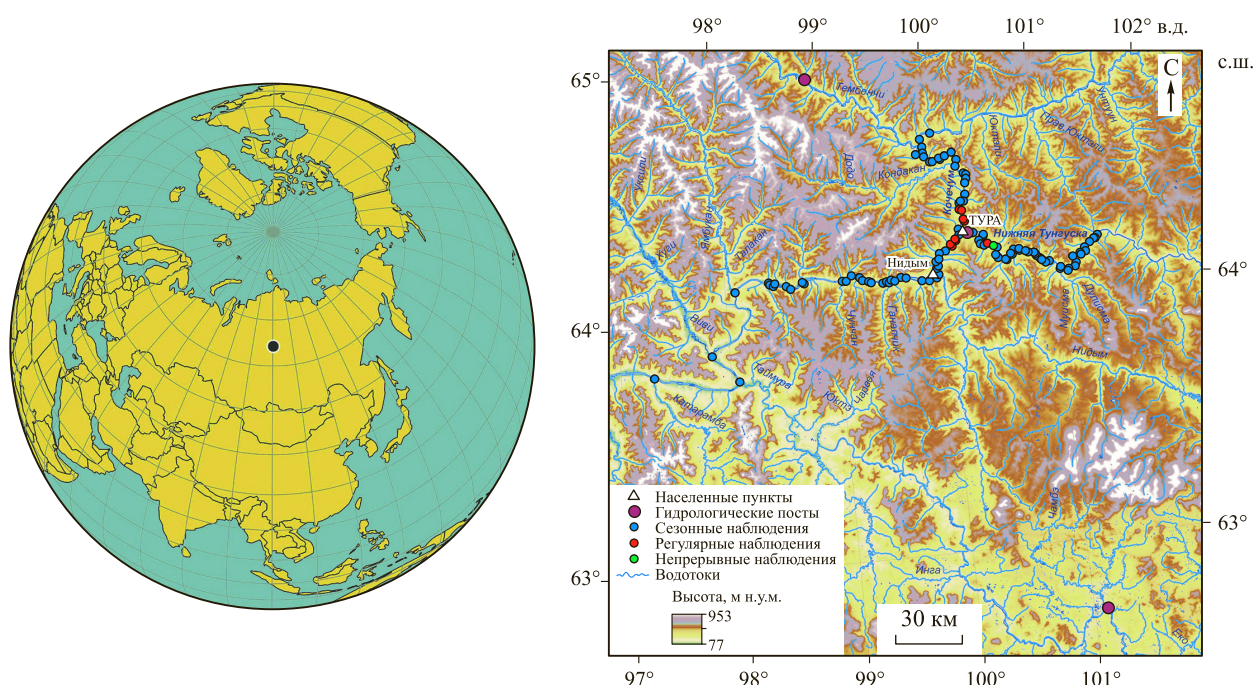


Рис. 5. Карта-схема точек размещения постов мониторинга в устьевых частях водотоков разных порядков среднего течения бассейна р. Нижняя Тунгуска.

Лесные пожары представляют собой основной дестабилизирующий фактор функционирования лиственных экосистем Сибири. Для территории исследований (64° с. ш.) V. I. Kharuk и соавт. (2011) приводят межпожарный интервал в 82 ± 7 лет. Сроки восстановления лесных биогеоценозов и гидротермического (мерзлотного) режима почв после воздействия пожаров по разным оценкам варьируют от 50 до 100 лет (Knorre et al., 2019; Kirdyanov et al., 2020).

Объекты исследования. Объектами исследования являются в общей сложности более 100 водотоков разных порядков, бассейны которых расположены в среднем течении р. Нижняя Тунгуска (рис. 5).

Размер бассейнов варьирует от первых сотен квадратных метров у временных водотоков верховий водосборных бассейнов до 268 000 км² у р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура. В качестве примера на рис. 6 приведена зависимость длины исследуемых водотоков от площади их водосборного бассейна.

В настоящей работе обобщены результаты мониторинга латерального стока углерода с 2006 по 2023 г., который проводился на основе 4 алгоритмов:

1. Массовое опробывание вод водотоков разных порядков в отдельные фазы гидрологического цикла: весеннее половодье, летняя межень, осенний период повышенного стока (> 90 водотоков) (рис. 6);

2. Регулярное опробывание рек Нижняя Тунгуска, Тембенчи, Таймура на гидрологических постах Среднесибирского УГМС и р. Кочечум (каждые 5–7 дней в период открытой воды и ежемесячно при ледоставе) (рис. 6).

3. Регулярное опробывание в период открытой воды малых водотоков (ручьи 5, 6, 9, 10, 11, 13, 14, 19 и 20), характеризующих разные стадии послепожарной сукцессии (каждые 5–7 дней) (рис. 7, а).

4. Квазинепрерывные наблюдения в период открытой воды с помощью логгеров-регистраторов (частота измерений физико-химических па-

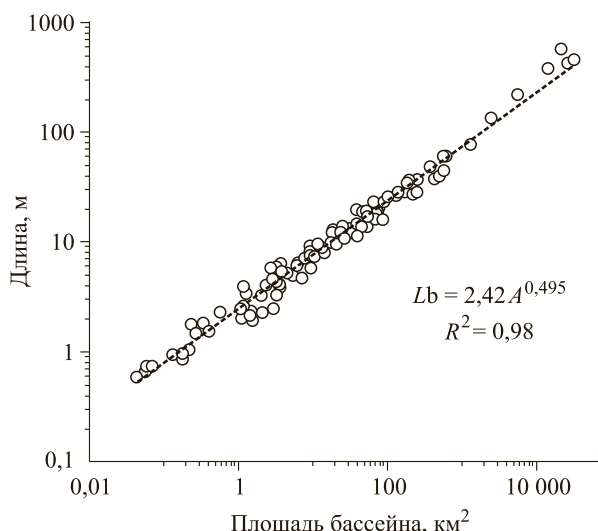


Рис. 6. Зависимость длины водотока (L_b) от площади бассейна (A) для тестовых водотоков разного порядка.

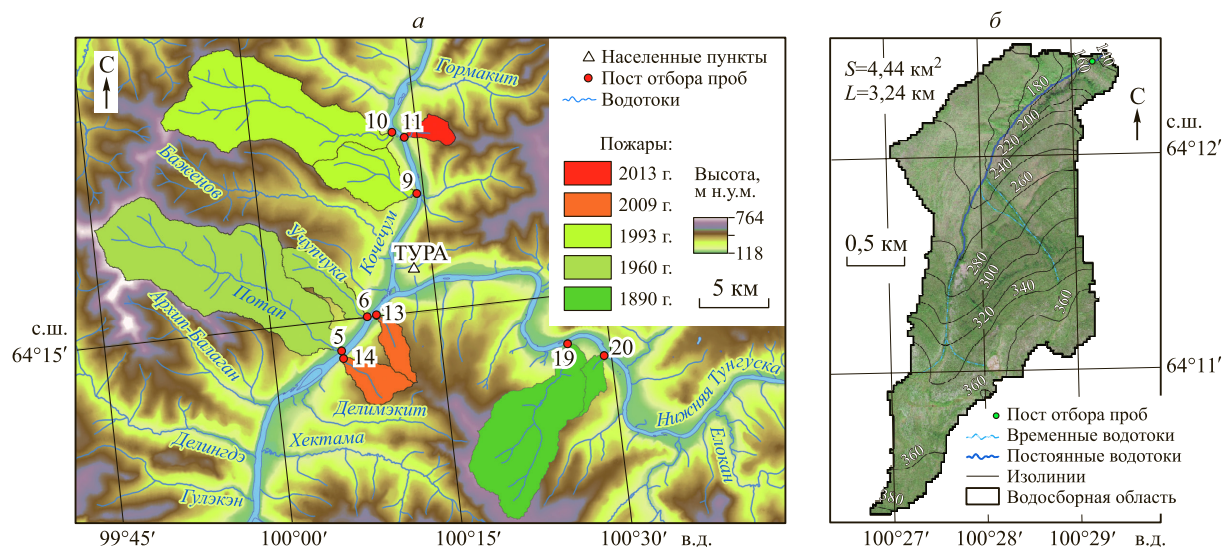


Рис. 7. Карта-схема водосборных бассейнов и постов мониторинга в устьевых частях водотоков, дренирующих водосборные бассейны, представляющие разные стадии послепожарной сукцессии (а) и бассейн условно контрольного водотока 20 (2-го порядка) с квазинепрерывными наблюдениями с помощью логгеров-регистраторов (б).

раметров 15 мин – 1 ч) на условно контрольном водотоке 2-го порядка (руч. 20, рис. 7, б).

Анализ форм углерода в речном стоке.

Опробывание вод осуществляется с глубины 10–20 см. Фильтрация образцов проводится, как правило, *in situ* через стекловолоконный фильтр GF/F (номинальный размер пор 0.7 мкм). До проведения анализов образцы хранятся в замороженном состоянии (при -18°C).

Концентрации растворенного органического и неорганического углерода определяются в лаборатории на элементном анализаторе TOC vario cube (Elementar, Германия). Значения РОУ получены в режиме неотдуваемого органического углерода (NPOC). Аналитическая ошибка определения составляет, как правило, около 5 % для диапазона концентраций (1–5 мг С/л) и < 2 % при > 5 мг С/л.

Спектральные свойства растворенного органического вещества речного стока исследовались на спектрофотометре УФ-вид Cary 100 (Agilent, США). Спектр поглощения растворов получен для диапазона 800–200 нм в толщине слоя 1 см (кварцевая кювета). В результате рассчитаны такие показатели, как удельное поглощение в УФ-области (SUVA, оптическое поглощение на длине волны 254 нм в слое 1 м, нормализованное на концентрацию РОУ, л/(м · мгС)) и спектральное отношение (SR, отношение углов наклона логарифмически преобразованных величин коэффициентов поглощения в двух областях спектра – $S_{275-295} : S_{350-400}$) (McKnight et al., 2001; Weishaar et al., 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрология. Водное питание гидрографической сети формируется из атмосферных осадков, почвенных растворов и грунтовых вод. В условиях криолитозоны многолетняя мерзлота выступает в качестве барьера инфильтрации растворов, что определяет доминирование в гидрографе рек вклада атмосферных осадков и почвенных растворов, доля которых диктуется динамикой глубины СТС и эвапотранспирационными потерями. Важную роль в годовом стоке, особенно малых водотоков, играют штормовые атмосферные осадки, формирующие резкие пики водности в течение безморозного периода (рис. 8). В летнюю межень в годы с дефицитом осадков отмечается полное прекращение стока у водотоков низких порядков (до 3-го включительно), как показано на примере 2019 г. у водотока 20 на рис. 8. В осенний период наблюдается повышение водности водотоков всех порядков, что обусловлено в первую очередь снижением эвапотранспирационных потерь при переходе растительности в состояние покоя и понижением температур воздуха.

У подавляющего большинства малых рек (площади бассейна < 100 км²) в районе исследований отсутствует зимний сток в силу сплошного распространения мерзлоты на их бассейнах. При этом наличие стока и формирование наледей в зимний период являются индикатором развития сквозных таликов и питания водотоков

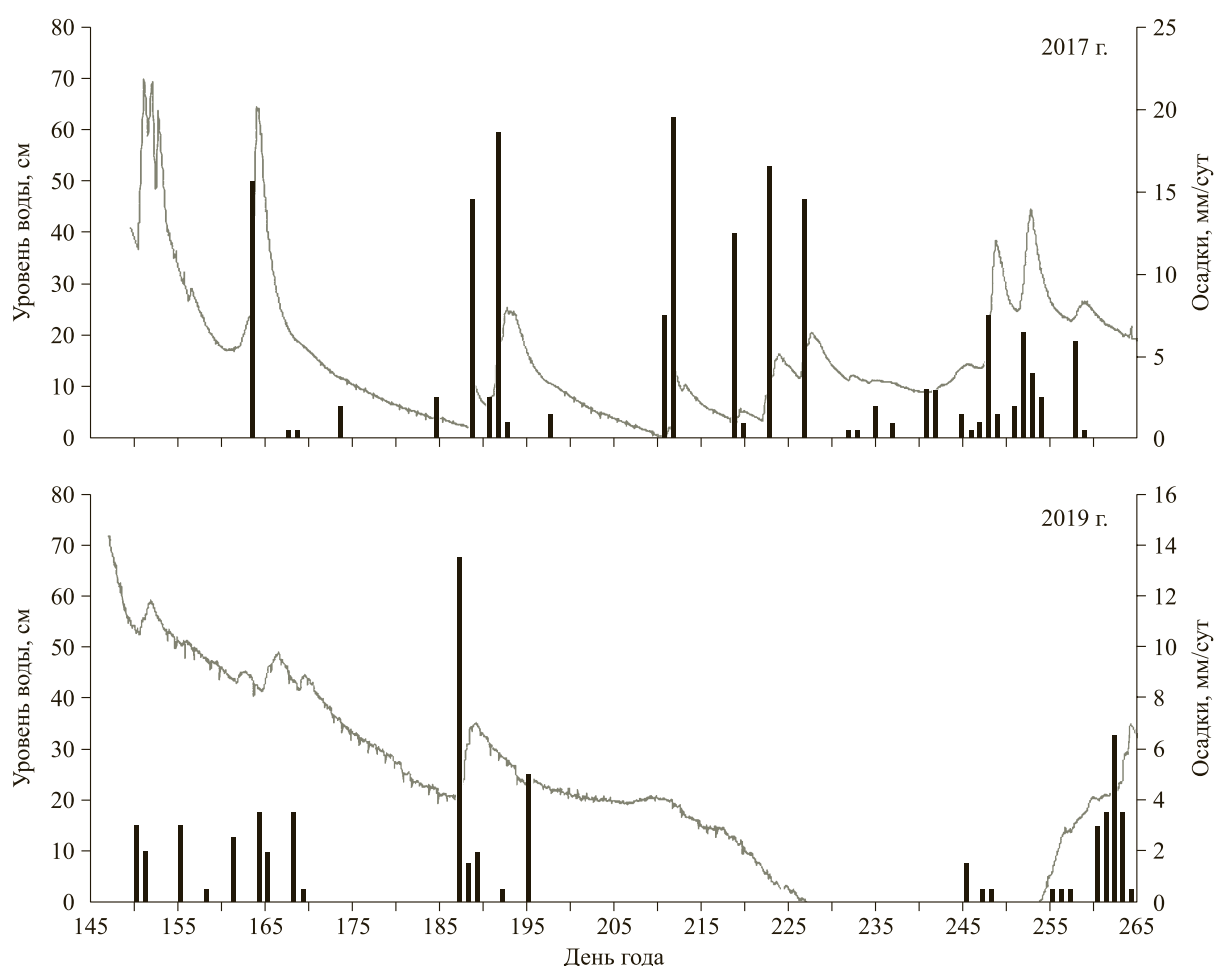


Рис. 8. Уровень воды в условно контрольном водотоке 20 и количество осадков, зарегистрированных на микрометеорологической мачте сети KrasFlux (KR-Tur), в контрастные по гидротермическим условиям 2017 и 2019 гг. (с 25 мая по 22 сентября).

сильноминерализованными водами (рассолами) эвапоритов, залегающих под чехлом изверженных и осадочных пород (Bagard et al., 2011; Parham et al., 2013).

Гидрологические исследования рек бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО) установили значительное увеличение стока по всей Панарктике с начала XX в. (Peterson et al., 2002; Ahmed et al., 2020), что объясняется интенсификацией гидрологического цикла (Rawlins et al., 2010). Полученные оценки роста речного стока евразийских рек в СЛО ($2.0 \pm 0.7 \text{ км}^3/\text{год}$ за 1936–1999 гг. (Peterson et al., 2002) позволяют прогнозировать долгосрочные изменения как гидрологического режима рек субарктических регионов, так и транспорта растворенного вещества (Tank et al., 2023). Для гидрологического поста «Тура» на р. Нижняя Тунгуска за весь период инструментальных наблюдений (1939–2023 гг.) также выявлен тренд возрастания годового стока реки со скоростью $0.25 \pm 0.05 \text{ км}^3/\text{год}$,

однако с тенденцией к его снижению или стабилизации в последние 25 лет (рис. 9).

Сходные закономерности отмечены для р. Енисей, вторым по величине притоком которого является р. Нижняя Тунгуска, а также р. Лена (Tank et al., 2023). Снижение стока рек Среднесибирского плоскогорья в последние два десятилетия может объясняться возрастанием площадей и интенсивности пожаров на этой территории (Ponomarev et al., 2020), поскольку эти параметры характеризуются значимой корреляцией с внутрисезонными и межгодовыми минимумами речного стока (Ponomarev et al., 2019).

Латеральный сток углерода. Распространение многолетнемерзлых пород на водосборных бассейнах оказывает ключевое влияние не только на гидрологический режим рек, но и на органическую и неорганическую гидрогеохимию региона исследований и Субарктики в целом. Многолетняя сезонная динамика речного стока и концентраций РОУ и РНУ приве-

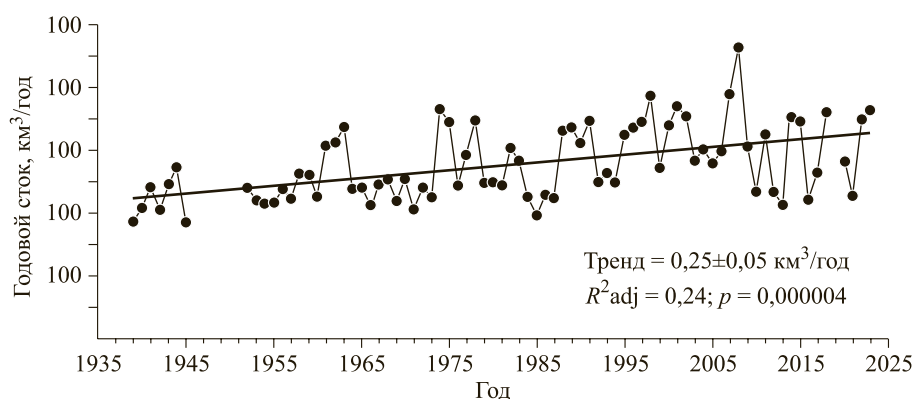


Рис. 9. Годовой сток р. Нижняя Тунгуска согласно наблюдениям на гидрологическом посту «Тура» Среднесибирского УГМС с 1939 по 2023 г.

дена на примере р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура на рис. 10.

Глубина залегания водонепроницаемого слоя мерзлоты обуславливает приуроченность источников питания рек к определенным горизонтам почв и/или горных пород. Так, при снеготаянии в весеннее половодье с минимальной инфильтрацией вод в почвы формирование реч-

ного стока происходит преимущественно в ее поверхностных слоях, богатых органическим веществом, что вызывает как резкое возрастание расходов воды, так и пиковые значения концентрации РОУ (рис. 10).

Обратная картина характерна поведению РНУ (рис. 10) и прочих неорганических соединений, концентрации которых минимальны

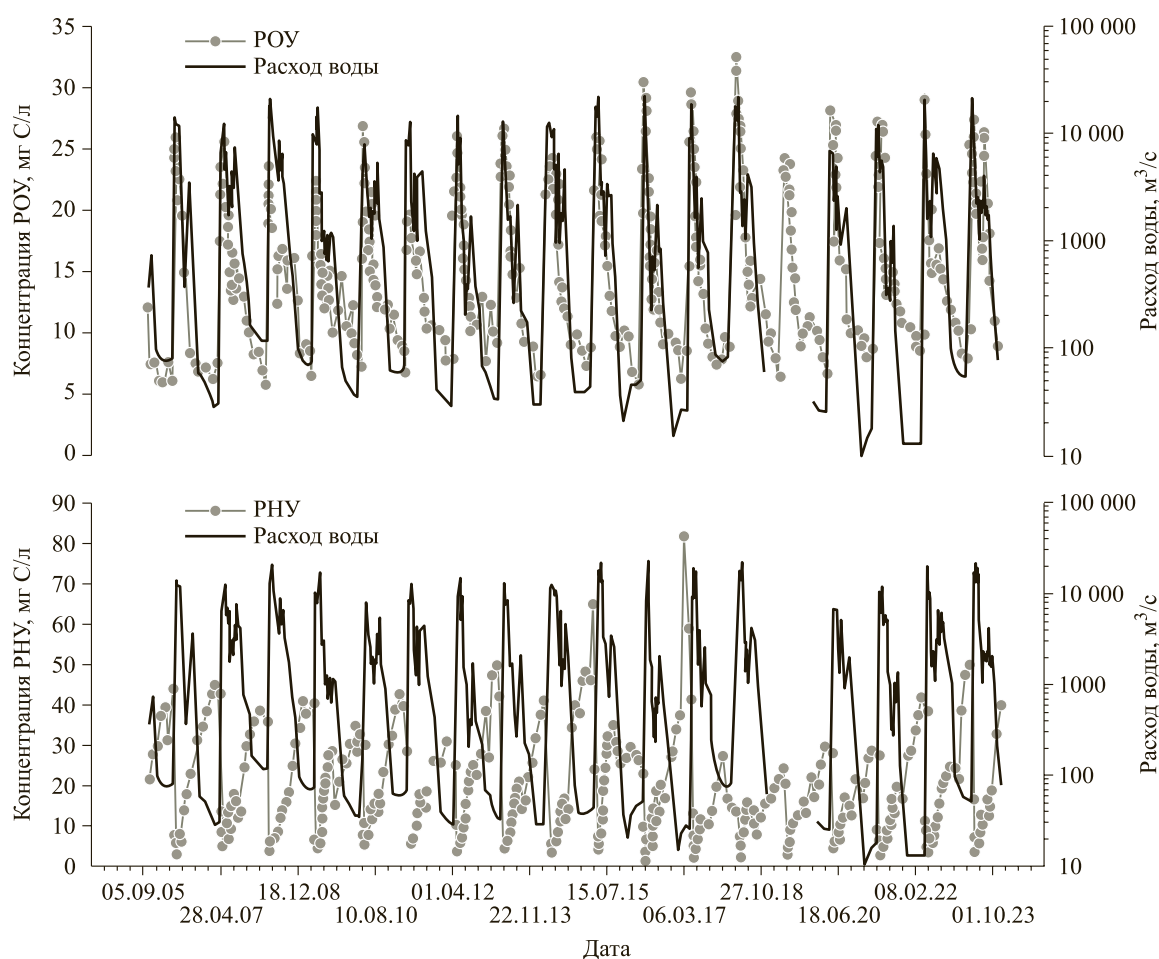


Рис. 10. Многолетний расход воды и концентрации РОУ и РНУ в стоке р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура с 2005 по 2023 г.

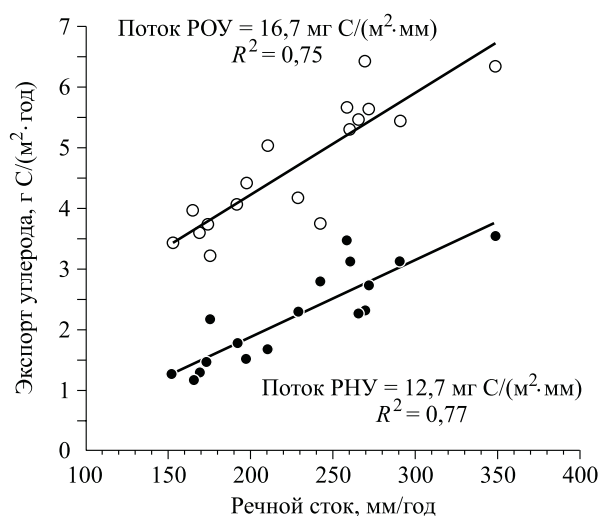


Рис. 11. Зависимость экспорта РОУ и РНУ с водосборного бассейна р. Нижняя Тунгуска от годового стока воды (2006–2023 гг.).

в эту фазу. Последующий рост мощности СТС в течение безморозного периода, определяя увеличение глубины инфильтрации растворов, время их удержания в почвенном профиле и возрастающие эвапотранспирационные потери воды, обуславливает постепенное снижение расходов воды и концентрации РОУ в речных водах и, наоборот, рост РНУ и прочих неорганических ионов. В зимний период для крупных водотоков, имеющих круглогодичный сток, таких как реки Нижняя Тунгуска, Кочечум, Таймура и т. д., характерны наименьшие концентрации РОУ и повышенные уровни РНУ, что связано с питанием подмерзлотными сильно минерализованными водами (Bagard et al., 2011; Kolosov et al., 2016).

Суммарный годовой экспорт углерода с бассейна р. Нижняя Тунгуска в точке мониторинга (створ в районе п. Тура, площадь дренируемой территории 268 000 км² (57 % всего бассейна)) за период наблюдений (2006–2023 гг.) варьировал от 3.22 до 6.44 гC/(м²·год) в случае РОУ и от 1.19 до 3.48 гC/(м²·год) для РНУ. Согласно проведенным оценкам, рост экспорта РОУ с бассейнов исследуемой территории на 1 мм прироста стока составляет около 17 мгC/(м²·год), для РНУ – около 13 мгC/(м²·год) соответственно (рис. 11).

Для рек, дренирующих северную часть Среднесибирского плоскогорья, таких как Тембенчи, Кочечум, Ямбухан и др., выявлены существенно более низкие уровни концентраций обеих форм растворенного углерода и количества их латерального стока, что уже показано нами ранее (Prokushkin A. S. et al., 2011). Полученные закономерности позволяют судить о лимитиро-

вании экспорта терригенного углерода из наземных ландшафтов исследуемой территории следующими факторами:

1 – ограничением по источникам в северной части Среднесибирского плоскогорья, вследствие низких температур бассейнам характерны:

а) низкая продуктивность растительного покрова и небольшие запасы потенциально мобилизуемого органического углерода;

б) замедленные скорости выветривания горных пород и незначительный пул почвенного неорганического углерода (гидрокарбонат-иона);

2 – ограничением по транспорту в восточной части Среднесибирского плоскогорья, низкие значения мобилизации доступных запасов обеих форм растворенного углерода определяются уменьшением количества осадков в условиях резко континентального климата.

Отдельным вопросом проводимых исследований является оценка количественных и качественных изменений, наблюдающихся в составе растворенного углерода в водотоках разных порядков, включая оценку влияния, которое оказывает пожарное воздействие на их бассейны. В последнем случае рассматривается и роль постпирогенного восстановления растительного покрова, изменений гидротермического режима почвы, динамики глубины сезонно-талого слоя, многолетней мерзлоты. На основе массового опробывания водотоков разных порядков, дренирующих бассейны с разной пожарной историей, в наиболее контрастные фазы гидрологического цикла (весеннее половодье и летняя межень) выявлено снижение концентраций РОУ и рост РНУ с увеличением площади водосборного бассейна и соответственно порядка водотока (рис. 12, а, б).

Наиболее выражены эти различия в период летней межени, что отражает рост вклада почвенных и подмерзлотных грунтовых вод в питание водотоков более крупных порядков.

Помимо изменения источников питания можно рассматривать также и ряд иных факторов, влияющих на количественные характеристики латерального стока углерода. Так, необходимо отметить возрастающую долю нарушенных площадей на территории бассейнов в результате пожаров (Ponomarev et al., 2019, 2020), что сказывается на снижении стока терригенного РОУ и, наоборот, на увеличении РНУ. С другой стороны, по существующим оценкам конечных водоемов, сток достигает лишь часть растворенного органического вещества, поступающего из почв в русловую сток, что обуслов-

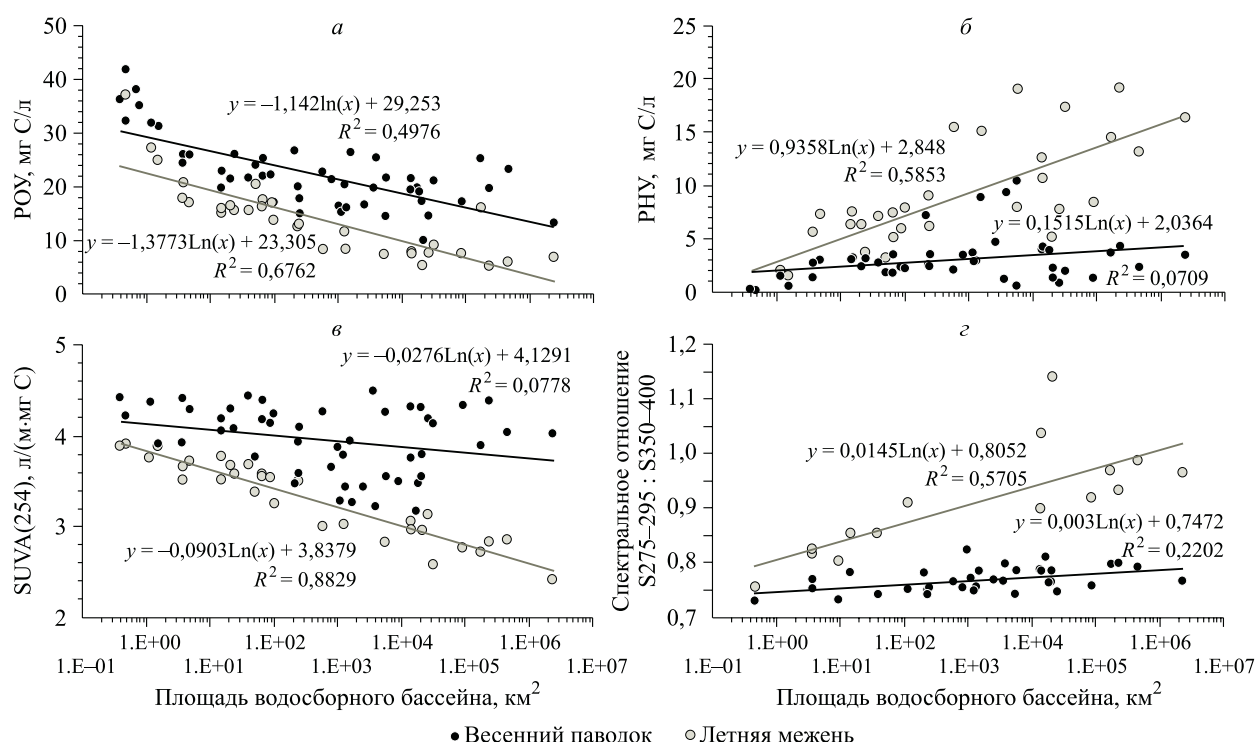


Рис. 12. Количественные и качественные характеристики растворенного углерода руслового стока рек разного порядка в зависимости от площади их водосборного бассейна: концентрации POY (а), PHU (б), спектральные характеристики POY – ароматизация (SUVA, в) и спектральное отношение (г).

лено возрастающей долей минерализованного терригенного органического вещества до CO_2 и CH_4 в процессе его транспорта в лотических системах. В результате наблюдается, как правило, перенасыщение вод (oversaturation) парниковыми газами и значительные эмиссионные потоки с поверхности водного зеркала, как это показано и в других ландшафтах Субарктики (Гончарова и др., 2023; Goncharova et al., 2023).

Качественный состав POY также претерпевает значительные изменения (параметры SUVA и SR), как в зависимости от фазы гидрологического цикла, так и размера речного бассейна. Формирование стока в весеннее половодье в богатых органическим веществом горизонтах почвы отражается на повышенных уровнях содержания ароматических (SUVA ~ 4 л/(м·мгС)), высокомолекулярных (SR < 0.8) органических соединений, свидетельствующих о поступлении в гидрографическую сеть условно «свежего» органического углерода. В летнюю межень в результате увеличения глубины СТС в гидрографическую сеть из наземных ландшафтов выносятся более трансформированное органическое вещество, о чем свидетельствует снижение ароматизации (до значений SUVA = 2.4 л/(м·мгС)) и молекулярной массы (до значений SR > 1.0). Как и в случае с количественными характери-

стиками, наиболее выраженные различия между бассейнами в качественном составе POY наблюдаются в период летней межени. В целом увеличение времени удержания POY в почвенном профиле ввиду его более глубокой инфильтрации и повышения доли адсорбированного С на минеральной матрице почвы определяет как рост его потерь в результате деструкции, так и продуцирование и экспорт почвенного углерода микробиологического происхождения. Вместе с тем пониженные значения ароматизации и молекулярного веса POY в водотоках крупных порядков могут свидетельствовать не только о поступлении сильно трансформированного аллохтонного POY (т. е. углерода терригенного происхождения), но также и о возрастающей роли автохтонного углерода, продуцируемого в водных экосистемах. Для оценки вклада этих форм углерода необходимо дальнейшее исследование специфических биохимических маркеров, характерных тем или иным звеньям пищевой цепи лотических систем.

Влияние пожарного воздействия на латеральный сток углерода исследуется на примере малых водотоков, дренирующих бассейны, находящиеся на разных стадиях послепожарной сукцессии – полностью пройденных пожаром в 2013 (11), 2009 (13, 14), 1993 (9, 10), 1960 (5, 6) и

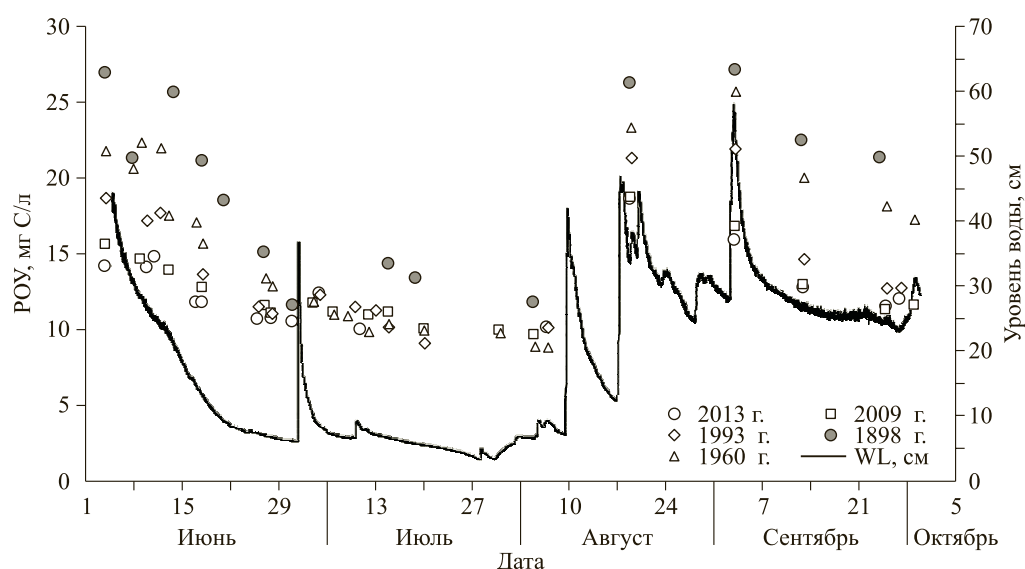


Рис. 13. Сезонная концентрация РОУ в стоке ручьев, дренирующих водосборные бассейны, полностью пройденные пожаром 1 (2013 г.), 5 (2009 г.), 21 (1993 г.), 54 (1960 г.) и 106 (1898 г.) лет назад на момент опробывания вод в 2014 г.

1898 гг. (19, 20 – условно контрольные). Следует отметить, что с 2006 по 2012 г. контрольным (> 100 лет после пожарного воздействия) водотоком был ручей 11, однако в 2013 г. его водосборный бассейн пройден пожаром, что, в свою очередь, позволило охарактеризовать непосредственное влияние пожара на поведение растворенного углерода в его стоке.

Результаты проводимого долговременного мониторинга свидетельствуют о резком снижении концентраций РОУ в стоке ручьев, подвергшихся пирогенному воздействию (рис. 13).

Наиболее выражены эти различия в периоды повышенной водности: в весеннее половодье снижение на 40–50 % и в меньшей степени – во время штормовых летних и осенних паводков (на 20–30 %). В меженный летний период наблюдается сужение различий между водотоками до 10–15 %, что наряду с близкими значениями качественного состава (по степени ароматизации и молекулярной массы) указывает на менее выраженное влияние пожаров на пул мобильного органического углерода в минеральной почве.

Восстановление исходных значений латерального стока углерода в форме РОУ и РНУ составляет не менее 60 лет и обусловлено восстановлением растительного покрова и соответственно запасов органического материала на поверхности почвы, а также мерзлотного режима (глубины СТС).

Основными факторами, оказывающими влияние на среднесезонные уровни содержания

РОУ в водотоках после пожарного воздействия, являются запасы органического вещества, аккумулированные в органическом горизонте почвы и глубина сезонно-талого слоя на территории водосборного бассейна. Сгорание мохово-лишайникового покрова и верхнего органического горизонта почв, роль которых особенно выражена в периоды повышенной водности, определяет значительное сокращение запасов органического вещества в пределах бассейнов, и как следствие отражается в снижении среднесезонных концентраций РОУ в дренирующих их водотоках (рис. 14, а).

Обнаруженная обратная зависимость концентраций РОУ от глубины СТС обусловлена, вероятно, в большей степени тесной корреляцией последнего с запасами теплоизолирующего органического слоя и вызванного пожаром его уменьшения и последующими темпами восстановления (Прокушкин и др., 2011, 2021; Prokushkin S. G. et al., 2011, 2021; Palviainen et al., 2020).

Вместе с тем более ранние сроки начала оттаивания почвы и ее более высокая скорость в безморозный период на горях и пожарищах по сравнению с условно контрольными бассейнами, также вносят свой вклад в снижение уровней РОУ в водотоках (рис. 14, б).

Влияние пожаров на концентрации РНУ в водотоках района исследований имеет более сложное поведение, достигая максимальных значений через 20–25 лет после пирогенного воздействия, следуя динамике глубины СТС.

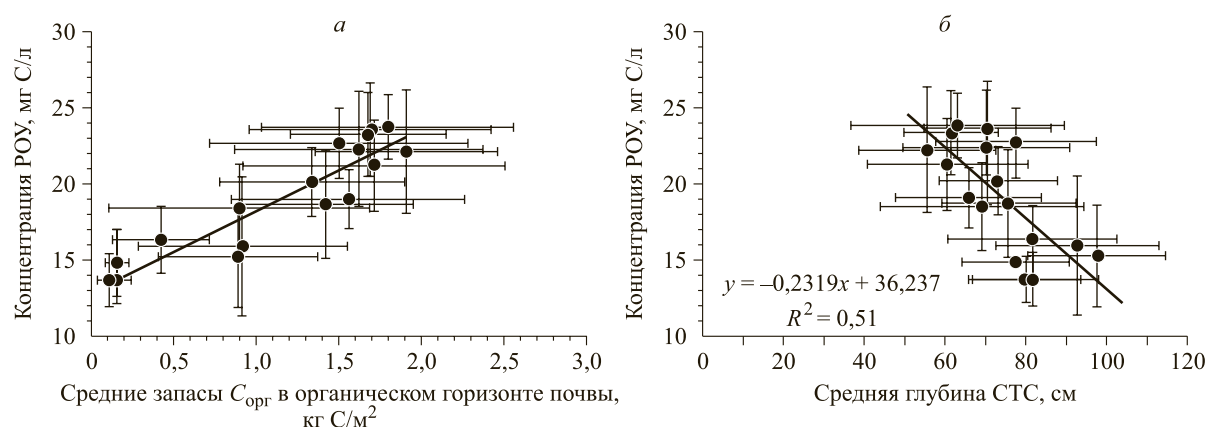


Рис. 14. Зависимость среднесезонной (июнь – сентябрь) концентрации РОУ в водотоках, дренирующих водосборные бассейны с разной пожарной историей (полностью пройденные пожарами от 1 до 118 лет назад), от усредненных для этих бассейнов запасов органического горизонта почвы (а) и глубины сезонно-талого слоя почвы (СТС) (б).

На рисунке данные для отдельного водотока представлены в формате среднее $\pm$ стандартное отклонение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе бюджета углерода наибольшее внимание уделяется его запасам в наземных экосистемах и их обменным потокам парниковых газов с атмосферой. Вместе с тем детализация баланса углерода ландшафтов суши и особенно криолитозоны, где наблюдаются наиболее значимые тренды потепления, требует учета экспорта терригенного углерода за их пределы с латеральным стоком.

Потепление климата оказывает разнонаправленные воздействия на латеральный транспорт углерода. В качестве ключевых можно рассматривать процессы, связанные с деградацией многолетней мерзлоты и повышения почвенных температур.

Рост стока органического углерода прогнозируется как в результате оттаивания богатых $C_{\text{орг}}$ мерзлых толщ, так и увеличения продуктивности растительного покрова, а неорганического углерода – вследствие повышения скоростей выветривания горных пород и секвестрации атмосферного CO_2 .

Увеличение гидрологического транспорта, наблюдаемого в предыдущие десятилетия, остается спорным из-за существующих неопределенностей в прогнозах тенденций количества осадков, распределения их по сезонам года, и изменений в количественных параметрах других вероятных источников питания рек, таких как многолетняя мерзлота. Отрицательные прогнозы поведения РОУ связываются с увеличением глубины инфильтрации растворов с ростом СТС, что определяет сорбцию РОУ в почвенной толще и его минерализацию. Более того, значи-

тельная часть поступающего РОУ может подвергаться минерализации непосредственно в гидрографической сети и эмитироваться в атмосферу с поверхности водного зеркала как в виде CO_2 , так и метана. Прогнозируется возрастание стока углерода в форме РНУ (главным образом, гидрокарбонат-ион) в результате увеличения скоростей выветривания материнских пород и минерализации органического вещества, конечным продуктом которого является РНУ.

С другой стороны, возрастание площадей и интенсивности пожаров в результате потепления климата определяет существенную трансформацию латерального стока углерода. Основными факторами, оказывающими влияние на уровни содержания растворенного углерода в водотоках, после пожарного воздействия, являются снижение запасов органических горизонтов почв и увеличение глубины сезонно-талого слоя. При этом наблюдаемое сокращение стока рек в результате усиления пирогенного фактора будет определять общее снижение транспорта терригенного углерода из наземных ландшафтов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FWES-2024-0023 и реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гончарова О. Ю., Тимофеева М. В., Матышак Г. В. Диоксид углерода в почвенных, грунтовых и поверхностных водах арктических и бореальных регионов: роль, источники, методы определения (обзор) // Почвоведение. 2023. № 3. С. 321–338.
- Ершов Ю. И. Закономерности почвообразования в пределах Среднесибирского плоскогорья // Почвоведение. 1995. № 7. С. 805–810.
- Зырянова О. А., Абаимов А. П., Чихачева Т. Л. Влияние пожаров на лесообразовательный процесс в лиственничных лесах Севера Сибири // Лесоведение. 2008. № 1. С. 3–10.
- Куричева О. А., Авилов В. К., Варлагин А. В., Гитарский М. Л., Дмитриченко А. А., Дюкарев Е. А., Загирова С. В., Замолодчиков Д. Г., Зырянов В. И., Карелин Д. В., Карсанаев С. В., Курганова И. Н., Лапина Е. Д., Максимов А. П., Максимов Т. Х., Мамкин В. В., Марунин А. С., Мигловец М. Н., Михайлов О. А., Панов А. В., Прокушкин А. С., Сиденко Н. В., Шилкин А. В., Курбатова Ю. А. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RUFLUX // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 4. С. 512–535.
- Кушев С. Л., Леонов Б. Н. Рельеф и геологическое строение // Средняя Сибирь. М.: Наука, 1964. С. 23–82.
- Огуреева Г. Н., Микляева И. М., Сафронова И. Н., Юрковская Т. К. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. Карта для высших учебных заведений М 1 : 8 000 000. М.: ЭКОР, 1999. Т. 2. На 2-х л.
- Ольчев А. В., Зырянов В. И., Сатосина Е. М., Фокеев Е. В., Мухартова Ю. В., Новенко Е. Ю., Прокушкин А. С. Сезонная изменчивость потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла в северотаежном лиственничном лесу Средней Сибири по данным пульсационных измерений // Метеорол. и гидрол. 2022. № 10. С. 111–120.
- Прокушкин С. Г., Богданов В. В., Прокушкин А. С., Токарева И. В. Послепожарное восстановление органического вещества в напочвенном покрове лиственничников криолитозоны Центральной Эвенкии // Изв. РАН. Сер. биол. 2011. № 2. С. 227–234.
- Прокушкин С. Г., Зырянова О. А., Прокушкин А. С. Распределение запасов фитомассы и биогенных элементов в древостоях лиственницы Гмелина в Центральной Эвенкии (на примере малого водосборного бассейна) // Изв. РАН. Сер. биол. 2021. № 1. С. 93–102.
- Старцев В. В., Дымов А. А., Прокушкин А. С. Почвы постпирогенных лиственничников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925.
- Abaimov A. P. Geographical distribution and genetics of Siberian larch species // Permafrost ecosystems: Siberian larch forests / A. Osawa, T. Kajimoto, O. A. Zyryanova, Y. Matsuura, R. Wein (Eds.). Springer Dordrecht, 2010. P. 41–58.
- Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B., O'Neil H. Recent trends in freshwater influx to the Arctic Ocean from four major Arctic-draining rivers // Water. 2020. V. 12. N. 4. Article 1189. 13 p.
- Amon R. M. W., Rinehart A. J., Duan S., Louchouart P., Prokushkin A., Guggenberger G., Bauch D., Stedmon C., Raymond P. A., Holmes R. M., McClelland J. W., Peterson B. J., Walker S. A., Zhulidov A. V. Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 94. P. 217–237.
- Bagard M. L., Chabaux F., Pokrovsky O. S., Viers J., Prokushkin A. S., Stille P., Rihs S., Schmit A. D., Dupre B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. Iss. 12. P. 3335–3357.
- Drake T. W., Raymond P. A., Spencer R. G. M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty // Limnol. Oceanogr. Lett. 2018. V. 3. Iss. 3. P. 132–142.
- Finlay J., Neff J., Zimov S., Davydova A., Davydov S. Snow-melt dominance of dissolved organic carbon in high-latitude watersheds: implications for characterization and flux of river DOC // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. Iss. 10. Article 25754.
- Goncharova O. Yu., Timofeeva M. V., Matyshak G. V. Carbon dioxide in soil, ground and surface waters of the northern regions: Role, sources, test methods (a review) // Euras. Soil Sci. 2023. V. 56. N. 3. P. 278–293 (Original Rus. text © O. Yu. Goncharova, M. V. Timofeeva, G. V. Matyshak, 2023, publ. in Pochvovedenie. 2023. N. 3. P. 321–338).
- Guggenberger G., Rodionov A., Shibistova O., Grabe M., Kasansky O. A., Fuchs H., Mikheeva N., Zrazhevskaya G., Flessa H. Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia // Global Change Biol. 2008. V. 14. Iss. 6. P. 1367–1381.
- Holmes R. M., McClelland J. W., Peterson B. J., Tank S. E., Bulygina E., Eglinton T. I., Gordeev V. V., Gurtovaya T. Y., Raymond P. A., Repeta D. J., Staples R., Striegl R. G., Zhulidov A. V., Zimov S. A. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // Estuaries and Coasts. 2012. V. 35. P. 369–382.
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R. B., Jones M., MacDonald G. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // PNAS. 2020. V. 117. N. 34. P. 20438–20446.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C. L. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. V. 11. Iss. 23. P. 6573–6593.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L., Im S. T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. N. 4. Article 045208. 6 p.
- Kirdyanov A. V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova (Sidorova) O. V., Fonti M. V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. N. 3. Article 034061. 11 p.
- Knorre A. A., Kirdyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Sci. Total Environ. 2019. V. 652. P. 314–319.

- Kolosov R. A., Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S. Major anion and cation fluxes from the Central Siberian Plateau watersheds with underlying permafrost // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2016. V. 48. N. 1. Article 012018. 6 p.
- MacLean R., Oswood M. W., Irons J. G. III and McDowell W. H. The effect of permafrost on stream biogeochemistry: a case study of two streams in the Alaskan (U.S.A.) taiga // Biogeochemistry. 1999. V. 47. Iss. 3. P. 239–267.
- McKnight D. M., Boyer E. W., Westerhoff P. K., Doran P. T., Kulbe T., Andersen D. T. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity // Limnol. Oceanogr. 2001. V. 46. Iss. 1. P. 38–48.
- Myers-Pigg A. N., Louchouart P., Amon R. M. W., Prokushkin A., Pierce K., Rubtsov A. Labile pyrogenic dissolved organic carbon in major Siberian Arctic rivers: Implications for wildfire-stream metabolic linkages // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. Iss. 2. P. 377–385.
- Ol'chev A. V., Zyryanov V. I., Satosina E. M., Fokeev E. V., Mukhartova Yu. V., Novenko E. Yu., Prokushkin A. S. Seasonal variability of carbon dioxide, sensible and latent heat fluxes in a northern taiga larch forest of Central Siberia for eddy covariance flux measurements // Rus. Meteorol. Hydrol. 2022. V. 47. Iss. 10. P. 804–811 (Original Rus. text © A. V. Ol'chev, V. I. Zyryanov, E. M. Satosina, E. V. Fokeev, Yu. V. Mukhartova, E. Yu. Novenko, A. S. Prokushkin, 2022, publ. in Meteorol. i gidrol. 2022. N. 10. P. 111–120).
- Palviainen M., Laurén A., Pumpanen J., Bergeron Y., Bond-Lamberty B., Larjavaara M., Kashian D. M., Köster K., Prokushkin A., Chen H. Y. H., Seedre M., Wardle D. A., Gundale M. J., Nilsson M.-C., Wang C., Berninger F. Decadal-scale recovery of carbon stocks after wildfires throughout the boreal forests // Global Biogeochem. Cycles. 2020. V. 34. Iss. 8. P. Article 6612. 17 p.
- Parham L. M., Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S., Titov S. V., Grekova E., Shirokova L. S., McDowell W. H. Permafrost and fire as regulators of stream chemistry in basins of the Central Siberian Plateau // Biogeochemistry. 2013. V. 116. Iss. 1–3. P. 55–68.
- Peterson B. J., Holmes R. M., McClelland J. W., Vorosmarty C. J., Lammers R. B., Shiklomanov A. I., Shiklomanov I. A., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Science. 2002. V. 298. N. 5601. P. 2171–2173.
- Ponomarev E., Masyagina O., Litvintsev K., Ponomareva T., Shvetsov E., Finniov K. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // Forests. 2020. V. 11. N. 8. Article 790. 18 p.
- Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Prokushkin A. S. Intra-seasonal dynamics of river discharge and burned forest areas in Siberia // Water. 2019. V. 11. N. 6. Article 1146. 11 p.
- Prokushkin A. S., Gleixner G., McDowell W. H., Ruehlw S., Schulze E.-D. Source- and substrate-specific export of dissolved organic matter from permafrost-dominated forested watershed in Central Siberia // Global Biogeochem. Cycles. 2007. V. 21. Iss. 4. Article 2938. 12 p.
- Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S., Shirokova L. S., Korts M. A., Viers J., Prokushkin S. G., Amon R., Guggenberger G., McDowell W. H. Sources and flux pattern of dissolved carbon in rivers of the Yenisey basin draining the Central Siberian Plateau // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. N. 4. Article 045212. 14 p.
- Prokushkin S. G., Bogdanov V. V., Prokushkin A. S., Tokareva I. V. Post-fire restoration of organic substance in the ground cover of the larch forests in permafrost zone of Central Evenkia // Biol. Bull. Rus. Acad. Sci. 2011. V. 38. Iss. 2. P. 183–190 (Original Rus. text © S. G. Prokushkin, V. V. Bogdanov, A. S. Prokushkin, I. V. Tokareva, 2011, publ. in Izv. RAN. Ser. Biol. 2011. N. 2. P. 227–234).
- Prokushkin S. G., Zyryanova O. A., Prokushkin A. S. Phytomass reserves and distribution of biogenic elements in Gmelin larch stands in Central Evenkia (Using the example of a small drainage basin) // Biol. Bull. Rus. Acad. Sci. 2021. V. 48. N. 1. P. 84–93 (Original Rus. text © S. G. Prokushkin, O. A. Zyryanova, A. S. Prokushkin, 2021, publ. in Izv. RAN. Ser. Biol. 2021. N. 1. P. 93–102).
- Rawlins M. A., Steele M., Holland M. M., Adam J. C., Cherry J. E., Francis J. A., Groisman P. Y., Hinzman L. D., Huntington T. G., Kane D. L., Kimball J. S., Kwok R., Lammers R. B., Lee C. M., Lettenmaier D. P., McDonald K. C., Podest E., Pundsack J. W., Rudels B., Serreze Mark C., Shiklomanov A., Skagseth O., Troy T. J., Vorosmarty C. J., Wensnahan M., Wood E. F., Woodgate R., Yang D., Zhang K., Zhang T. Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: observations and expectations // J. Clim. 2010. V. 23. Iss. 21. P. 5715–5737.
- Startsev V. V., Dymov A. A., Prokushkin A. S. Soils of post-pyrogenic larch stands in Central Siberia: morphology, physicochemical properties, and specificity of soil organic matter // Euras. Soil Sci. 2017. V. 50. N. 8. P. 885–897 (Original Rus. text © V. V. Startsev, A. A. Dymov, A. S. Prokushkin, 2017, publ. in Pochvovedenie. 2017. N. 8. P. 912–925).
- Tank S. E., McClelland J. W., Spencer R. G. M. Recent trends in the chemistry of major northern rivers signal widespread Arctic change // Nature Geosci. 2023. V. 16. Iss. 9. P. 789–796.
- Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochem. Cycles. 2009. V. 23. Iss. 2. Article 3327. 11 p.
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // Environ. Res. Lett. 2009. V. 4. N. 4. Article 045013. 9 p.
- Vygodskaya N. N., Milyukova I., Varlagin A., Tatarinov F., Sogachev A., Kobak K. I., Desyatkin R., Bauer G., Hollinger D. Y., Kelliher F. M., Schulze E.-D. Leaf conductance and CO₂ assimilation of Larix gmelinii growing in an eastern Siberian boreal forest // Tree Physiol. 1997. N. 17. Iss. 10. P. 607–615.
- Weishaar J. L., Aiken G. R., Bergamaschi B. A., Fram M. S., Fujii R. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon // Environ. Sci. Technol. 2003. V. 37. Iss. 20. P. 4702–4708.

LATERAL CARBON FLUX IN THE CRYOLITHOZONE OF CENTRAL SIBERIA

A. S. Prokushkin^{1,2}, T. N. Geis^{1,2}, R. A. Kolosov¹, M. A. Korets¹, A. V. Panov¹,
D. A. Polosukhina^{1,2}, M. P. Prokushkina², S. V. Titov¹, I. V. Tokareva¹,
N. V. Sidenko¹, Yu. V. Shamonina¹, S. G. Prokushkin¹

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 Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru, geys.00@mail.ru, kolosov.ra@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru,
alexey.v.panov@gmail.com, polosukhina@ksc.krasn.ru, Mprokushkina@sfu-kras.ru, titov-sergey@mail.ru,
gavrilenko@ksc.krasn.ru, nikita.v.sidenko@gmail.com, shamonina@ksc.krasn.ru, stanislav@ksc.krasn.ru

Quantitative assessments of the carbon balance of terrestrial landscapes and, specifically the permafrost zone, where the most significant warming trends are observed, require taking into account the export of terrigenous carbon beyond their boundaries with lateral flow. The paper presents the results of long-term monitoring of intraseasonal and interannual fluctuations in the concentrations of dissolved organic (DOC) and inorganic (DIC) carbon in the hydrographic network of the Central Siberian Plateau, carried out on the basis of the Evenkian field station of the V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Tura settlement). Research is being carried out on more than 100 streams and rivers of various orders in the middle reaches of the Lower Tunguska River (62–66°N, 96–102°E) based on regular measurements of the concentrations of all forms of carbon, as well as quasi-continuous monitoring of the physical and chemical parameters using specific sensors and automatic loggers. It has been shown that the main limiting factors of lateral carbon flux within the Central Siberian Plateau at present are: 1) stocks of potentially mobilizable organic carbon in terrestrial landscapes and 2) amount of precipitation in a sharply continental climate. An increase in the DOC flux is predicted both as a result of thawing of C-rich frozen deposits and an increase in the productivity of plant cover, and inorganic carbon – as a result of increased rates of silicate rock weathering and sequestration of atmospheric CO₂. Negative predictions of DOC behaviour are associated with an increase in the depth of infiltration of solutes with an increase in the seasonally thawed soil layer, which determines the sorption of DOC in the soil column and its microbiological destruction. An increase in the area and intensity of fires as a result of climate warming determines a significant transformation of the lateral carbon flux. At the same time, the observed reduction in river flow as a result of an increase in the pyrogenic factor will determine the overall decrease in the transport of terrigenous carbon from terrestrial landscapes.

Keywords: carbon, lateral flow, watercourses of different orders, fires, Central Siberian Plateau.

How to cite: Prokushkin A. S., Geis T. N., Kolosov R. A., Korets M. A., Panov A. V., Polosukhina D. A., Prokushkina M. P., Titov S. V., Tokareva I. V., Sidenko N. V., Shamonina Yu. V., Prokushkin S. G. Lateral carbon flux in the cryolithozone of central Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 67–82 (in Russian with English abstract and references).

УДК 574.42:630*182.21(574.472)+631.4

ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИСКУССТВЕННЫХ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕГО ЭКСПЕРИМЕНТА

И. Н. Безкоровайная¹, О. М. Шабалина¹, Л. С. Шугалей²

¹ Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Красноярский государственный аграрный университет
660049, Красноярск, пр. Мира, 90

E-mail: ibezkorovaynaya@sfu-kras.ru, oshabalina@sfu-kras.ru, ibezkorovaynaya@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 14.03.2024 г.

Рассмотрено взаимодействие основных лесообразующих пород Сибири: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), березы кустарниковой (*Betula fruticosa* Pall.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны сибирской кедровой (кедра) (*Pinus sibirica* Du Tour) с агросерой почвой. Исследования проводились в специальном многолетнем эксперименте с лесными культурами, заложенном по инициативе проф. Н. В. Орловского в 1968–1969 гг. в южной тайге на территории Кемчугской возвышенности. Выявлено, что биологические особенности и сукцессионное положение древесных пород существенно влияют на все компоненты фитоценоза. Через 45 лет наиболее резкие изменения зафиксированы под пологом раннесукцессионных хвойных (лиственница) и мелколиственных (берёза и осина) пород, тогда как позднесукцессионные породы – ель и кедр – на данном этапе существенно ограничивают развитие подчиненных ярусов. Почвенный профиль в условиях эксперимента формируется вследствие дифференциации пахотного субстрата почвообразующей породы на генетические горизонты. Влияние лесного полога на плантажированную агросерую почву происходит постепенно и усиливается по мере роста и развития культур, образования подстилочного горизонта и охватывает все свойства почвы. Активным современным почвообразованием затронут минеральный слой почвы 0–10 (13) см. Главным фактором образования почвенного профиля являются вертикальные потоки вещества и энергии, поступающие в почву в процессе нарастающей емкости и интенсивности биологического круговорота. Отмечено, что почвы под культурами в условиях многолетнего эксперимента развиваются по зональному типу.

Ключевые слова: серая плантажированная почва, древесные породы, древостой, подрост, подлесок, живой напочвенный покров.

DOI: 10.15372/SJFS20240308

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в почвенной и биогеоценотической литературе накоплена обширная информация о взаимосвязи и взаимообусловленности лесообразовательного и почвообразовательного процессов. Отсутствие синхронности в развитии лесо- и почвообразования, многократная смена древостоев за период развития почвы усложняют результат этого взаимодействия и взаимовлияния (Шугалей, 1984; Карпа-

чевский, Строганова, 1989; Зонн, 1993; Binkley, Giardina, 1998; Binkley, Fisher, 2013; Mueller et al., 2015; Pretzsch et al., 2019). Вычленив влияние отдельных древесных видов на почвообразование в естественных условиях не представляется возможным из-за очень сильной пестроты почвенного покрова в лесных биогеоценозах, обусловленной разнообразием древостоев, парцелярной структурой травяно-кустарничкового яруса, его сукцессионной сменой. Многократная и несинхронная смена лесообразовательных

и почвообразовательных процессов ведет к изменению других факторов и накладывает влияние на свойства и режимы почв. Прежде всего, изменяются свойства, определяемые как «почва-момент», «почва-память» остается неизменной (Таргульян, Соколов, 1973; Александровский, 2008).

Изучение процессов взаимодействия и взаимовлияния почвы и растительности требует длительного наблюдения. Многочисленные исследования показали, что это возможно только в специальном эксперименте.

В 1968 г. по предложению заведующего лабораторией лесного почвоведения Института леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО РАН СССР, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Н. В. Орловского на территории южной тайги Средней Сибири (56° с. ш., 92° в. д.) был заложен многолетний эксперимент с целью изучения развития искусственных лесных биогеоценозов и внутренних связей в системе «растительность – почва» (Моделирование..., 1984). Территория эксперимента расположена на обширной древней террасе р. Кача Кемчугской возвышенности. По биоклиматическому районированию она относится к холодно-умеренному поясу, отличается значительной степенью континентальности (58–59 %), хорошей влагообеспеченностью и недостаточным количеством тепла (Моделирование..., 1984; Яшихин, 1991). Почвенный покров территории представлен серой почвой, развитой на плотной коричнево-бурой глине.

Многолетний эксперимент представляет собой окультуренный участок старопашотной серой почвы площадью 1,7 га, на который после предварительного плантажа было высажено шесть основных пород Сибири: ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), береза кустарниковая (*Betula fruticosa* Pall.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосна сибирская кедровая (кедр сибирский) (*Pinus sibirica* Du Tour). Перед посадкой на участке с целью выравнивания мощности гумусового слоя гумусовый горизонт был снят и складирован в бурты на территории участка, минеральная толща рыхлилась до 70 см, затем на нее равномерно раскладывался гумусовый слой. Культуры были высажены в 1971–1972 гг. 2–3-летними саженцами (Моделирование..., 1984). Посадка всех культур была загущена с намерением ускорить

процесс смыкания крон и быстрее получить их влияние на почву. Плотность посадки составляла 40 тыс. шт./га. В первые годы произрастания культур на опытном участке регулярно проводились прополки, и культуры почти постоянно находились в состоянии пара. В стадии смыкания крон прополки прекратились. В 1986–1987 гг. были проведены рубки ухода, убран снеголом и поврежденные деревья.

Уникальность данного эксперимента заключается в том, что при физическом моделировании процессов взаимодействия основных лесобразующих пород и почвы такие экологические факторы, как рельеф, климат, материнские породы и почва – одинаковы, а древесные породы – разные. Это сводит к минимуму воздействие внешних факторов, и все различия в почвенной системе, проявляющиеся в процессе произрастания культур, обусловлены, прежде всего, влиянием древесного полога разного породного состава.

Перед посадкой культур были изучены основные физические, физико-химические, химические и биохимические свойства почвы экспериментального участка и естественных древостоев, прилегающих к нему. Длительное сельскохозяйственное использование участка (сенокос, выращивание картофеля) привело к уничтожению подстилки и формированию гомогенизированного агрогенного горизонта из гор. АУ1, АУ2 и верхней части гор. АЕЛ. Несмотря на это, агросерые почвы сохранили литогенные и палеонтологические признаки дифференциации профиля по элювиально-иллювиальному типу: иллювиирование ила, гумуса, сегрегации органно-минеральных соединений в орштейны (Shugalei, 2005; Шугалей, Ведрова, 2014).

В дальнейшем в культурах проводились наблюдения за формированием лесных биогеоценозов и их отдельных компонентов. Особое внимание уделялось процессам, определяющим продуктивность лесных экосистем и лесное почвообразование – гидротермическому режиму, биологической активности и питательному режиму почвы, скорости восстановления морфологического профиля лесной почвы под различными древесными породами, биологическому круговороту вещества под лесными культурами (Моделирование..., 1984; Яшихин, 1991; Ведрова, 1995; Безкоровайная и др., 1997, 2017; Shugalei, 2005; Ведрова, Решетникова, 2014; Bezkorovaynaya et al., 2017).

Цель данной статьи – оценить изменения основных компонентов фитоценоза в условиях многолетнего эксперимента и выявить особенности влияния разных древесных видов на агро-серую почву.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Морфологическое описание и индикация плантажированной агросерой почвы многолетнего эксперимента выполнено по Классификации и диагностике почв России 2004 г. (Шишов и др., 2004).

Отбор почвенных проб, пробоподготовку и определение основных свойств почвы проводили общепринятыми в почвоведении методами (Аринушкина, 1970; Роуэлл, 1998) и в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 (2018) и ГОСТ 17.4.4.02-2017 (2018).

Для сравнительного анализа произошедших в плантажированной агросерой почве изменений использована серая почва 40-летнего березняка и агросерая почва, которые при закладке многолетнего эксперимента служили контролем (Моделирование..., 1984).

Для характеристики древостоя в каждой культуре закладывались площадки размером 100 м², на которых проводился сплошной пересчет древостоя. Формула древостоя рассчитывалась по абсолютной полноте. Одновременно выполнялись стандартные геоботанические описания подлеска и живого напочвенного покрова, с указанием общего проективного покрытия и покрытия каждого вида (Методы..., 2002).

Характеристика подроста и подлеска проводилась на учетных профилях 2 × 20 м, заложенных в пределах каждой культуры. Учетные профили разбивались на площадки 2 × 2 м, и на каждой проводился сплошной пересчет подроста. К подросту относили растения высотой менее 2 м (Методы..., 2002). Выделялись следующие категории подроста по жизненному состоянию (в баллах): 1 – жизнеспособные, 2 – ослабленные, 3 – мертвые.

Сравнение сообществ по флористическому составу выполнено с использованием коэффициента Жаккара.

Статистическая обработка проводилась с помощью функций пакета анализа Microsoft Excel. Достоверность различий между средними значениями определялась с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенный покров природных биогеоценозов, примыкающих к участку, представлен темно-серыми легкоглинистыми почвами, сформировавшимися на коричнево-бурых глинах. Коричнево-бурые глины являются основной почвообразующей породой Кемчугской возвышенности. Естественные темно-серые почвы имеют элювиально-иллювиальный четко дифференцированный профиль: О–А–Y–AEL–BEL–(BT)–С.

На плантажированной агросерой почве экспериментального участка было создано техногенное поверхностное образование (ТПО) из смеси пахотного слоя, нанесенного на взрыхленный и частично перемешанный субстрат верхней толщи иллювиального горизонта. Первичный профиль почвы экспериментального участка имел следующий морфологический облик: ТПО1–ТПО2–BT–С (Shugalei, 2005).

Влияние лесного полога на плантажированную агросерую почву в условиях многолетнего эксперимента происходит постепенно и усиливается по мере роста и развития культур, образования подстилочного горизонта и охватывает все свойства почвы.

Лесные культуры, развивающиеся в одинаковых почвенно-экологических условиях на исходно однородном почвенном субстрате, не изменили тип водного режима. Оставаясь периодически промывным, он характеризуется изменением статей прихода и расхода влаги атмосферных осадков и почвенной толщи на эвапотранспирацию (Shugalei, 2005). Температурный режим формирующейся почвы под культурами изменяется в сторону выравнивания температурного поля «окно-крона». Отмеченные изменения обусловлены сомкнутостью древесного полога.

Древостой. Как известно, древесные породы можно подразделить на ранне- и позднесукцессионные (Сохранение..., 2002). Светолюбивые раннесукцессионные (пионерные) виды деревьев доминируют на ранних стадиях сукцессии после сильных и средних нарушений, формируя производные насаждения. При нормальном протекании сукцессионного процесса (отсутствие периодических нарушений, постоянный приток семян видов следующей стадии сукцессии) раннесукцессионные виды не возобновляются под собственным пологом, и в течение жизни одного поколения древостоя производные сообщества сменяются коренными, устойчиво



Рис. 1. Внешний вид 45-летних культур многолетнего эксперимента.

а – кедр; б – ель; в – сосна; г – осина; д – лиственница; е – береза (фото Ю. Н. Баранчикова (а) и О. М. Шабалиной (б–е)).

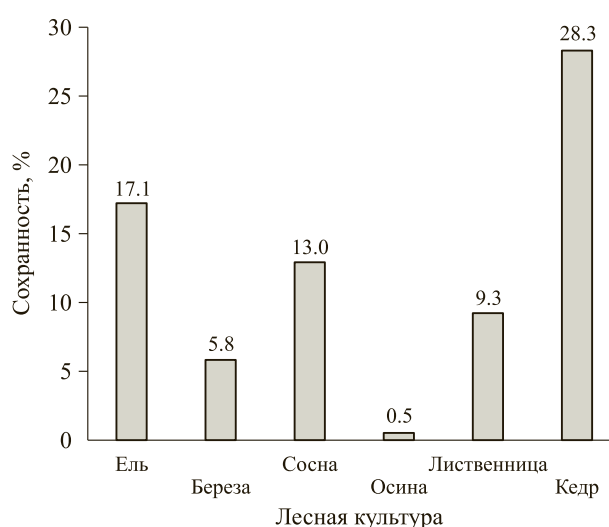


Рис. 2. Сохранность основной породы в лесных культурах многолетнего эксперимента к 45-летнему возрасту.

существующими при данных условиях произрастания и сформированными поздне-сукцессионными видами. Поздне-сукцессионные древесные породы теневыносливы и способны возобновляться под собственным пологом в течение многих поколений. К поздне-сукцессионным породам на участке многолетнего опыта относятся ель и кедр, к ранне-сукцессионным – береза, сосна, осина и лиственница (рис. 1).

Как уже упоминалось, при закладке эксперимента плотность посадки составляла 40 тыс. шт./га. К 45-летнему возрасту сохранность лесных культур многолетнего эксперимента резко различалась (рис. 2).

Максимальная сохранность характерна для культур кедр – 28.3 % от исходной густоты, далее в порядке убывания ель, сосна, лиственница, береза кустарниковая, осина.

Изменились также состав древостоев и их густота (табл. 1). Чистые древостои сформировали хвойные породы – ель, сосна, лиственница

Таблица 1. Основные таксационные характеристики древостоев многолетнего эксперимента к 45-летнему возрасту

Лесная культура	Формула древостоя	Состав	Густота, тыс. шт./га	D , см	H , м
Ель	10Е	Е	6.8	11.3 ± 0.12	13.9 ± 0.72
Береза кустарниковая	7Бп2С0.5Бк0.5Е ед. Р	Бк	2.3	5.3 ± 0.48	–
		Бп	3.4	13.2 ± 0.97	–
		Е	7.1	2.9 ± 0.13	–
		С	8.7	2.9 ± 0.31	–
Сосна	10С	С	5.2	13.9 ± 0.78	13.3 ± 0.25
Осина	10Ос + С, Е	Ос	2.0	14.7 ± 0.82	12.5 ± 0.49
		С	1.3	2.1 ± 0.31	–
		Е	0.2	1.3 ± 0.32	–
Лиственница	10Л ед. Р	Л	3.7	15.6 ± 0.95	16.7 ± 0.36
Кедр	10К	К	11.3	9.9 ± 0.22	12.7 ± 0.34

Примечание. Е – ель сибирская; Бк – береза кустарниковая; Бп – б. повислая (*Betula pendula* Roth); С – сосна обыкновенная; Ос – осина обыкновенная; Л – лиственница сибирская; К – кедр сибирский; Р – рябина сибирская (*Sorbus sibirica* Hedl.).

и кедр. В культурах осины имеются существенная примесь сосны, а также единичные особи ели, однако это молодые особи небольшого диаметра, которые не выходят в первый ярус. Наибольшим изменениям подвергся состав древостоя культур березы. Особенностью березовых культур многолетнего эксперимента является распад материнского полога. Береза кустарниковая, которую использовали для создания лесных культур, не является аборигенным видом, ее естественный ареал лежит существенно севернее и восточнее (Флора..., 1992).

В результате к 45-летнему возрасту береза кустарниковая в составе культур березы не играла существенной роли, уступая по густоте березе повислой, сформировавшей верхний ярус, а также сосне и ели.

Среди всех древесных пород многолетнего эксперимента наиболее интенсивно росла лиственница, у которой отмечены максимальные показатели средней высоты и диаметра (табл. 1). Самые низкие показатели у кедр. Следует отметить, что у светолюбивых пород – сосны, березы повислой, осины обыкновенной и лиственницы – средний диаметр выше, чем у теневыносливых ели и кедр. Наблюдается тесная отрицательная корреляция ($R = -0.83$) между средним диаметром основной породы и ее сохранностью.

Таким образом, в культурах ели и кедр, где процессы самоизреживания пока достаточно слабо выражены, отмечаются наименьшие значения среднего диаметра.

Подрост. В насаждениях многолетнего эксперимента представлен подрост следующих ле-

сообразующих пород: ель сибирская, береза повислая, сосна обыкновенная, кедр, осина, пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) (табл. 2).

Ель встречается под собственным пологом в виде подростка и всходов. Однако густота подростка очень маленькая (0.5 тыс. шт./га), да и подрост был отмечен только по краю, где условия освещенности намного лучше, чем в глубине насаждения. Подрост ослаблен в связи с воздействием на него материнского древостоя, среднее жизненное состояние составляет 2 балла. Густота всходов высокая – 12 тыс. шт./га. Зафиксированы всходы сосны густотой 2.8 тыс. шт./га, однако подрост отсутствует, что неудивительно, учитывая высокое светолюбие сосны. Березовый подрост был представлен только мертвыми экземплярами.

Береза кустарниковая, которая была использована для создания лесных культур, как уже отмечалось выше, не типичная для нашего региона лесообразующая порода, поэтому в настоящий момент ее древостой находится в расстроенном состоянии, большинство деревьев усохло, подрост отсутствует. Однако благоприятный световой режим, присущий березовым культурам, позволяет развиваться здесь подросту хвойных пород. Густота подростка ели составила 22.3 тыс. шт./га. Хорошо себя чувствует под пологом березовых культур и подрост кедр, густота которого составила 8.75 тыс. шт./га. Подрост ели и кедр характеризуется достаточно хорошим жизненным состоянием, оно варьирует в пределах 1.2–1.3 балла. В указанный период процесс внедрения темнохвойных видов

Таблица 2. Густота и жизненное состояние подроста в лесных культурах многолетнего эксперимента к 45-летнему возрасту

Лесная культура	Состав подроста и всходов	Густота подроста, тыс. шт./га	Средний балл жизненного состояния	Густота всходов, тыс. шт./га
Ель	Е	0.50	2.0	12.0
	С	–	–	2.8
Береза кустарниковая	Е	22.30	1.2	14.3
	С	0.25	2.0	–
	К	8.75	1.2	4.0
Сосна	Е	1.25	1.0	14.0
	С	–	–	15.3
	К	–	–	1.0
Осина	Е	0.75	1.0	–
	С	1.50	2.0	1.8
	К	8.75	1.2	3.0
	Ос	0.75	2.0	–
Лиственница	Е	1.50	1.3	0.8
	Б	0.50	1.0	–
	К	2.00	1.0	8.8
	Ос	1.50	1.8	–
	П	0.50	1.0	–

под полог берёзовых культур продолжается, на что указывает большое количество всходов ели (14.3 тыс. шт./га) и кедра (4.0 тыс. шт./га). Подрост сосны представлен единичными растениями, его количество не превышает 0.25 тыс. шт./га. Жизненное состояние ослабленное – 2 балла.

Крона сосны отличается ажурностью и дает мало тени, что благоприятно сказывается на подпологовой растительности. Однако сосна относится к ценотически слабым и светолюбивым растениям, которые с трудом выдерживают конкуренцию с густым материнским пологом, а также подлеском и напочвенным покровом (Санников, 1961; Хатмуллин и др., 2009; Малиновских, 2017). Поэтому, несмотря на наличие большого количества всходов сосны (15.3 тыс. шт./га), не обнаружено ни одного экземпляра ее подроста. В культурах сосны он представлен елью, которая, как правило, хорошо возобновляется под пологом сосны (Николаев, Румянцев, 2004; Рубцов и др., 2014). Однако в настоящее время смена сосны на ель в рассматриваемых лесных культурах протекает слабо. Несмотря на массовое появление всходов ели (табл. 2), ее подрост под пологом культур сосны немногочисленен, что, по-видимому, объясняется недостаточной изреженностью соснового полога (Рубцов и др., 2014). Однако по мере усиления процессов самоизреживания в культурах сосны следует ожи-

дать и более активного естественного возобновления ели.

Породный состав подроста в культурах осины разнообразен и представлен елью, сосной, кедром и осинкой. Подрост осины вегетативного происхождения характеризуется низкой численностью и ослабленностью (табл. 2). Подрост сосны более обилен, но также ослаблен. Лучше себя чувствует молодое поколение темнохвойных пород. Густота подроста ели невелика (0.75 тыс. шт./га), но подрост здоровый, средний балл жизненного состояния равняется 1.0. Большое количество подроста и всходов кедра (8.75 тыс. и 3 тыс. шт./га соответственно) связано, по-видимому, с особенностями разноса семян, поскольку кедр является синзоохорной породой.

Породный состав подроста в культурах лиственницы наиболее разнообразен и представлен следующими видами: ель, береза повислая, кедр, осина, пихта сибирская. При этом количественное распределение подроста разных пород под пологом лиственницы более равномерное, чем в других культурах. Преобладает подрост темнохвойных видов – ели и кедра (1.5 тыс. и 2.0 тыс. шт./га соответственно). Подрост всех пород, за исключением осины, характеризуется высокой жизненностью. Только в культурах лиственницы обнаружен подрост пихты, кото-

рая не входила в состав насаждения многолетнего эксперимента, но широко представлена в окрестностях, где образует сомкнутые насаждения. Характерно отсутствие подроста и всходов лиственницы не только под пологом лиственных культур, но и в других лесных культурах многолетнего эксперимента. Это отражает низкую конкурентоспособность лиственницы, которая в условиях потепления климата в этой части ареала активно вытесняется темнохвойными видами из ранее занимаемых ею местообитаний, что, в частности, зафиксировано на территории национального парка «Красноярские Столбы» (Шушпанов, Кузьмичев, 2013).

В культурах кедра естественное возобновление отсутствует, что связано как с сильными эдификаторными свойствами кедра, так и с загущенностью насаждения. Кедр отличается долголетием и относится к медленно растущим породам, поэтому в настоящее время самоизреживания, достаточного для естественного возобновления древесных пород, не произошло.

Подлесок и живой напочвенный покров. Под пологом лесных культур многолетнего эксперимента встречено 10 видов подлесочных пород – рябина сибирская, смородина красная (*Ribes rubrum* L.), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), шиповник иглистый (*Rosa acicularis* Lindl.), калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.), боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Pall.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh.), спирея средняя (*Spiraea media* Schmidt), жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.), свидина белая (*Swida alba* (L.) Opiz). Чаще всего встречаются рябина и черемуха (табл. 3).

Эти аборигенные виды достаточно морозостойки, выносливы, не боятся затенения и могут произрастать в широком диапазоне экологических условий.

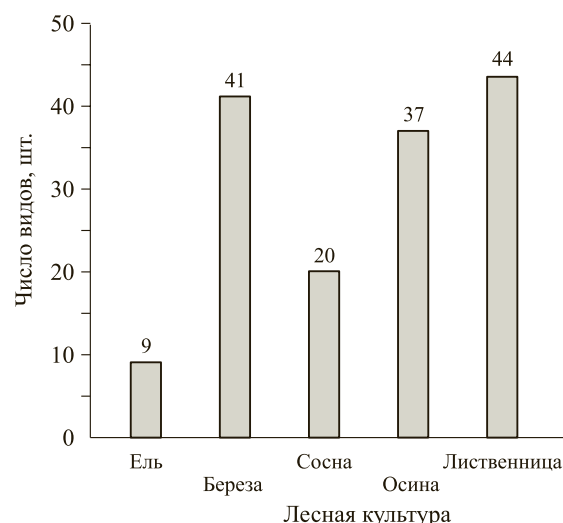


Рис. 3. Видовое богатство живого напочвенного покрова в лесных культурах многолетнего эксперимента к 45-летнему возрасту.

Как видно из табл. 3, подлесок в лесных культурах многолетнего эксперимента хорошо развит только под пологом листопадных пород – березы, осины и лиственницы. В культурах хвойных пород он либо полностью отсутствует (культуры кедра), либо развит крайне слабо (культуры ели и сосны).

Видовое флористическое богатство живого напочвенного покрова в лесных культурах многолетнего эксперимента резко различается (рис. 3).

Культуры кедра мертвопокровные. Небольшим флористическим богатством отличаются культуры ели и сосны.

Как и следовало ожидать, наибольшее число видов обнаружено под пологом березы, осины и лиственницы с их благоприятным световым режимом и условиями увлажнения. Здесь сформирован полноценный разнотравный травяной ярус с примесью лесного мелкотравья.

Представители мхов обнаружены в культурах ели, березы, сосны и лиственницы, это

Таблица 3. Густота древесно-кустарниковых пород подлеска в лесных культурах многолетнего эксперимента к 45-летнему возрасту

Порода подлеска	Ель	Береза	Сосна	Осина	Лиственница
Рябина сибирская	0.25	15.75	–	23.75	24.25
Черемуха обыкновенная	–	1.50	0.25	9.50	3.75
Смородина красная	–	1.75	–	1.75	1.25
Шиповник иглистый	–	0.50	–	0.50	–
Калина обыкновенная	–	–	–	1.75	–
Спирея средняя	–	–	–	0.75	0.75
Малина обыкновенная	–	–	–	–	2.00

типичные лесные мхи – плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.), гиелокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.) и ритидиадельфус трехгранный (*Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst.). Под елью именно мхи составляют основу живого напочвенного покрова. К часто встречающимся видам трав на всем участке многолетнего эксперимента относятся: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), чина весенняя (*Lathyrus vernus* (L.) Bernh.), нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare* Lam.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), клевер луговой (*Trifolium pretense* L.), ортилия однобокая (*Orthilia secunda* (L.) House), грушанка круглолистная (*Pyrola rotundifolia* L.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis* L.), лютик золотистый (*Ranunculus auricomus* L.), фиалка одноцветковая (*Viola uniflora* L.). Видовой состав живого напочвенного покрова под разными культурами существенно различается, значения коэффициента видового сходства Жаккара варьируют от 0.08 до 0.43.

Таким образом, при развитии искусственных лесных биогеоценозов на однородном экологическом фоне видовой состав подчиненных ярусов преимущественно зависит от эдификаторного воздействия материнской породы, которое существенно выше у позднесукцессионных темнохвойных видов.

Почва. За 40 лет произрастания под всеми культурами оформился равномерно распределенный по поверхности органогенный горизонт с четко выраженной стратиграфией из подгоризонтов L, F и H, гомогенный пахотный слой (горизонт PY) стал дифференцированным (O–AY1–AY2). Морфологический профиль плантажированной агросерой почвы приобрел следующий облик: O–AY1–AY2–ТПО1ра–ТПО2–BT–Cg.

Под воздействием лесных культур наметилась тенденция изменения агрегированности почвы. В составе почвенной массы в 1.5–2 раза увеличилась доля макроагрегатов фракции 10–7 мм и уменьшилось количество мезоагрегатов 7–5 мм, вследствие влияния грибного мицелия, корней травянистых и древесных растений, различных по составу водорастворимых продуктов разложения подстилки.

Активным современным почвообразованием затронут минеральный слой почвы 0–10 (13) см. В хвойных культурах и осине гор. AY1 имеет мощность 4 см, в берёзе 2 см. Граница перехода в гор. AY2 неровная. Затронутый современ-

ным почвообразованием слой характеризуется более темной окраской, обильным включением бурой органической массы, рыхлым сложением (ОМ – 1.05–1.09 г/см³ под кедром, лиственницей, сосной, осиной и 1.14–1.16 г/см³ под елью и березой), порошисто-мелкозернистой или комковато-мелкозернистой структурой. Основная масса корней древесных и травянистых растений (98–63 %) сосредоточена в этой толще. Обильный грибной мицелий отмечен под елью, его глубина достигает 72 см. Под другими культурами его обилие и мощность значительно меньше: под кедром 40 см, сосной 22, лиственницей 12 см. Под осиной и березой насыщенность грибным мицелием слабая и основная масса его сосредоточена в слое 0–10 см.

Образование подстилок и накопление в них органического вещества сопровождается увеличением содержания гумуса в аккумулятивной части минерального профиля. Наиболее существенное (в 1.5–1.8 раза) приращение гумуса в гор. AY1 отмечено под культурами лиственницы и осины и его содержание составило 6.06 и 5.36 % соответственно (табл. 4). В гор. AY2 также отмечено незначительное увеличение содержания гумуса под кедром, лиственницей и сосной: оно составило 3.92–3.49 %. Под елью и березой увеличение содержания гумуса в этих горизонтах незначительно.

Накопление гумуса (углерода) в минеральных горизонтах особенно существенно проявляется при сопоставлении запасов (табл. 5).

Максимальные запасы органического углерода относительно исходных в минеральном слое почвы 0–20 см отмечаются в культурах ели. В культурах кедра, сосны и осины они на 70–80 % обусловлены сформировавшимся органо-генным горизонтом, в культурах лиственницы, ели и березы – на 50–66 % аккумуляцией углерода в гумусе аккумулятивного горизонта минеральной части профиля.

Качественный состав гумуса фульватно-гуматный. Отношение $C_{гк} : C_{фк}$ изменяется от 1.5–1.4 под лиственницей и сосной до 1.2–1.1 под осиной и кедром, 1.1–1.0 под елью и березой.

Степень гумификации органического вещества под культурами лиственницы, сосны и осины 59–55 %, под кедром, елью и березой 51–53 %. В агросерых почвах пашни 49 %. Вновь образованный гумус обеднен азотом (C:N 15–16). Соответственно увеличению гумуса отмечено увеличение азота (Шугалей, Ведрова, 2014). Близкий качественный состав гумуса свидетельствует о развитии процессов гумусообразования

Таблица 4. Основные свойства серой почвы под 40-летними лесными культурами

Культура	Горизонт	Мощность, см	Гумус, %	Ca	Mg	pH	
				мг-экв./100 г		водный	солевой
40-летний березняк*	AY1	0–5	10.58	21.9	6.5	6.1	5.2
	AY2	5–10	5.34	18.2	6.0	6.1	5.2
	AEL	10–20	4.56	18.2	5.4	6.0	4.8
		20–30	2.84	17.4	5.8	5.8	4.7
	BT1	30–40	1.77	18.2	6.3	5.8	4.5
		40–50	1.12	19.0	6.3	5.7	4.3
	BT2	50–80	0.49	20.5	6.2	5.8	4.3
	BT3	80–100	0.32	21.2	6.5	6.0	4.3
Агросерая почва (до посадки культур)*	PY	0–5	3.79	18.9	5.8	6.4	5.1
		5–10	3.79	18.9	5.8	6.4	5.1
		10–20	3.51	19.4	7.0	6.4	5.0
	AEL	20–30	2.61	18.8	7.1	6.2	4.7
		30–40	1.82	19.0	6.7	6.1	4.6
	BT1	40–50	1.31	19.2	6.3	5.8	4.4
		50–80	0.78	19.7	7.2	5.8	4.4
	BT2	80–100	0.32	20.1	7.1	6.1	4.5
Кедр	O	0–1.5 (3)	43.80	–**	–	–	–
	AY1	3–7	5.12	20.5	5.0	5.0	5.3
	AY2	7–14	3.92	20.2	5.7	5.0	5.2
	AEL	14–45	2.00	19.4	6.2	6.0	4.7
	BEL	45–55	1.18	19.8	6.8	6.0	4.6
	BT	55–90	0.51	20.8	6.8	6.0	4.5
	C	90–100	0.28	20.8	6.7	6.0	4.4
Лиственница	O	0–4	38.20	–	–	–	–
	AY1	4–8	6.06	19.5	6.9	5.7	5.0
	AY2	8–16	3.91	19.6	6.8	5.7	5.0
	AEL	16–43	1.63	18.4	6.4	6.0	4.7
	BEL	43–91	0.68	20.8	6.4	5.9	4.5
	C	91–110	0.51	19.0	6.4	6.0	4.4
Осина	O	< 1	33.10	–	–	–	–
	AY1	0–12	5.36	19.3	6.1	5.7	4.9
	AEL	12–42	3.27	18.7	6.0	6.0	4.8
	BEL	42–82	1.59	18.9	6.4	5.9	4.8
	C	82–100	0.31	20.1	6.8	6.0	4.6
Сосна	O	0–4	42.20	–	–	–	–
	AY1	4–8	4.34	18.7	5.5	5.0	4.7
	AY2	8–14	3.49	18.6	6.8	5.1	4.8
	AEL	14–26	2.07	18.0	6.8	6.0	4.9
	BEL	26–76	0.96	18.8	7.0	5.9	4.5
	C	76–124	0.28	20.0	6.8	5.9	4.6
Берёза	O	> 1	37.70	–	–	–	–
	AY	1–10	4.15	19.3	5.5	5.0	4.9
	AEL	10–27	3.76	18.6	7.5	5.0	4.8
	BEL	27–50	3.03	18.5	8.3	5.9	4.8
	C	50–71	1.04	19.5	7.5	5.9	4.8
		71–100	0.24	20.0	8.1	6.1	4.4
Ель	O	0–3	46.30	–	–	–	–
	AY1	3–7	4.45	17.8	5.6	4.7	3.8
	AY2	7–26	3.65	18.0	6.6	4.8	3.9
	AEL	26–46	2.52	20.1	6.2	5.9	4.8
	BEL1	46–58	1.90	1.86	6.2	5.9	4.6
	BEL2	58–76	0.78	17.2	6.6	6.0	4.5
	C	76–105	0.19	17.2	6.8	6.0	4.4

* Моделирование..., 1984.

** Не определялось.

Таблица 5. Запасы углерода в агросерой почве под лесными культурами

Лесная культура	Горизонт	Глубина, см	Запасы, т/га			Средняя скорость изменения запасов, т/(га · год)
			исходные*	под 40-летними культурами	накопилось	
Кедр	О	–	– **	15.80	15.80	–
	АУ	0–10	28.90	34.10	5.20	0.13
		10–20	28.03	29.49	1.46	0.04
Лиственница	О	–	–	14.80	14.80	–
	АУ	0–10	32.64	39.15	6.51	0.16
		10–20	29.21	39.76	10.55	0.26
Осина	О	–	–	3.68	3.68	–
	АУ	0–10	28.46	30.83	2.37	0.06
		10–20	28.56	28.74	0.18	0,004
Сосна	О	–	–	9.92	9.92	–
	АУ	0–10	24.76	23.03	– 1.73	0.04
		10–20	21.09	26.88	5.79	0.14
Берёза	О	–	–	4.40	4.40	–
	АУ	0–10	27.62	34.87	7.25	0.18
		10–20	27.25	29.76	2.51	0.06
Ель	О	–	–	–	–	–
	АУ	0–10	28.60	44.92	16.32	0.41
		10–20	26.86	34.53	7.67	0.19

* До посадки лесных культур.

** Не определялось.

по зональному типу и преобладающем влиянии периода биологической активности и содержания продуктивной влаги.

Содержание обменных оснований под всеми культурами осталось практически неизменным. Наметились некоторые различия в реакции почвенного раствора в минеральных горизонтах. Актуальная кислотность (pH_{H_2O}) увеличилась в слое 0–5 см под хвойными породами, обменная кислотность (pH_{KCl}) осталась под всеми культурами практически неизменной. Исследования показали, что в культурах всех лесообразующих пород взаимодействие компонентов формирующейся системы «растительность – почва» обусловлено разной степенью аккумуляции продуктов гумификации разлагающегося растительного материала опада-подстилки. Специфичность влияния лесообразующей породы на прилегающий к подстилке минеральный слой почвы отмечена в культурах ели и сосны. В культурах ели отчетливо выражено подкисление почвы в слое 0–10 см, в сосне – обозначился слой (5–10 см) элювирования гумусовых веществ с последующим накоплением в нижележащем слое 10–20 см. Элювирование углеродосодержащих веществ происходит вследствие содержания в органогенном горизонте значительного количества лабильных форм углерода (Ведрова, Мухомтова, 2000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование взаимодействия лесо- и почвообразования в эксперименте с лесными древесными видами подтвердили установленные ранее положения о первоначальном формировании лесных фитоценозов, затем следует гумусообразование и в последующем проявляются другие почвенные процессы.

За 45-летний период в фитоценозах многолетнего эксперимента произошли существенные изменения, обусловленные, прежде всего, естественными сукцессионными процессами. Во всех лесных культурах снизилась начальная густота древостоев, а в некоторых существенно изменился состав. Наибольшей сохранностью и монодоминантностью отличаются древостои, сложенные сильными эдификаторами – елью, сосной, кедром. Древостои культур берёзы, осины и лиственницы смешанные.

Естественное возобновление под пологом лесных культур многолетнего эксперимента зависит как от особенностей материнского полога, так и от сукцессионного положения породы подроста. Позднесукцессионные породы – ель и кедр – активно возобновляются в культурах лиственных пород и отличаются хорошим жизненным состоянием, однако под собственным пологом отсутствуют из-за сильного конкурентного

воздействия материнского древостоя. Подрост раннесукцессионных пород – сосны, лиственницы, березы, осины – либо отсутствует (лиственница), либо отличается пониженной жизненностью.

Видовой состав подчиненных ярусов лесных культур многолетнего эксперимента существенно различается, что объясняется, прежде всего, трансформацией условий среды под воздействием материнского полога древостоя и произошедших за 45-летний период сукцессионных изменений. Особенно значительное воздействие на подчиненные ярусы оказывают сильные эдификаторы – ель и кедр. Сукцессионные процессы в фитоценозах, образованных различными лесообразующими породами, быстрее протекают под пологом мелколиственных (березы и осины) и светлохвойных (сосны и лиственницы), чем коренных темнохвойных (ели и кедра) пород.

По основным химическим свойствам формирующиеся в условиях многолетнего эксперимента почвы близки естественным серым почвам. Активным современным почвообразованием затронут минеральный слой почвы 0–10 (13) см. Главным фактором преобразования почвенного профиля являются вертикальные потоки вещества и энергии, поступающие в почву в процессе нарастающей емкости и интенсивности биологического круговорота: формирование органогенных горизонтов и накопление в них углерода сопровождается его увеличением в верхней части минерального профиля. Содержание гумуса в аккумулятивной части невысокое, резко снижается с глубиной, почвенно-поглощающий комплекс насыщен щелочными землями, реакция почвенного раствора слабокислая, в нижней части профиля близка к нейтральной. Эти параметры обусловлены в основном литогенной основой – «почвой-памятью».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А. Л. Запись природной среды в почвах голоцена // Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий / Отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 75.
- Ариунушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
- Безкоровайная И. Н., Ведрова Э. Ф., Попова Э. П., Шугалей Л. С., Яшихин Г. И. Развитие искусственных лесных биогеоценозов // Сиб. экол. журн. 1997. № 4. С. 393–403.
- Безкоровайная И. Н., Егунова М. Н., Таскаева А. А. Почвенные беспозвоночные и их трофическая активность в 40-летних лесных культурах // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24. № 5. С. 609–620.
- Ведрова Э. Ф. Трансформация растительных остатков в 25-летних культурах основных лесообразующих пород Сибири // Лесоведение. 1995. № 4. С. 13–21.
- Ведрова Э. Ф., Мухоморова Л. В. Динамика легкоминерализуемой фракции органического вещества под лесными культурами // Современные проблемы почвоведения в Сибири: Материалы Междунар. науч. конф. посвящ. 70-летию образования кафедры почвоведения Том. гос. ун-та: в 2-х т. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2000. Т. 2. С. 296–299.
- Ведрова Э. Ф., Решетникова Т. В. Масса подстилки и интенсивность ее разложения в 40-летних культурах основных лесообразующих видов Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
- ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2018.
- ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018.
- Зонн С. В. Состояние и перспективы изучения лесного биогеоценозического процесса // Почвоведение. 1993. № 9. С. 11–20.
- Карпачевский Л. О., Строганова М. Н. Общие закономерности почвообразования в лесной зоне // Почвообразование в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1989. С. 5–12.
- Малиновских А. А. Особенности естественного возобновления сосны обыкновенной на гары 1997 г. в Коростелёвском бору // Вестн. Алтай. гос. агр. ун-та. 2017. № 4. С. 67–72.
- Методы изучения лесных сообществ / Е. Н. Андреева, И. Ю. Баккал, В. Н. Горшков, И. В. Лянгузова, Е. А. Мазная, В. Ю. Нешатаев, В. Ю. Нешатаева, Н. И. Ставрова, В. Т. Ярмишко, М. А. Ярмишко / Отв. ред. В. Т. Ярмишко, И. В. Лянгузова. СПб: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- Моделирование развития искусственных лесных биогеоценозов / Л. С. Шугалей, М. Г. Семечкина, Г. И. Яшихин, В. К. Дмитриенко / Под ред. Н. В. Орловского. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 150 с.
- Николаев Д. К., Румянцев Д. Е. Сопряженное развитие культур сосны и ели естественного происхождения под их пологом // Лесоведение. 2004. № 5. С. 45–49.
- Роуэлл Д. Л. Почвоведение: методы и использование / под ред. и с предисл. Б. Н. Залотаревой. М.: Колос, 1998. 486 с.
- Рубцов М. В., Глазунов Ю. Б., Николаев Д. К. Восстановление ели под пологом культур сосны на суглинистых почвах в центре Русской равнины // Лесн. вестн. 2014. Т. 18. № 1. С. 64–72.
- Санников С. Н. Естественное возобновление сосны и меры содействия ему в Припышминских борах. Свердловск: Урал. науч. центр АН СССР, 1961. 77 с.
- Сохранение и восстановление биоразнообразия / В. Е. Флинт, О. В. Смирнова, Л. Г. Ханина, М. В. Бобровский, Н. А. Торопова, Л. Б. Заугольнова, О. П. Мелехова, А. Г. Сорокин / Под ред. М. В. Гусева, О. П. Мелехова, Э. П. Романова. М.: Изд-во науч. и учеб.-метод. центра, 2002. 286 с.

- Таргульян В. О., Соколов И. А. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память и почва-момент // Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1973. С. 17–33.
- Флора Сибири. Salicaceae – Amaranthaceae. Т. 5 / Под ред. И. М. Красоборова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. Т. 5. 312 с.
- Хатмуллин Р. З., Кулагин А. Ю., Уразгильдин Р. В. Оценка естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в естественных и антропогенно-нарушенных ландшафтах Южного Урала // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2009. № 6. С. 412–414.
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Шугалей Л. С. Взаимодействие леса и почвы // Моделирование развития искусственных лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. С. 9–23.
- Шугалей Л. С., Ведрова Э. Ф. Многолетний эксперимент по взаимодействию основных лесообразующих пород с агросерой почвой: история создания и первые результаты // Творческое наследие профессора Н. В. Орловского, его использование и развитие: Материалы науч. чтений, посвящ. 115-летию со дня рожд. Н. В. Орловского, Абакан, 19–20 февраля 2014 г. Абакан: НИИ агр. пробл. Хакасии, 2014. С. 95–101.
- Шушпанов А. С., Кузьмичев В. В. Прогноз сукцессий в лиственных и кедровых лесах Восточного Саяна // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 1. С. 79–84.
- Яшихин Г. И. Гидротермический режим серых лесных почв. Красноярск: ИЛИД им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1991. 165 с.
- Bezkorovaynaya I. N., Egunova M. N., Taskaeva A. A. Soil invertebrates and their trophic activity in 40-year-old forest stands // Contemp. Probl. Ecol. 2017. V. 10. N. 5. P. 524–533 (Original Rus. text © I. N. Bezkorovaynaya, M. N. Egunova, A. A. Taskaeva, 2017, publ. in Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2017. N. 5. P. 609–620).
- Binkley D., Giardina C. Why do trees species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions // Biogeochemistry. 1998. V. 42. Iss. 1. P. 89–106.
- Binkley D., Fisher R. F. Ecology and management of forest soils. Fourth ed. Wiley-Blackwell, 2013. 347 p.
- Mueller K. E., Hobbie S. E., Chorover J., Reich P. B., Eisenhauer N., Castellano M., Chadwick O. A., Dobies T., Hale C. M., Jagodziński A. M., Kalucka I., Kieliszewska-Rokicka B., Modrzyński J., Rožen A., Skorupski M., Sobczyk Ł., Stasińska M., Trocha L. K., Weiner J., Wierzbicka A., Oleksyn J. Effects of litter traits, soil biota, and soil chemistry on soil carbon stocks at a common garden with 14 tree species // Biogeochemistry. 2015. V. 123. Iss. 3. P. 313–327.
- Pretzsch H., del Río M., Biber P., Arcangeli C., Bielak K., Brang P., Dudzinska M., Forrester D. I., Klädtke J., Kohnle U., Ledermann T., Matthews R., Nagel J., Nagel R., Nilsson U., Ningre F., Nord-Larsen T., Wernsdörfer H., Sycheva E. Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives // Europ. J. For. Res. 2019. V. 138. Iss. 1. P. 165–185.
- Schugalei L. S. The Siberian afforestation experiment: history, methodology, and problems // Tree species effects on soils: Implications for global change. Proc. NATO Adv. Res. Workshop on Trees and Soil Interactions, Implications to Global Climate Change, Aug. 2004, Krasnoyarsk, Russia / D. Binkley, O. Menyailo (Eds.). Springer Dordrecht, 2005. P. 257–268.

THE MAIN COMPONENTS OF ARTIFICIAL FOREST BIOGEOCENOSES OF A MULTI-YEAR EXPERIMENT

I. N. Bezkorovaynaya¹, O. M. Shabalina¹, L. S. Shugaley²

¹ Siberian Federal University

Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

² Krasnoyarsk State Agrarian University

Prospekt Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049 Russian Federation

E-mail: ibezkorovaynaya@sfu-kras.ru, oshabalina@sfu-kras.ru, ibezkorovaynaya@sfu-kras.ru

The interaction of the main forest-forming species of Siberia: Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.), bush birch (*Betula fruticosa* Pall.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), aspen (*Populus tremula* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), and Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) with agro-gray soil is considered. The study is carried out in a special long-term experiment with forest crops, initiated by prof. N. V. Orlovskiy in 1968-69 in the southern taiga on the territory of the Kemchug Upland. It was revealed that biological characteristics and successional position of tree species significantly influence all components of the phytocenosis. The biggest changes were recorded under the canopy of early successional coniferous (larch) and small-leaved (birch and aspen) species, while late successional species – spruce and cedar – at this stage significantly limit the development of subordinate layers. Over the 45-year period of growth of forest crops, the soil profile is formed due to the differentiation of the arable substrate of the soil-forming species into genetic horizons. The influence of the forest canopy on planted agro-gray soil occurs gradually and intensifies with the growth and development of crops, the formation of a litter horizon and covers all soil properties. Active modern soil formation affects the mineral soil layer 0–10 (13) cm. Vertical flows of matter and energy entering the soil in the process of increasing capacity and intensity of the biological cycle are the main factor in the formation of the soil profile. The development of soil under forest crops under the conditions of a long-term zonal experiment was noted.

Keywords: gray planted soil, tree species, tree stand, undergrowth, underwood, living ground cover.

How to cite: Bezkorovaynaya I. N., Shabalina O. M., Shugaley L. S. The main components of artificial forest biogeocenoses of a multi-year experiment // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 83–95 (in Russian with English abstract and references).

УДК 630.181:58.006

ЛИПА В ДЕНДРАРИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА ИНСТИТУТА ЛЕСА ИМ. В. Н. СУКАЧЕВА СО РАН «ПОГОРЕЛЬСКИЙ БОР»

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

E-mail: msedaeva@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

В дендрарии экспериментального хозяйства Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор» произрастают деревья двух видов лип: европейский вид – липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) и дальневосточный – л. амурская (*T. amurensis* Rupr.). Высота липы мелколистной 9–16 м, диаметр ствола – 10–36.5 см, л. амурской – соответственно 11.5–14.5 м и 7.5–21.5 см. Растения обоих видов характеризуются высокой зимостойкостью, не повреждаются весенними заморозками и мало заселяются вредителями. Зацветают липы в середине июля при достижении суммы эффективных температур около 800 градусо-дней (42.2–43.0 % от общей $t_{\text{эф}}$ > 5 за год) и продолжают цветение в течении 10–17 дней. Плоды-орешки созревают в сентябре. У липы мелколистной орешки имели длину 5.7 мм, ширину 4.4 мм и массу 1000 шт. 23.6 г, семени – соответственно 4.0 мм, 3.0 мм и 14.5 г, у л. амурской эти показатели имели близкие значения – 5.3 мм, 3.9 мм и 23.8 г для орешков, 3.9 мм, 2.6 мм и 16.1 г для семян. Доля пустых семян у липы мелколистной 70 %, а у л. мурской – 30 %. При этом доброкачественность образцов семян обоих видов не превышала 30 %. На территории дендрария имеется естественное возобновление липы, в том числе и семенное. Наиболее обильно оно на расстоянии 50–100 м от материнских растений, где его плотность составляет 25–41 шт./м².

Ключевые слова: *Tilia cordata*, *Tilia amurensis*, интродукция, сезонное развитие, качество семян, естественное возобновление.

DOI: 10.15372/SJFS20240309

ВВЕДЕНИЕ

Дендрарий на территории экспериментального хозяйства Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор» создавался в 1960–1970-е годы под руководством научного сотрудника Института кандидата биологических наук Елены Николаевны Протопоповой. Было проведено массовое обследование старых садов любителей, приусадебных участков, питомников и дендрологических садов, опытных сельскохозяйственных станций и лесных научных учреждений в городах и пригородах Красноярска, Ачинска, Абакана, Минусинска и других населенных пунктов Красноярского края (Протопопова, 1966). У выявленных древесных растений инорайонного происхождения были заготовлены семена. Кроме того, семена выписывали из различных ботанических садов Со-

ветского Союза. При исследовании выращенных растений большое внимание уделялось изучению их ритма роста и развития, а также морозостойкости в условиях интродукции в дендрарии.

Целью создания дендрария стало введение в культуру новых древесных растений для использования в озеленении городов Средней Сибири. Здесь прошли испытание более 300 видов древесных растений из разных ботанико-географических областей (Протопопова, 1981). К настоящему времени в дендрарии сохранились представители около 150 видов деревьев и кустарников, в том числе 68 восточно-азиатских видов, 28 североамериканских, 29 европейских, 5 среднеазиатских и 17 видов местной флоры (Седаева, 2016).

Большая часть дендрологической коллекции дендрария имеет возраст более 40 лет. У многих растений сформировался присущий им габитус,

и они вступили в фазу плодоношения. К их числу относятся два произрастающих в дендрарии вида рода лип (*Tilia* L.) – липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) и л. амурская (*T. amurensis* Rupr.). Основной ареал липы мелколистной находится в Европейской части России и в Западной Европе, на территории Западной Сибири он доходит до среднего течения р. Иртыш (Коропачинский, Встовская, 2012). Липа амурская естественно произрастает на Дальнем Востоке: на юге Амурской области и Хабаровского края, в Приморском крае, а также в Китае, Корее и в Японии.

Липа активно используется в озеленительных посадках Красноярска и других населенных пунктов Красноярского края. Исследование особенностей сезонного развития, морозостойкости и репродуктивного потенциала лип мелколистной и амурской, произрастающих в условиях дендрария экспериментального хозяйства Института леса «Погорельский бор», позволит оценить успешность интродукции этих видов в условиях Средней Сибири, а также эффективнее планировать посадки с их участием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дендрарий экспериментального хозяйства Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор» находится в 38 км к северу от Красноярска в пределах Красноярской лесостепи (Черепнин, 1963). В настоящее время площадь экспозиции дендрария составляет 4 га. Дендрарий окружен естественными насаждениями сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) – сосняком вейниково-разнотравно-зеленомошным и бруснично-разнотравно-зеленомошным с примесью березы повислой (*Betula pendula* Roth) и подлеском из шиповника иглистого (*Rosa acicularis* Lindl.). Почвы здесь дерново-подзолистые, супесчаные и легкосуглинистые (Боболева, 1968).

Климат резко континентальный и довольно суровый. По данным ближайшей метеостанции «Сухобузимское», среднегодовая температура воздуха составляет -1.3°C , средняя температура самого теплого месяца (июль) 18.4°C , самого холодного (январь) -21.4°C . Абсолютная минимальная температура воздуха -61°C , абсолютная максимальная температура 39°C . Последний весенний заморозок отмечался в среднем 8 июня, а первый осенний – 30 августа. Продолжительность безморозного периода 82 дня, вегетационного периода – 149 дней (Справочник...,

1967). Среднее количество осадков за год составляет 356 мм, большая часть (83 %) из которых выпадает в теплый период (с марта по октябрь). Снежный покров сохраняется 163 дня, высота его в среднем 40 см (Справочник..., 1969).

Средние суточные температуры воздуха рассчитывали по данным ближайшей метеостанции «Сухобузимское» (Расписание..., 2024), сумму эффективных температур ($t_{\text{эф}} > 5$) – как сумму всех среднесуточных температур воздуха выше 5°C до определенной даты.

Объектом исследования являлись деревья липы мелколистной (56 шт.) и амурской (12 шт.) произрастающие в дендрарии с 1966 г. Растения были выращены из семян, привезенных из Новосибирска (Центральный сибирский ботанический сад СО РАН), из Москвы (Главный ботанический сад РАН) и из Амурской области (Амурская лесная опытная станция Дальневосточного института лесного хозяйства). Биогруппы обоих видов лип находятся в непосредственной близости друг от друга, расстояние между ними около 10 м.

С 2006 по 2023 г. в дендрарии проводили фенологические наблюдения, отмечали состояние генеративной сферы и зимостойкость по методикам, разработанным для ботанических садов (Лапин, Сиднева, 1973; Методика..., 1975; Некрасов, 1980). За начало вегетации принимали начало раскрытия вегетативных почек – появление светло-зеленых полос между кроющими чешуями.

Со всех деревьев каждого вида в 2020 г. были собраны образцы плодов-орешков: 1275 шт. для липы мелколистной, и 324 шт. для липы амурской. С использованием бинокля «Микромед МС-1» измеряли длину и ширину орешков и семян, а также определяли массу образцов на лабораторных весах CAS MW-300T, которую затем пересчитывали на 1000 шт. Изменчивость этих показателей оценивали по эмпирической шкале (Мамаев, 1972). Достоверность различий средних значений оценивалась по критерию Стьюдента (t -тест) (Шмидт, 1984). Поскольку семена лип характеризуются глубоким физиологическим покоем и длительным периодом прорастания (Николаева и др., 1985), то определяли их доброкачественность. Определение проводили методом взрезывания предварительно замоченных в воде на сутки семян (Справочник..., 1978).

Естественное возобновление оценивали методом закладки учетных площадок (Методы..., 2002). Семена лип тяжелые, нелетучие и само-

сев обнаруживается только вблизи материнских деревьев, поэтому по три площадки размером 1×1 м располагали под кронами взрослых лип, а также на расстоянии 10, 50, 100, 150 и 200 м от биогруппы лип. На каждой площадке подсчитывали количество молодых растений липы, включая всходы текущего года. Видовую принадлежность самосева не устанавливали, так как с большой вероятностью он является гибридным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возраст деревьев лип мелколистной и амурской в дендрарии экспериментального хозяйства Института «Погорельский бор» составляет 57 лет, они находятся в генеративном состоянии (рис. 1).

Высота деревьев липы мелколистной варьирует от 9 до 16 м, а диаметр стволов – от 10 до 36.5 см (Седаева, 2016). При интродукции в дендрарии Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева вблизи Красноярска липа мелколистная в 50-летнем возрасте характеризуется похожими размерами – 12.8 м высотой и 25.6 см диаметром ствола (Матвеева и др., 2000). В пределах своего ареала в Европейской части России она достигает больших размеров – до 25 м в высоту и 35 см в диаметре (Чистякова, 1979), а в условиях Западной Сибири при высоте 25 м стволы некоторых экземпляров имели до 80 см в диаметре (Хлонов, 1965). Деревья липы амурской в ден-

драрии имеют в высоту от 11.5 до 14.5 м и от 7.5 до 21.5 см в диаметре ствола. В естественных насаждениях высота этого дерева достигает 30 м, а диаметр ствола 1 м (Коропачинский, Встовская, 2012). В условиях дендрария деревья обоих видов имеют от 1 до 4 стволов. В течение 18 лет наблюдений растения лип мелколистной и амурской успешно переносили зимние периоды. Никаких повреждений побегов морозом у них ни разу не отмечалось.

Растения обоих видов лип в дендрарии слабо заселены вредителями. Ранее на листьях липы мелколистной были обнаружены немногочисленные повреждения, оставленные насекомыми-минерами (Кириченко и др., 2009). Грибные патогены у лип мелколистной и амурской не установлены (Томошевич и др., 2014).

Пробуждение спящих вегетативных почек весной у лип происходит в конце апреля или в начале мая (в разные годы это происходило в период от 26 апреля до 13 мая) при достижении средней суточной температуры 10°C . При этом почки постепенно увеличиваются в размерах, сохраняя кроющие чешуи сомкнутыми. Раскрытие почек и появление первых листьев отмечается довольно поздно – в середине или в конце мая (18 мая – 30 мая) (рис. 2).

Это позволяет молодым листьям и побегам избегать повреждений поздними весенними заморозками, которые в первой половине мая бывают почти ежегодно. Через несколько дней после раскрытия почек начинается рост побегов, его продолжительность около 10 дней (от 7 до 13 дней в разные годы).

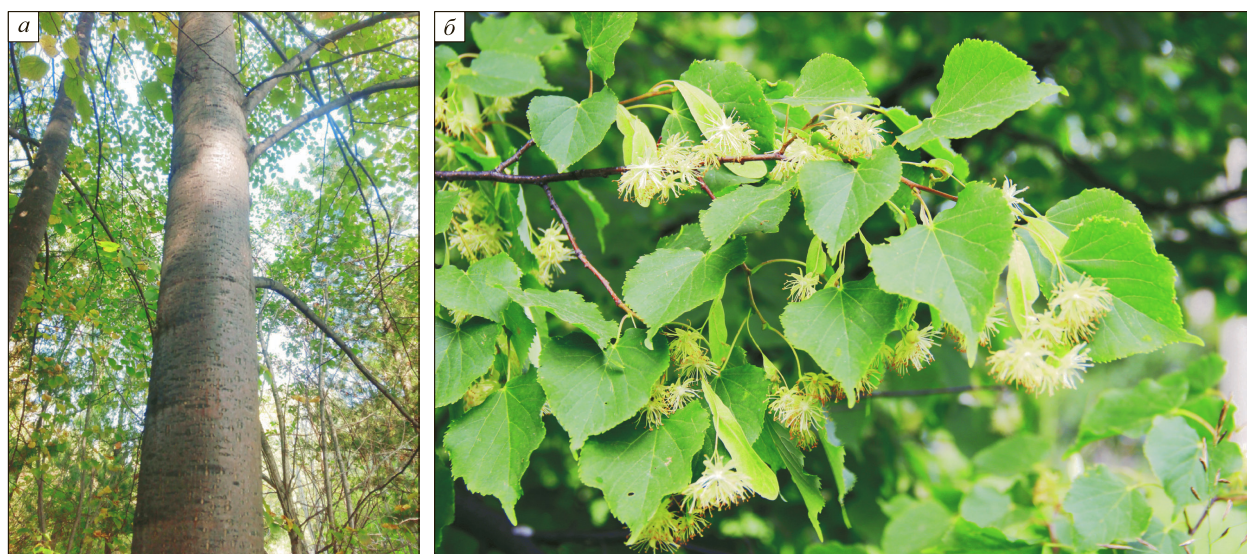


Рис. 1. Внешний вид липы мелколистной в дендрарии экспериментального хозяйства «Погорельский бор». а – ствол дерева (фото автора); б – цветение (фото Р. И. Лоскутова).

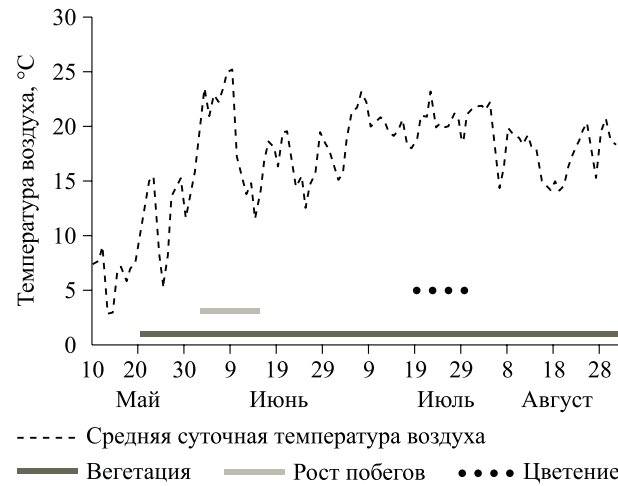


Рис. 2. Сезонное развитие липы мелколистной в дендрарии экспериментального хозяйства «Погорельский бор» в 2023 г.

У липы амурской эти начальные этапы сезонного развития наступают с двух–трехдневным отставанием от липы мелколистной, дальнейшее развитие обоих видов идет почти синхронно.

В дендрарии экспериментального хозяйства «Погорельский бор» липы зацветают в самый теплый период года – в середине июля (15–21 июля), при достижении суммы эффективных температур от 790 до 817 градусо-дней, что составляет от 42.2 до 43.0 % от общей $t_{эф} > 5$ за год. В Новосибирске цветки липы раскрывались 3–27 июля при $t_{эф} > 5$ около 880 градусо-дней (41.8 % от $t_{эф} > 5$ за год) (Хлонов, 1965). В Красноярске липа цветет с середины июля (11–14 июля) (Лоскутов, 1991; Вараксин, Кладько, 2010) при $t_{эф} > 5$ около 811 градусо-дней (41.3 % от $t_{эф} > 5$ за год). Это согласуется с данными

о том, что $t_{эф} > 5$ можно использовать как показатель необходимого количества тепла для развития генеративных органов растений (Некрасова, 1976). Цветение лип в дендрарии «Погорельского бора» продолжается около 13 дней (от 10 до 17), в отдельные годы оно бывает очень обильным, как, например, в 2006, 2017 и в 2023 гг. Созревают плоды в сентябре и до середины зимы, а частично и до весны, остаются на ветках.

Орешки и семена лип мелколистной и амурской в дендрарии не имели статистически значимых различий по длине ($t < 2.6$; при $p = 0.05$). Ширина и орешков, и семян липы мелколистной была достоверно больше, чем у л. амурской ($t > 2.6$ при $p = 0.05$). Масса 1000 шт. семян липы мелколистной была значительно меньше, чем л. амурской ($t > 2.6$; при $p = 0.05$). Изменчивость размеров орешков и семян обоих видов находилась на низком и очень низком уровне (Мамаев, 1972). По сравнению с западно-сибирскими лесостепными районами орешки и семена лип в дендрарии имеют несколько меньшую длину, и существенно меньшую массу (табл. 1).

Вероятно, снижение массы связано с большей долей бессемянных орешков и пустых семян в условиях интродукции.

Известно, что для липы мелколистной характерно относительно низкое качество семян. В отдельные годы в разных частях ареала от 30 до 100 % ее плодов были бессемянными, почти две трети семян оказывались пустыми, а грунтовая всхожесть не превышала 30–40 % (Хлонов, 2006; Jaeger et al., 2016).

В дендрарии экспериментального хозяйства «Погорельский бор» качество семян лип тоже было невысокое. У липы мелколистной 18 %

Таблица 1. Показатели орешков и семян лип мелколистной и амурской в дендрарии экспериментального хозяйства «Погорельский бор»

Вид	Орешки			Семена		
	Длина	Ширина	Масса 1000 шт., г	Длина	Ширина	Масса 1000 шт., г
	мм			мм		
Липа мелколистная	5.68 ± 0.06 4.5–7.0 9.6	4.37 ± 0.04 3.5–5.5 9.3	23.60 ± 0.25 23.0–24.0 2.3	3.98 ± 0.01 3.5–4.0 2.3	2.98 ± 0.03 2.5–3.5 5.4	14.48 ± 0.34 10.5–17.5 12.8
Липа амурская	5.30 ± 0.11 4.5–6.0 8.9	3.90 ± 0.10 3.0–5.0 11.5	23.78 ± 0.13 23.0–25.0 2.8	3.88 ± 0.08 3.5–4.0 6.0	2.63 ± 0.13 2.0–3.0 13.5	16.10 ± 0.19 15.5–16.5 2.6
Липа мелколистная, Западная Сибирь (Хлонов, 1965)	6.3	4.3	25.9	4.0	2.9	17.1

Примечание. Верхняя строчка – средние значения и их ошибки, средняя – крайние значения, нижняя – коэффициент вариации, %.

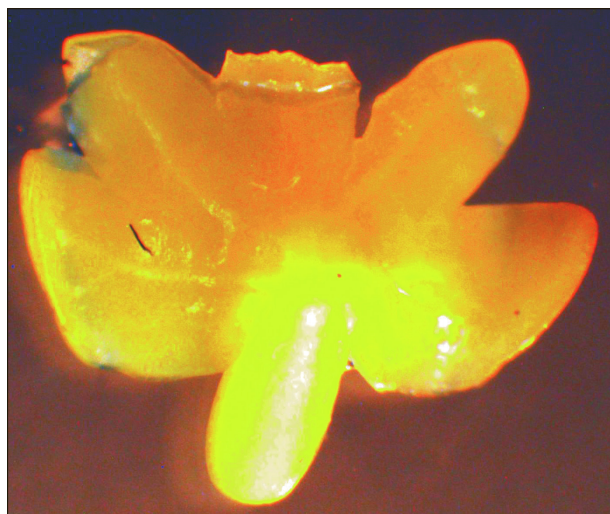


Рис. 3. Здоровый зародыш липы мелколистной, извлеченный из семени.

орешков не содержали семян, а 70 % семян были пустыми, у л. амурской выявлено 21 % бессемянных орешков и 30 % пустых семян. У липы мелколистной 97.7 % полнозернистых семян оказались доброкачественными, содержащими здоровые зародыши, а у л. амурской – только 43 % полных семян можно считать доброкачественными, остальные семена содержали недоразвитые или загнившие зародыши и эндосперм (рис. 3).

В целом доброкачественность образцов семян липы мелколистной в дендрарии составляла 29.3 %, а л. амурской – 30.1 %.

Если выращивание группы растений за пределами естественного ареала вида является начальным этапом интродукции, то завершающим этапом этого процесса можно считать вхождение интродуцента в состав местной флоры – его «дичание» или натурализация. Появление естественного возобновления рассматривают как первый этап натурализации интродуцированных растений (Некрасов, 1971).

Вблизи биогруппы лип мелколистной и амурской в дендрарии присутствует весьма обильное естественное возобновление. Это позволяет считать, что данные интродуцированные виды находятся на первом этапе натурализации (Некрасов, 1971). Под кронами взрослых деревьев отмечали всходы текущего года в количестве от 0 до 32 шт./м² и небольшое количество молодых растений – от 0 до 9 шт./м². Как известно, деревья липы способны активно возобновляться вегетативно с помощью подземных побегов – ксилоризомов (Чистякова, 1979). В связи с этим трудно судить о том, являются ли молодые де-

ревца липы семенным или вегетативным потомством. За пределами проекций крон всходов не наблюдалось, а число молодых растений увеличивалось. На расстоянии 10 м от границы крон их насчитывали от 12 до 26 шт./м². Максимальное число молодых растений отмечено на расстоянии 50 и 100 м от биогруппы лип – от 25 до 41 шт./м². Далее численность подроста липы довольно резко снижалась, на расстоянии 150 м насчитывали от 2 до 9 шт./м², а на расстоянии 200 м растений липы вовсе не обнаруживали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деревья лип мелколистной и амурской в условиях интродукции в дендрарии экспериментального хозяйства Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор» имеют меньшие размеры, чем в естественных условиях произрастания. Растения обоих видов слабо освоены вредителями, характеризуются высокой зимостойкостью и не повреждаются возвратными весенними заморозками. Цветение лип начинается в середине июля при достижении суммы эффективных температур около 800 градусо-дней, что составляет 42.2–43.0 % от общей $t_{эф} > 5$ за год, продолжительность цветения составляла от 10 до 17 дней в разные годы. Плоды-орешки лип созревают в сентябре. Орешки и семена обоих видов имеют близкие размеры, но они заметно меньше по длине и по массе, чем в естественных насаждениях липы мелколистной в Западной Сибири. У липы мелколистной в дендрарии велика доля пустых семян. При этом доброкачественность образцов семян обоих видов не превышала 30 %. На территории дендрария имеется естественное возобновление липы, в том числе и семенное. Наиболее обильно оно на расстоянии 50–100 м от материнских растений. Все это свидетельствует о начале натурализации этих видов в условиях Средней Сибири.

Работа выполнена в рамках базового проекта FWES-2024-0028 (№ 124012900557-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боболева Э. Е. К характеристике почвенного покрова Погорельского стационара // Исследования в лесах Сибири. Красноярск: ИЛИД им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1968. Т. 1. С. 33–38.
- Вараксин Г. С., Кладько Ю. В. Особенности фенологического развития липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в различных экологических условиях города Красноярска // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 8. С. 73–77.

- Кириченко Н. И., Лоскутов Р. И., Седаева М. И., Томошевич М. А., Кенис М. Освоение листьев древесных растений-интродуцентов насекомыми-минерами в сибирских дендрариях // Изв. СПбЛТА. 2009. Вып. 187. С. 140–148.
- Коропачинский И. Ю., Встовская Т. Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2012. С. 577–578.
- Латин П. И., Сиднева С. В. Оценка перспективности интродукции растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: ГБС АН СССР, 1973. С. 3–67.
- Лоскутов Р. И. Интродукция декоративных древесных растений в южной части Средней Сибири. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1991. 189 с.
- Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
- Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Романова А. Б. Интродукция растений в дендрарии СибГТУ. Красноярск: СибГТУ, 2000. 194 с.
- Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М.: ГБС АН СССР, 1975. 28 с.
- Методы изучения лесных сообществ / Под ред. В. Т. Ярмишко, И. В. Лянгузовой. СПб.: НИИхимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- Некрасов В. И. Некоторые теоретические вопросы формирования интродукционных популяций лесных древесных пород // Лесоведение. 1971. № 5. С. 26–30.
- Некрасов В. И. Актуальные вопросы развития теории акклиматизации растений. М.: Наука, 1980. 101 с.
- Некрасова Т. П. Влияние температуры воздуха на формирование пыльцы хвойных древесных пород // Лесоведение. 1976. № 6. С. 37–43.
- Николаева М. Г., Разумова М. В., Гладкова В. Н. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. 347 с.
- Протопопова Е. Н. Новые древесные породы Сибири. Интродукция новых пород на юге Красноярского края. М.: Наука, 1966. 104 с.
- Протопопова Е. Н. Итоги интродукции древесных растений в Средней Сибири // Интродукция древесных растений и вопросы семеноводства в лесном хозяйстве. Новосибирск, 1981. С. 34–40.
- Расписание погоды rp5, 2024. https://rp5.ru/Погода_в_Сухобузимском
- Седаева М. И. Рост интродуцированных деревьев в коллекции Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН // Интенсификация лесного хозяйства России: проблемы и инновационные пути решения: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ., Красноярск, 19–23 сент. 2016 г. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2016. С. 166–167.
- Справочник по климату СССР. Вып. 21: Красноярский край и Тувинская АССР. Ч. II: Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 504 с.
- Справочник по климату СССР. Вып. 21: Красноярский край и Тувинская АССР. Ч. IV: Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 402 с.
- Справочник по лесосеменному делу. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 336 с.
- Томошевич М. А., Лоскутов Р. И., Седаева М. И. Анализ патогенной микобиоты листьев древесных растений в дендрарии Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Красноярск) // Бюл. Гл. бот. сада. 2014. № 2. Вып. 200. С. 53–62.
- Хлонов Ю. П. Липы и липняки Западной Сибири. Распространение, лесоводственные свойства, типы лесов, искусственные посадки. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1965. 155 с.
- Хлонов Ю. П. Липа сердцевидная – *Tilia cordata* Mill. // Бот. иссл. Сибири и Казахстана. 2006. Вып. 12. С. 39–53.
- Черепнин Л. М. Флора южной части Красноярского края // Уч. зап. Красн. гос. пед. ин-та. 1963. Т. 24. Вып. 4. 326 с.
- Чистякова А. А. Большой жизненный цикл *Tilia cordata* Mill. // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1979. Т. 84. Вып. 1. С. 85–98.
- Шмидт В. М. Математические методы в ботанике: учеб. пособ. Л.: ЛГУ, 1984. 288 с.
- Jaegere T. De, Hein S., Claessens H. A review of the characteristics of small-leaved lime (*T. cordata* Mill.) and their implications for silviculture in a changing climate // Forests. 2016. V. 7. Iss. 3. Article 56.

LIME TREE IN THE ARBORETUM OF V. N. SUKACHEV INSTITUTE OF FOREST, SIBERIAN BRANCH, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES EXPERIMENTAL STATION «POGORELSKIY BOR»

M. I. Sedaeva

*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: msedaeva@ksc.krasn.ru

Two lime tree species: European – small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and Far Eastern – amur lime (*Tilia amurensis* Rupr.) grow in the arboretum of V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences experimental station «Pogorelskiy Bor». Small-leaved lime tree has 9–16 m in height and 10–36.5 cm in diameter, amur lime tree has 11.5–14.5 m and 7.5–21.5 cm, accordingly. Plants of both species are characterized by high winter hardiness, they are not damaged with spring frosts and rarely attacked by pests. The lime trees begin blooming in the middle of July when the sum of effective temperatures reaches about 800 degrees/day (42.2–43.0 % of the total $t_{ef} > 5$ for the year). They continue blooming during 10–17 days. A fruits – lime-capsules ripen in September. The small-leaved lime tree capsules were 5.7 mm in length, 4.4 mm in width and 23.6 g in weight per 1000 pieces, its seeds were 4.0 mm, 3.0 mm and 14.5 g, accordingly. Sizes of amur lime tree capsules and seeds were similar – 5.3 mm, 3.9 mm and 23.8 g for the first ones and 3.9 mm 2.6 mm and 16.1 for the second ones. The part of empty seeds in small-leaved lime tree was 70 % but the part of such seeds in amur lime tree was 30 %. At the same time, the good quality of seed samples of both species did not exceed 30 %. On the territory of the arboretum there is natural regeneration of lime tree, including self-seeding. It is the most abundant at a distance of 50–100 m from the mother plants, where its density is 25–41 pieces per square meter.

Keywords: *Tilia cordata*, *Tilia amurensis*, introduction, seasonal development, seed quality, natural regeneration.

How to cite: Sedaeva M. I. Lime tree in the arboretum of V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences experimental station «Pogorelskiy Bor» // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 96–102 (in Russian with English abstract and references).

УДК 630*237

ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА СОСНОВЫМИ ДРЕВОСТОЯМИ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ ПРИ РУБКАХ УХОДА ЗА ЛЕСОМ

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

E-mail: viktor_ivanov@ksc.krasn.ru, alnik_borisov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2024 г.

Изучена структура углеродного пула в средневозрастных и спелых сосновых древостоях Красноярской лесостепи при рубках ухода за лесом. В соответствии с методом конверсионных коэффициентов на основе данных по объемным запасам насаждений рассчитана фитомасса фракций (ствола, коры, ветвей и хвои), которая затем пересчитана в запасы углерода. Установлено, что основной вклад в углеродный пул сосновых древостоев вносит стволовая древесина. В средневозрастных сосняках доля стволов в коре составляет 66–70 % от общей фитомассы, а для спелых древостоев – 76–80 %. Вклад корней в средневозрастных древостоях – около 20 %, а в спелых – 14–16 %. На ветви и хвою приходится соответственно около 6.5 и 5.5 %, а в спелых древостоях – 4.5–6.0 и 1.5–1.8 %. Порубочные остатки составляют в средневозрастных древостоях около 13 %, в спелых – около 9 %. В средневозрастных и спелых древостоях при рубке интенсивностью 15–20 % для восстановления пула углерода до дорубочного уровня требуется около 10 лет. Порубочные остатки в количествах, пропорциональных интенсивности рубки, остаются на местах проведения рубок, и углерод, депонированный в этих фракциях, составляет часть пула экосистемы. В целях получения наибольшего прироста фитомассы сосновых древостоев и минимизации эмиссии углерода при рубках наиболее целесообразны выборочные рубки с применением современных технологий по очистке лесосек и переработке лесосечных отходов.

Ключевые слова: *сосняки, рубки ухода, углеродный пул, фракционный состав фитомассы.*

DOI: 10.15372/SJFS202403010

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия растет понимание роли лесов в глобальном углеродном цикле. В ежегодном объеме углерода, циркулирующего между растительностью, почвой и атмосферой, участие лесных экосистем составляет около 80 %. Сплошная вырубка лесов способствует потеплению климата и часто называется одной из главных причин усиления парникового эффекта (Stoffel et al., 2005; Colombo et al., 2012; Chen et al., 2013). Осуществление рубок ухода за лесом по технологии лесосечных работ с нарушением лесоводственных требований нередко приводит к результатам, не соответствующим научно обоснованным видам выборочных рубок, сохраняющим природоохранные и защитные функции лесов (Желдак и др., 2023).

Густота древесных ценозов – объективный показатель, отражающий структуру и про-

дукционный процесс древостоев. Выявление ценотических и экологических эффектов разнотравных ценозов позволяет установить оптимальные параметры сосновых древостоев на разных этапах формирования насаждений с высокими природоохранными свойствами (Бузыкин и др., 2002), а также такой важной экологической функцией, как депонирование углерода. В защитных лесах весьма актуальна разработка параметров проведения рубок обновления и переформирования с сохранением углероддепонирующих функций лесов зеленой зоны. Для оценки углеродного баланса лесных экосистем необходимы научные исследования динамики их фитомассы при лесопользовании. Одной из эффективных мер, направленных на компенсацию воздействия разреживания древостоев при рубках ухода за лесом на окружающую среду, является определение оптимальных параметров рубок, обеспечивающих получение дополни-

тельного прироста древесины и сохранение пула углерода в компонентах насаждений различного возраста. Снижение объемов выбросов углекислого газа, вызванное обезлесением и деградацией лесов, и увеличение поглощения углерода с помощью эффективного лесовыращивания и устойчивого лесопользования является важной задачей лесной отрасли.

Цель настоящей работы – оценка структуры углеродного пула сосновых древостоев Красноярской лесостепи при рубках ухода за лесом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований стали средневозрастные и спелые сосняки мелкотравно-зеленомошные, широко представленные в сосновых борах Красноярской лесостепи. Средневозрастное сосновое насаждение, чистое по составу, сформировано на вырубке 1965 г. Почвенный покров сосняка представлен серыми лесными почвами. Данные по физико-химическим свойствам исследуемых объектов, полученные с использованием агрохимических методов исследования, описаны нами ранее (Шапченкова и др., 2015): гранулометрический состав почв – легкосуглинистый, реакция среды – кислая в органическом горизонте и слабокислая в минеральной части профиля, содержание гумуса – высокое.

В лесотаксационном выделе сосняка зеленомошного I класса бонитета в однородных лесорастительных условиях заложено три пробных площади (пп) размером 0.15 га. Закладка пп, на которых проводились сплошной перебор и нумерация деревьев, выполнена на участках с разными вариантами выборочных рубок по интенсивности рубки запаса. Основные таксационные

характеристики древостоев приведены в табл. 1. Каждая пп репрезентативна для лесного участка, на котором проведена опытная рубка ухода (прореживание).

До рубки эти насаждения характеризовались высокой полнотой, густотой и интенсивными процессами дифференциации деревьев. У большинства деревьев (до 57.3 %) диаметр стволов на высоте 1.3 м был до 10 см, с явными признаками угнетения, что свидетельствует о высокой напряженности конкурентных отношений.

В чистых одноярусных хвойных насаждениях чаще всего применяется низовой метод рубок ухода. При этом в рубку преимущественно назначаются деревья угнетенные, относящиеся к 4-му и 5-му классам роста и развития по шкале Крафта. На пп проводилось равномерное прореживание, направленное на регулирование густоты древостоя и создание благоприятных условий для формирования стволов и крон лучших деревьев. Прореживание выполнено на базе трактора МТЗ-82.1 и бензопилы без прокладки трелевочных волоков. Интенсивность рубки по запасу на пп 1–3 составила от 15 до 17 %. Густота после рубки колебалась от 2280 до 2727 шт./га. Через 10 лет после рубки в возрасте 47 лет древостои имели средний диаметр от 15.8 до 17.1 см и высоту от 19 до 19.6 м. Относительная полнота составила 1.0, запас древесины – 396 м³/га и сумма площадей поперечного сечения стволов – 40.4 м²/га.

Спелые сосновые насаждения на пп 4–8 разнотравно-зеленомошной группы типов леса в возрасте 110 лет II класса бонитета характеризовались высокими таксационными показателями с относительной полнотой 1.0 и более, средним диаметром 29.7–37.1 см, высотой 23.5–27.9 м и стволовым запасом древесины

Таблица 1. Основные таксационные характеристики сосновых древостоев

Номер пп	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма площадей сечения, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
<i>Средневозрастные древостои (41–60 лет)</i>						
1	5460	10.5	15.7	47.5	1.5	355
2	4020	12.4	17.1	48.2	1.5	388
3	5593	10.8	15.9	50.9	1.6	383
<i>Спелые древостои (101–120 лет)</i>						
4	659	29.7	27.9	45.6	1.2	487
5	462	37.1	27.6	49.9	1.3	570
6	397	36.8	26.8	42.2	1.1	500
7	388	34.5	23.5	36.3	1.0	377
8	402	36.6	25.5	42.3	1.0	489

377–570 м³/га. Около 8–12 % от общего числа стволов было представлено сухостоем. Интенсивность рубки по запасу на пп 4–7 составила от 20 до 53 %, на пп 8 рубка не проводилась.

Для оценки радиального прироста на участках, пройденных несплошной рубкой 5- и 10-летней давности и на контроле в пределах каждой пробной площади было взято по 30 кернов на высоте 1.3 м. Ширину годовичных колец измеряли на микроскопе МИР-12 с точностью 0.01 мм. Высоты деревьев и протяженность крон измерялись лазерным высотомером-дальномером TruPulse 200 не менее чем для 15 деревьев с представленностью по ступеням толщины. Для количественной оценки результативности мероприятий по компенсации воздействий на окружающую среду применяется «Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесных насаждений на локальном уровне» (2017), разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Для оценки депонирования углерода лесов использован метод конверсионных коэффициентов (Уткин и др., 2004; Усольцев и др., 2021). Статистическая обработка данных и регрессионный анализ выполнены в программе Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В сосновых древостоях с высокой густотой при жесткой внутривидовой конкуренции велика вероятность потери общей производительности из-за несоответствия хода роста древостоев густотно-возрастным оптимумам продуктивности. Проведенный анализ показал, что при разреживании древостоев выборочными рубками, оставленные на доращивание деревья эффективно используют доступный ресурс, имеют хорошо развитую крону и устойчивый рост по диаметру и объему ствола (Иванов и др., 2017).

В соответствии с методом конверсионных коэффициентов на первом этапе рассчитывается фитомасса в древостое, разделенная по фракциям (ствол, кора, ветви и хвоя). Основой для расчетов служат данные по динамике объемных запасов насаждений, оцениваемые в результате последовательных инвентаризаций (Борисов и др., 2019).

Фитомасса компонентов насаждения, приходящаяся на единицу запаса, рассчитана посредством моделей, обладающих высоким уровнем общности и хорошо согласующихся с региональными фактическими данными. Для сосно-

вых древостоев расчеты выполнены в соответствии с уравнением (Таблицы..., 2008)

$$M_{\text{ф}} = G \times C_0 \times B^{C_1} \times A^{(C_2 + C_3 \times P + C_4 \times P_2)},$$

где $M_{\text{ф}}$ – фитомасса фракций, т/га; G – Запас древостоя, м³/га; A – средний возраст древостоя, лет; B – код класса бонитета; P – относительная полнота.

Для каждого вида фракций фитомассы используется свой набор значений коэффициентов C_0 – C_4 , который зависит от лесорастительной зоны. Для расчета фитомассы фракций рассматриваемых древостоев на пп, использованы коэффициенты, полученные для лесостепной зоны (Таблицы..., 2008). Результаты расчета фитомассы фракций в абсолютно сухом состоянии приведены в табл. 2.

В рассматриваемых древостоях естественное очищение стволов от сучьев обуславливает приоритет стволов и корней в накоплении углерода при незначительном участии в этом процессе крон деревьев. Корневая система находится на втором месте после стволовой древесины по вкладу в общую фитомассу древостоя. На пп в средневозрастных древостоях отношение $M_{\text{корн}}/M_{\text{общ}}$ равно 0.20, а для крон – 0.12.

Оценка содержания углерода в абсолютно сухой фитомассе деревьев проводилась с использованием переводных коэффициентов. Для хвои установлен переводной коэффициент 0.45, а для остальных фракций – 0.50 (Операционная модель..., 2010; Филипчук и др., 2016; Методические указания..., 2017). Содержание углерода во фракциях фитомассы для пп приведены в табл. 3.

Порубочные остатки, появившиеся в процессе лесосечных работ (отходы древесины: ветки, сучки, обломки стволов, вершины, откомлевка, пни), остаются в лесной экосистеме, содержащийся в них углерод включается в углеродный пул оставшегося после выборочной рубки насаждения. Следует отметить, что порубочные остатки составляют значительную часть фракционного состава фитомассы вырубемых деревьев. При применяемых в настоящее время технологиях из общего запаса древесного сырья используется в основном стволовая древесина, что составляет около 65 % биомассы дерева. По данным В. Г. Шатравко и Н. В. Толкачева (2011), объем порубочных остатков, оставляемых на вырубке, зависит от интенсивности рубок и технологии лесосечных работ, и на 1 м³ стволовой древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при сплошно-лесосечных рубках

Таблица 2. Фитомасса фракций в абсолютно сухом состоянии

Номер пп	Состояние, интенсивность рубки по запасу	Полнота	Запас, м³/га	Фитомасса, т/га				
				Ствол в коре	Кора	Ветви	Хвоя	Корни
Средневозрастные древостои (41–60 лет)								
1	До рубки	1.5	355	144.28	17.29	14.26	13.71	45.86
	После рубки 15 %	1.1	308	125.18	15.00	12.37	11.89	39.79
	10 лет после рубки	1.4	415	167.02	16.40	15.32	12.52	47.97
2	До рубки	1.5	388	115.38	9.86	13.64	8.50	36.49
	После рубки 17 %	1.2	321	130.46	15.64	12.89	12.40	41.47
	10 лет после рубки	1.5	456	187.54	19.22	15.85	13.37	52.06
3	До рубки	1.6	383	159.78	20.09	14.59	14.32	49.21
	После рубки 16 %	1.2	323	134.75	16.94	12.31	12.07	41.50
	10 лет после рубки	1.4	431	173.46	17.03	15.91	13.01	49.82
Спелые древостои (101–120 лет)								
4	До рубки	1.2	487	193.65	7.93	11.15	4.73	34.12
	После рубки 20 %	1.0	389	154.68	6.34	8.91	3.78	27.25
	10 лет после рубки	1.2	462	184.31	7.12	10.08	4.07	30.98
5	До рубки	1.3	570	229.24	9.68	12.03	5.43	38.72
	После рубки 30 %	0.9	408	164.07	6.54	12.24	4.02	32.88
	5 лет после рубки	0.9	432	174.03	6.73	12.68	4.05	34.09
6	До рубки	1.1	500	198.06	7.96	12.48	4.92	36.41
	После рубки 35 %	0.8	324	132.77	5.36	10.73	3.16	27.79
	5 лет после рубки	0.8	339	139.19	5.45	10.99	3.15	28.49
7	До рубки	1.0	377	152.80	7.70	11.79	4.59	32.37
	После рубки 50 %	0.5	177	81.86	4.62	9.25	1.98	21.59
	5 лет после рубки	0.5	198	91.84	5.04	10.16	2.10	23.72
8	Контроль	1.0	489	198.19	9.99	15.30	5.96	41.98

составляет 0.121–0.175 м³. Степень изменения условий среды при рубках зависит от интенсивности рубок, применяемой техники, технологии и сезона лесозаготовок. По данным сортиментных таблиц (Сортиментные и товарные таблицы..., 2005) по сосне установлено, что отходы из деловых и дровяных древесных стволов, имеющих диаметр 12–16 см составляют в среднем около 13 % от общего объема ствола в коре, а при диаметре 28–40 см – 9 %. На пп в средневозрастных сосновых древостоях запасы углерода в порубочных остатках составили от 2.68 до 3.48 тС/га. В спелых сосновых древостоях в порубочных остатках законсервировано около 9 % углерода, т. е. от 2.54 до 7.65 тС/га. Содержание углерода во фракциях фитомассы порубочных остатков приведены в табл. 4.

При выборочных рубках в 110-летних древостоях сосны восстановление запасов углерода до его дорубочного уровня происходит быстрее за счет увеличения прироста стволовой древесины и кроны оставшейся части древостоя (Азаренок, 1998; Колтунова и др., 2010).

Исследованиями влияния выборочной рубки на рост и продуктивность сосняков установлена связь текущего периодического радиального прироста с начальной густотой и интенсивностью рубки (Борисов и др., 2019; Иванов, Семякин, 2021).

Прирост возрастает с увеличением интенсивности рубки, причем наиболее отчетливо эта тенденция прослеживается при разреживании насаждений с высокой начальной густотой. Результаты исследований (Иванов, Семякин, 2021) свидетельствуют о том, что за счет разреживания древостоев возможно получить дополнительный прирост порядка 1–5 м³/(га · год). При условии сохранения такого уровня прироста через 15–20 лет ко времени проведения второго приема рубки можно получить дополнительно от 15 до 100 м³ крупномерной древесины.

Как следует из приведенных данных (табл. 3, 4), пул углерода в средневозрастных древостоях с учетом порубочных остатков, пройденных рубкой интенсивностью 15–17 %, через 10 лет увеличился и превысил дорубочный уровень в

Таблица 3. Содержание углерода во фракциях фитомассы

Номер пп	Состояние, интенсивность рубки по запасу	Запас, м³/га	Содержание углерода, т/га					
			Ствол в коре	Кора	Ветви	Хвоя	Корни	Всего
Средневозрастные древостои (41–60 лет)								
1	До рубки	355	72.1	8.6	7.1	6.2	22.9	108.4
	После рубки 15 %	308	62.6	7.5	6.2	5.4	19.9	94.0
	10 лет после рубки	415	83.5	8.2	7.7	5.6	24.0	120.8
2	До рубки	388	78.8	9.4	7.8	6.7	25.1	118.4
	После рубки 17 %	321	65.2	7.8	6.4	5.6	20.7	98.0
	10 лет после рубки	456	93.8	9.6	7.9	6.0	26.0	133.7
3	До рубки	383	79.9	10.0	7.3	6.4	24.6	118.2
	После рубки 16 %	323	67.4	8.5	6.2	5.4	20.7	99.7
	10 лет после рубки	431	86.7	8.5	8.0	5.9	24.9	125.4
Спелые древостои (101–120 лет)								
4	До рубки	487	96.8	4.0	5.6	2.1	17.1	121.6
	После рубки 20 %	389	77.3	3.2	4.5	1.7	13.6	97.1
	10 лет после рубки	462	92.2	3.6	5.0	1.8	15.5	114.5
5	До рубки	570	114.6	4.8	6.0	2.4	19.4	142.4
	После рубки 30 %	408	82.0	3.3	6.1	1.8	16.4	106.4
	5 лет после рубки	432	87.0	3.4	6.3	1.8	17.0	112.2
6	До рубки	500	99.0	4.0	6.2	2.2	18.2	125.7
	После рубки 35 %	324	66.4	2.7	5.4	1.4	13.9	87.1
	5 лет после рубки	339	69.6	2.7	5.5	1.4	14.2	90.7
7	До рубки	377	76.4	3.9	5.9	2.1	16.2	100.5
	После рубки 50 %	177	40.9	2.3	4.6	0.9	10.8	57.2
	5 лет после рубки	198	45.9	2.5	5.1	0.9	11.9	63.8
8	Контроль	489	99.1	5.0	7.6	2.7	21.0	130.4

Таблица 4. Содержание углерода во фракциях фитомассы порубочных остатков

Номер пп	Интенсивность рубки, %	Углерод в срубленных деревьях, т/га				
		Отходы древесных стволов	Ветви	Хвоя	Корни	Всего порубочных остатков
1	13	1.06	0.31	0.15	1.16	2.68
2	17	1.16	0.45	0.21	1.66	3.48
3	16	1.17	0.38	0.18	1.48	3.21
4	20	1.40	0.23	0.04	0.87	2.54
5	28	2.34	0.35	0.06	1.40	4.15
6	35	2.51	0.45	0.07	1.63	4.66
7	53	3.12	1.04	0.20	3.29	7.65

среднем на 13 %. В спелых сосновых древостоях запасы углерода, включая порубочные остатки, составили при интенсивности рубки 20 % на пп 4 через 10 лет 96 % от первоначального значения до рубки; при интенсивности 30–35 % через 5 лет после рубки депонировано углерода 76 и 82 % для пп 5 и 6 соответственно, при интенсивности рубки 50 % на пп 7 через 5 лет после рубки – 71 % углерода от первоначального значения до рубки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вклад в углеродный пул сосновых древостоев вносит стволовая древесина. В средневозрастных сосняках доля стволов в коре составляет 66–70 % от общей фитомассы, а для спелых древостоев – в пределах 76–80 %. Следующий по значению вклад вносят корни, доля которых в углеродном пуле в средневозрастных древостоях составляет около

20 %, а для спелых – 14–16 %. На ветви и хвою приходится около 6.5 и 5.5 % соответственно, а в спелых древостоях – 4.5–6.0 и 1.5–1.8 %. В средневозрастных сосновых древостоях запасы углерода в порубочных остатках составили от 2.68 до 3.48 тС/га, а в спелых сосновых древостоях – от 2.54 до 7.65 тС/га. Порубочные остатки в количествах, пропорциональных интенсивности рубки, остаются на местах проведения рубок, и углерод, депонированный в этих фракциях, является составной частью пула экосистемы.

После рубок ухода прирост стволовой древесины и кроны оставшейся части древостоя увеличивается. Прирост зависит от интенсивности рубки, и особенно ярко это проявляется при разреживании насаждений с высокой начальной густотой. Дополнительный прирост стволовой древесины вкупе с учетом вклада оставшихся после рубки фракций фитомассы приводит к достаточно быстрому восстановлению запаса углерода. Пул углерода в средневозрастных древостоях, пройденных рубкой интенсивностью 15–17 %, через 10 лет превысил дорубочный уровень. В спелых сосновых древостоях запасы углерода с учетом порубочных остатков при интенсивности рубки 20 % через 10 лет составили 96 % от значения до рубки; при интенсивности 30–35 % через 5 лет после рубки депонировано углерода 76–82 %; при интенсивности рубки 50 % через 5 лет после рубки – 71 %.

В целях получения наибольшего прироста фитомассы лесов и минимизации потерь при депонировании углерода наиболее целесообразны выборочные рубки с применением современных технологий по очистке лесосек и переработке лесосечных отходов. Это позволит в большей мере решать экологические проблемы, обеспечивая неистощимость экологического и сырьевого потенциала лесного фонда в процессе устойчивого управления лесами. Увеличить поглощение углерода и минимизировать эмиссию углекислого газа при рубках ухода за лесом в определенном возрасте можно путем определения оптимальной интенсивности разреживания древостоя с целью получения максимального прироста фитомассы и увеличения углерододепонирующих свойств насаждений.

Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках

Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азаренок В. А. Экологизированные рубки леса. Екатеринбург: УГЛТА, 1998. 100 с.
- Борисов А. Н., Иванов В. В., Петренко А. Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 7–18.
- Бузыкин А. И., Пишеничникова Л. С., Суховольский В. Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 2002. 152 с.
- Желдак В. И., Дороженкова Э. В., Сычева А. Н., Липкина Т. В., Живаев Е. Е. Технологическая реализация лесоводственных мероприятий, обеспечивающих эффективное выполнение лесами функций депонирования и консервации углерода // Лесохоз. инф. 2023. № 3. С. 5–25.
- Иванов В. В., Борисов А. Н., Петренко А. Е., Семенякин Д. А., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С. Густота сосновых древостоев при интенсивном лесовыращивании // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 102–109.
- Иванов В. В., Семенякин Д. А. Влияние выборочных рубок на продуктивность сосновых древостоев в условиях Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2021. № 1. С. 58–67.
- Колтунова А. И., Азаренок В. А., Усольцев В. А. Расчет приходной части углеродного баланса при постепенных рубках древостоев основных лесобразующих пород // Изв. Оренбург. гос. агр. ун-та. 2010. № 3 (27). С. 30–33.
- Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесных насаждений на локальном уровне. М.: ЦЭПЛ РАН, 2017. 15 с.
- Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р (ред. от 20.01.2021). М.: Минприроды России, 2017.
- Операционная модель учета углерода Канадского лесного сектора CBM-CFS3 версия 1.0: Руководство пользователя / Kull S. J., Kurz W. A., Rampley G. J., Banfield G. E., Schivatcheva R. K. (пер. с англ.) / M. J. Apps (Ed.). North. For. Centre, 2010. 112 с.
- Сортиментные и товарные таблицы для древостоев Западной и Восточной Сибири. Новосибирск, 2005. 176 с.
- Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепашенко, С. Нильссон, Ю. И. Булуй. Изд. 2-е, доп. М.: Фед. агентство лесн. хоз-ва; Междунар. ин-т прикл. сист. анализа (ИАСА), 2008. 886 с.
- Усольцев В. А., Ковязин В. Ф., Цепордей И. С. Текущее накопление углерода в лесах двух экорегионов России // Изв. СПбЛТА. 2021. Вып. 237. С. 75–96.
- Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Честных О. В. Пулы углерода фитомассы и почв сосновых лесов России // Хвойные бореал. зоны. 2004. Вып. 2. С. 13–21.

- Шапченко О. А., Ковалева Н. М., Иванов В. В., Собачкин Р. С., Собачкин Д. С., Петренко А. Е. Влияние азотных удобрений на свойства подстилки и живой почвенный покров в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 1. С. 44–51.
- Филипчук А. Н., Малышева Н. В., Мусеев Б. Н., Страхов В. В. Аналитический обзор методик учета выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы // Лесохоз. инф. 2016. № 3. С. 36–85.
- Chen B., Arain M. A., Khomik M., Trofymow J. A., Grant R. F., Kurz W. A., Yeluripati J., Wang Z. Evaluating the impacts of climate variability and disturbance regimes on the historic carbon budget of a forest landscape // Agr. For. Meteorol. 2013. V. 180. P. 265–280.
- Colombo S. J., Chen J., Ter-Mikaelian M. T., McKechnie J., Elkie P. C., MacLean H. L., Heath L. S. Forest protection and forest harvest as strategies for ecological sustainability and climate change mitigation // For. Ecol. Manag. 2012. V. 281. P. 140–151.
- Stoffel J. L., Gower S. T., Plaut J., Holmes B. Carbon pools in a boreal mixed wood logging chronosequence // Glob. Change Biol. 2005. V. 11. Iss. 11. P. 1883–1894.

CARBON DEPOSITION BY PINE STANDS OF THE KRASNOYARSK FOREST STEPPE DURING CARE LOGGING

V. V. Ivanov, A. N. Borisov

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: viktor_ivanov@ksc.krasn.ru, alnik_borisov@mail.ru

The structure of the carbon pool in the middle-aged and mature pine stands of the Krasnoyarsk forest-steppe during care logging has been studied. The basis for calculations is data on the dynamics of the volume stocks of the stands. In accordance with the method of conversion coefficients, the phytomass of fractions (stem, bark, branches and needles) was calculated, which was then converted into carbon stocks. It has been established that the main contribution to the carbon pool of pine stands is made by stem wood. In medium-aged pine stands, the proportion of stems in the bark is 66–70 % of the total phytomass, and for mature stands this value is in the range of 76–80 %. The contribution of roots in medium-aged stands is about 20 %, and in mature stands 14–16 %. Branches and needles account for about 6.5 and 5.5 %, respectively, and in mature stands – 4.5–6.0 and 1.5–1.8 %. Felling residues account for about 13 % in medium-aged stands, and about 9 % in mature stands. In medium-aged and mature stands, when felling with an intensity of 15–20 %, it takes about 10 years to restore the carbon pool to the pre-cutting level. Felling residues in quantities proportional to the intensity of logging remain at the logging sites, and the carbon deposited in these fractions is an integral part of the ecosystem pool. In order to obtain the greatest increase in the phytomass of pine stands and minimize carbon losses during felling, selective logging using modern technologies for clearing felling areas and processing logging waste is most appropriate. It is possible to increase carbon absorption and minimize carbon dioxide emissions during felling of forest care by determining the intensity of optimal thinning of the tree stand.

Keywords: *pine forests, care logging, carbon pool, fractional composition of phytomass.*

How to cite: *Ivanov V. V., Borisov A. N. Carbon deposition by pine stands of the Krasnoyarsk forest steppe during care logging // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 103–109 (in Russian with English abstract and references).*

УДК 595.7:591.53

ДОЛГОСРОЧНАЯ ДИНАМИКА ПОПУЛЯЦИЙ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ В КРАСНОТУРАНСКОМ СОСНОВОМ БОРУ

В. Г. Суховольский¹, О. В. Тарасова²

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

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: soukhovolsky@yandex.ru, olvitarasova2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.02.2023 г.

Описан опыт 40-летнего (1978–2016 гг.) регулярного исследования численности пяти видов насекомых-филлофагов в пяти ландшафтных структурах Краснотуранского соснового бора (юг Красноярского края). На основе полученных данных предложены модели динамики численности популяций этих видов. В основу моделей положено представление о существовании положительных и отрицательных обратных связей в популяциях. Такой подход позволил не учитывать воздействие паразитоидов на насекомых. Для расчетов была предложена авторегрессионная (AR) модель, согласно которой текущая плотность линейно зависит от плотностей предыдущих лет. Коэффициенты модели вычислялись по данным многолетних учетов. Показано, что для большинства популяций характерно влияние плотности прошедшего сезона на текущую плотность в форме положительной обратной связи и влияние на текущую плотность плотности предпредыдущего сезона в форме отрицательной обратной связи. Рассмотрены характеристики устойчивости популяционной динамики отдельных видов в различных местообитаниях. В качестве характеристик устойчивости использованы показатели запаса по устойчивости, широко используемых в теории управления. Показано, что запас по устойчивости для пилильщиков (*Tenthredinidae* Latreille) несколько больше, чем для других групп видов, что согласуется с меньшей дисперсией численности популяций этих видов при многолетних учетах. Использование AR-моделей и характеристики запаса по устойчивости позволило классифицировать ландшафтные структуры на территории Краснотуранского бора по рискам возникновения в этих ландшафтах вспышек массового размножения.

Ключевые слова: лесные насекомые-филлофаги, учеты численности, многолетняя динамика, модели, авторегрессия, запас по устойчивости.

DOI: 10.15372/SJFS20240311

ВВЕДЕНИЕ

Изучение связей динамики численности различных видов лесных насекомых в одном местообитании или одного вида в разных местообитаниях важно при оценке влияния различных факторов на популяционную динамику. Подобные связи указывают на наличие экологических механизмов, приводящих к согласованию временных рядов популяционной динамики, что позволяет оценить влияние различных факторов, действующих на эти популяции. Пространственно-временная синхронизация динамики численно-

сти разных видов лесных насекомых изучалась многими авторами в течение последних десятилетий (Тарасова, 1982, 1983; Пальникова, 1984; Henttonen et al., 1985; Miller, Epstein, 1986; Hanski, Woiwood, 1993; Haydon, Steen, 1997; Sutcliffe et al., 1997; Bascombe, Sole, 1998; Myers, 1998; Ranta et al., 1998; Bjørnstad et al., 1999; Curran, Webb, 2000; Liebhold, Kamata, 2000; Buonaccorsi et al., 2001; Bjørnstad, Bascombe, 2002; Peltonen et al., 2002; Choi et al., 2011; Kapeller et al., 2011; Haynes et al., 2012; Herrero et al., 2012; Schowalter, 2012; Van Rossum, Triest, 2012; Bone et al., 2013; Foster et al., 2013).

Показано, что степень связи популяционной динамики одного вида в разных местообитаниях монотонно уменьшается с увеличением расстояния между этими местообитаниями. Если же уровень связей динамики популяций не уменьшается при увеличении расстояния между местообитаниями, а расстояние между ними существенно превосходит радиус перемещения особей изучаемого вида, то следует говорить о его пространственной когерентности, связанной с реакцией популяции на воздействие мощного модифицирующего фактора (Liebhold et al., 2004). Существует множество количественных данных о прямом влиянии погоды и межгодовых климатических колебаний, которые могут привести к крупномасштабным вспышкам (Sherriff et al., 2011; Chapman et al., 2012; Bentz et al., 2014; Hart et al., 2014). В более длительные периоды времени (от десятилетий до столетий) изменение климата может косвенно повлиять на численность насекомых (Bentz et al., 2010).

В ходе этих исследований стало ясно, что вспышки массового размножения вредителей леса – более сложный процесс, чем предполагалось ранее. В частности, они обусловлены факторами разного масштаба, например численностью хозяев на уровне древостоя, взаимосвязанностью на уровне ландшафта и влиянием климата на региональном уровне (Seidl et al., 2016; Senf et al., 2017). Следовательно, существует потребность в лучшем количественном понимании причинно-следственных связей и межмасштабных взаимодействий, ведущих к крупномасштабным вспышкам (Raffa et al., 2008; Senf et al., 2017). По мнению разных авторов, причиной синхронизации популяционной динамики одного вида в разных местообитаниях может быть эффект Морана, связанный с однородностью климатических условий на значительной территории и сходством реакции популяций на изменение погоды в различных местообитаниях (Moran, 1953; Pollard, 1979; Baars, Van Dijk, 1984; Williams, Liebhold, 1995; Maron, Harrison, 1997; Bjørnstad et al., 1999; Volney, Fleming, 2000; Bjørnstad, Bascompte, 2002).

Для количественной оценки связей популяционной динамики отдельного вида в различных местообитаниях или нескольких видов в одном местообитании необходимы длительные (в течение нескольких десятков лет) наблюдения за данными видами насекомых на постоянных пробных площадях (пп). К сожалению, такие полевые исследования проводятся достаточно редко, а для коротких временных рядов полу-

чить достоверные статистические оценки связей между ними не представляется возможным (Дженкинс, Ваттс, 1971; Андерсон, 1976; Кендалл, Стьюарт, 1976; Марпл мл., 1990).

Таким образом, анализ долгосрочной динамики популяций животных крайне важен для понимания процессов, происходящих в экосистемах, с точки зрения как эндогенных характерных особенностей особей в популяциях, так и экзогенных взаимодействий в экосистемах. Однако технические трудности многолетних учетов численности популяций животных сильно ограничивают возможности получения таких долгосрочных данных. Общее число временных рядов долгосрочной динамики популяций животных можно перечислить на пальцах одной руки. Прежде всего, это классический ряд динамики популяций зайцев и рысей на побережье Гудзонова залива в Канаде с середины XIX по середину XX в. (Elton, Nicholson, 1942). Безусловно, проблемы этого ряда связаны с непрямими методами оценки плотностей изучаемых популяций. И в этом отношении гораздо более надежны данные по многолетней динамике популяций лосей (*Alces Gray*) и волков (*Canis Linnaeus*) на о. Айл-Ройаль (США) (Peterson, Page, 1988; Peterson et al., 1998; Wolves..., 2024). Конечно, следует упомянуть два классических долгосрочных временных ряда для лесных насекомых – популяций численности серой листовёртки (*Zeiraphera griseana* (Hubner) (Lepidoptera, Tortricidae) в Швейцарских Альпах (Baltensweiler, 1964) и популяции сосновой пяденицы (*Bupalus piniarius* L.) (Lepidoptera, Geometridae) в Тюрингии (Schwerdtfeger, 1952, 1968). Наличие таких длинных временных рядов позволяет использовать для их анализа достаточно сложные математические методы системного, корреляционного и спектрального анализа, позволяющие выявить достаточно редкие вариации динамики численности, которые не наблюдаются на коротких временных рядах.

Редкость долгосрочных рядов динамики численности популяций животных вызвана различными объективными и субъективными причинами. Во-первых, для проведения таких исследований необходимы местообитания, характеризующиеся отсутствием техногенных и антропогенных воздействий. Во-вторых, должны существовать организации или отдельные лица, заинтересованные в проведении таких исследований. Данные по зайцам (*Lepus Linnaeus*) и рысям (*Lynx Kerr*) в Гудзоновом заливе получены вследствие коммерческих интересов ком-

пании – заготовителя пушнины и только в 20-х годах прошлого века экологи оценили возможности анализа этих временных рядов в связи на основе предложенных в это время моделей динамики численности Лотки – Вольтерра. Долгосрочные учеты численностей популяций лосей и волков на о. Айл-Ройаль проводятся на технической базе находящегося здесь заповедника. Данные по динамике численностей серой лиственничной листовертки и сосновой пяденицы собирались службами защиты леса.

Инициативные учеты численности животных (в частности, лесных насекомых) обычно достаточно коротки. Обычно эти данные собираются в процессе выполнения диссертационных работ и включают сведения чаще всего не более чем за 5 лет, после чего авторы инициативных учетов переключаются на другую тематику и к тому же на пробных площадях, где проводились учеты, происходят изменения, связанные с техногенными и антропогенными воздействиями на изучаемые экосистемы. Это приводит либо к исчезновению учитываемых видов животных, либо к таким изменениям условий существования этих популяций, после которых данные разных лет становятся несопоставимыми.

Проведение долгосрочных исследований численности лесных насекомых в Краснотуранском сосновом бору было вызвано целым рядом причин. На момент начала этих исследований (1978 г.) никто, и в том числе инициатор работ в этом местообитании директор Института леса и древесины СО АН СССР А. С. Исаев, не планировали проведения многолетних исследований. Речь шла всего лишь о написании диссертационных работ двумя аспирантками (Е. Н. Сорокопуд (Пальниковой) – по динамике численности сосновой пяденицы, и О. В. Тарасовой – по структуре комплекса насекомых-филлофагов) на территории, где только что закончилась вспышка массового размножения сосновой пяденицы. Фактически планировались исследования не более чем на 3–5 лет. Однако после защиты кандидатских диссертаций О. В. Тарасовой (1983), Е. Н. Пальниковой (1984) и В. Г. Суховольским (1984) учеты пяти видов насекомых-филлофагов в Краснотуранском бору продолжались (к недоумению коллег) сначала как бы по инерции, а затем, после достижения критической длины временных рядов (примерно 12 лет), когда стало возможным анализировать полученные данные с использованием сначала методов, разработанных в лаборатории А. С. Исаева (Киреев, 1977), а затем собственных методов, и успешно

публиковать результаты этого анализа. Регулярные учеты продолжались и после защит докторских диссертаций В. Г. Суховольским (1996), Е. Н. Пальниковой (2000) и О. В. Тарасовой (2004) и далее вплоть до кончины Е. Н. Пальниковой в 2018 г. (Тарасова и др., 2020, 2024).

Все эти годы исследования были посвящены двум основным направлениям: анализу долгосрочной динамики численности популяций лесных насекомых филлофагов на низком уровне численности и взаимоотношениям в структуре комплекса этих видов.

Настоящая статья посвящена результатам долгосрочных исследований популяций лесных насекомых в Краснотуранском бору с 1978 по 2017 г.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Популяционная динамика комплекса насекомых-филлофагов в различных ландшафтных структурах на территории Краснотуранского ленточного бора (юг Средней Сибири, 54°16.315' с. ш., 91°37.757' в. д.) изучалась в течение почти 40 лет – с 1979 по 2016 г. (Тарасова, 1983; Пальникова, 1984, 2000; Пальникова и др., 2002; Isaev et al., 2017). Основная лесообразующая порода ленточного бора – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). На момент начала исследований возраст деревьев в насаждениях бора составлял 60–80 лет. Местообитания в пределах бора классифицировались по характеристикам ландшафта. На рис. 1 приведена пространственная структура местообитаний на территории Краснотуранского бора.

В табл. 1 указаны расстояния между пробными площадями в различных местообитаниях.

Краткая лесотаксационная характеристика насаждений (на момент начала исследований в 1978 г.) в различных урочищах Краснотуранского бора представлена в табл. 2.

Комплекс видов насекомых-филлофагов в Краснотуранском бору типичен для сосновых боров Сибири и включает в себя пяденицу сосновую и п. серую углокрылую (*Semiothisa liturata* Cl.) (Lepidoptera: Geometridae), соснового шелкопряда (*Dendrolimus pini* L.) (Lepidoptera: Lasiocampidae) и два вида пилильщиков – соснового зеленого (*Gilpinia virens* Kl.) и бледного соснового (*Microdiprion pallipes* Fall.) (Hymenoptera: Diprionidae).

В течение 1979–2016 гг. плотность популяций этих видов определяли в первой декаде августа методом околоты на матерчатый полог.

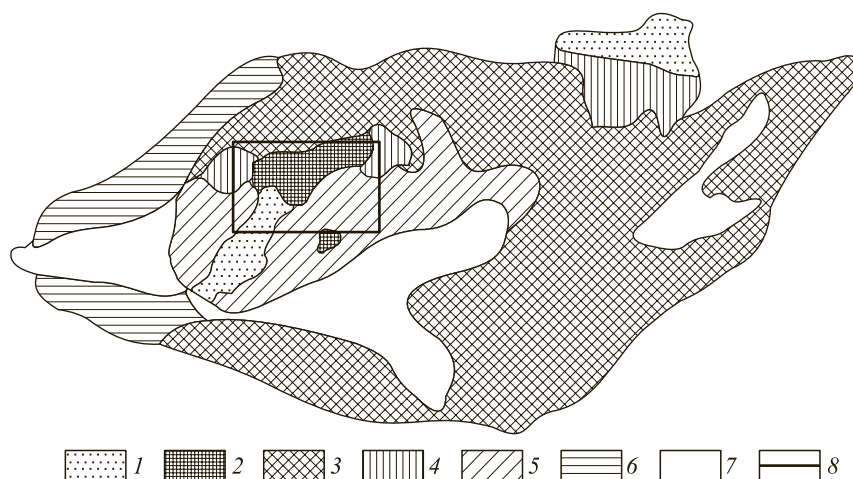


Рис. 1. Ландшафтная структура Краснотуранского бора (Пальникова и др., 2002).

Местообитание: 1 – Вершина сопки, 2 – Плакор, 3 – Пологие склоны, 4 – Дюна, 5 – Озеро, 6 – Терраса, 7 – Плоские пролювиальные днища; 8 – границы очага сосновой пяденицы в 1973–1977 гг.

Ежегодные учеты численности филлофагов проводили в пяти местообитаниях: Вершина сопки, Плакор, Дюна, Терраса, Озеро (Isaev et al., 2017).

По результатам околотов вычисляли абсолютную плотность $x_{ij}(t)$ (число гусениц вида i в расчете на одно околоченное дерево на пробной площади j в год t). Все данные, полученные в ходе исследований, были сведены в пять матриц $\|x_i(t)\|$ размером (40×5) по абсолютной плотности x для каждой пробной площади. Эти данные и послужили основой для последующего анализа.

К важными особенностями Краснотуранского бора как объекта исследований относятся его изолированность и отсутствие сильных техногенных и антропогенных воздействий. Ближайшая сходная по своим свойствам и видовому составу насекомых экосистема (Минусинские ленточные боры) находится на расстоянии около 60 км, что практически гарантирует замкнутость экологических процессов в Краснотуранском бору и отсутствие миграций между экосистемами Краснотуранского и Минусинского боров.

Таблица 1. Расстояния (км) между пробными площадями в различных урочищах Краснотуранского бора

Местообитание	Плакор	Вершина сопки	Дюна	Терраса	Озеро
Плакор	0.00	1.6	1.2	1.8	2.9
Вершина сопки	–	0.00	2.3	2.1	3.8
Дюна	–	–	0.00	1.0	3.9
Терраса	–	–	–	0.00	4.7

Таблица 2. Лесотаксационная характеристика насаждений различных урочищ Краснотуранского бора

Урочище	Площадь, га	Состав	Класс возраста	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Бонитет	Полнота	Тип леса
1	331	10С	IV	19.0	23	II	0.8	A
2	207	10С	IV	17.0	18	III	0.9	B
5	335	10С	IV	18.0	22	II	0.7	C, D
6	193	10С ед. Б	II, IV	8.0	9	III	0.8	E
7	110	10С	IV	20.0	21	II	0.8	E

Примечание. А – сосняк разнотравно-зеленомошный; В – сосняк бруснично-зеленомошный; С – сосняк лишайниково-бруснично-зеленомошный; D – сосняк разнотравно-лишайниково-мертвопокровный; E – сосняк разнотравно-бруснично-зеленомошный; порода: С – сосна обыкновенная, Б – береза (*Betula* L.).

Практическое отсутствие лесозаготовок и резкое снижение после 1985 г. урожая брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и грибов, отсутствие водоемов, пригодных для отдыха, привело к резкому снижению антропогенного воздействия на бор. Все это позволяет считать экосистему Краснотуранского бора стабильной и рассматривать результаты учетов для разных лет как реализацию некоторого общего экологического процесса.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Изучаемые объекты (популяции лесных насекомых в определенных местообитаниях) рассматриваются как стационарные во времени системы с набором положительных и отрицательных обратных связей, зависящих от различных факторов и формирующих динамику популяции. Концептуальная схема такого подхода представлена на рис. 2.

Петли обратных связей отражают влияние прошлых состояний объекта на текущее состояние. Для исследуемой системы предполагается, что обратные связи линейны и сигнал обратной связи можно выразить как $z(i) = a \cdot y(i - \tau)$ с задержкой во времени τ и амплитудой $a > 0$ для положительной обратной связи и $a < 0$ для отрицательной.

Число петель обратной связи разного типа (положительных или отрицательных) неизвестно, но в общем случае, принимая во внимание петли обратной связи, стационарную систему можно охарактеризовать как авторегрессионную (AR). В этом случае можно записать для текущего состояния системы следующее уравнение:

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j y(i - j) + \varepsilon. \quad (1)$$

Согласно (1), для описания регуляторных связей в системе необходимо знать общее число

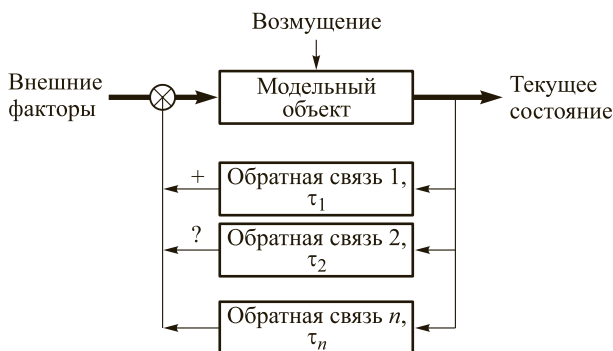


Рис. 2. Концептуальная схема модели популяции ($\tau_1, \dots, \tau_n$ — характерные времена обратных связей).

k значимых обратных связей, а также абсолютные значения и знаки коэффициентов $a_1, \dots, a_k$ обратных связей. Анализу значений систем обратных связей в регуляции популяционной динамики различных видов в разных местообитаниях на территории Краснотуранского бора и посвящена настоящая работа.

Регуляторные характеристики популяционной динамики могут оцениваться по параметрам авторегрессионных (AR) уравнений, рассчитанных по известным значениям плотностей популяции в течение времени учетов. Если характеристики плотности популяций известны и динамика численности популяции носит стационарный характер, то при известном значении числа k значимых обратных связей уравнение (1) можно рассматривать как линейное регрессионное уравнение относительно неизвестных параметров $a_1, \dots, a_k$. Тогда эти коэффициенты можно найти, используя стандартные методы линейного регрессионного анализа. Таким образом, AR-модель плотности популяции отдельного вида конструировалась по следующей схеме:

1 — изучаемый ряд оценивался на стационарность и в случае необходимости трансформировался в стационарный ряд;

2 — оценивался порядок AR-уравнения, характеризующий число значимых обратных связей;

3 — используя результаты пп 1 и 2, по данным многолетних учетов вычислялись абсолютные значения и знаки коэффициентов обратных связей;

4 — оценивалась достоверность проделанных вычислений.

Данный метод включал в себя:

— «ремонт» ряда динамики популяции и замену нулевых значений плотностей популяций значениями, в 2 раза меньшими минимальных за все время измерений значений плотности насекомых;

— переход к логарифмической шкале, необходимый для уменьшения разброса данных (именно для этого выполнялся замена нулевых значений плотности);

— фильтрацию высокочастотной составляющей ряда, необходимую для уменьшения ошибок учетов численности насекомых. Для фильтрации использовался фильтр Ганна (Хемминг, 1987):

$$y(i) = 0.24 \cdot \ln x(i - 1) + 0.52 \cdot \ln x(i) + 0.24 \cdot \ln x(i + 1); \quad (2)$$

— для определения порядка k авторегрессионного уравнения (1) — вычисление парциальной автокорреляционной функции ПАКФ

(Дженкинс, Ваттс, 1971). Значение порядка авторегрессии характеризуется максимальным значением ПАКФ, большим значений доверительного интервала ПАКФ;

– модель (2) рассматривалась как регрессионное уравнение с известными из данных учетов значениями $\{y(i)\}$, и стандартными методами находились неизвестные коэффициенты $a_0, \dots, a_k$;

– точность расчетов модельного уравнения динамики численности насекомых оценивалась по коэффициенту детерминации R^2 , характеризующему долю дисперсии значений логарифмов численности насекомых, рассчитываемую AR-моделью, значимостью коэффициентов AR-модели, оцениваемую по t -критерию и F -критерию Фишера (Поллард, 1982);

– синхронность временного ряда трансформированных данных и модельного ряда оценивалась по значению кросскорреляционной функции (ККФ) (Дженкинс, Ваттс, 1971). Для синхронных временных рядов максимальное значение ККФ ($k = 0$) близко к 1;

– цикличность колебаний временных рядов, трансформированных данных оценивалась по спектру временного ряда (Бокс, Дженкинс, 1974; Кендалл, Стьюарт, 1976; Марпл мл., 1990);

Для ADL-моделей популяционной динамики лесных насекомых важной характеристикой, позволяющей оценить изменение состояние популяции при различного рода трансформациях внешней среды и собственно характеристик популяции, является запас модели по устойчивости. В связи с этим в условиях неопределенности состояния природной среды и самой моделируемой популяции лесных насекомых необходимо оценить запас по устойчивости модели, характеризующий близость этой точки к границам зоны устойчивости. Для его оценки используются критерий Михайлова и годограф Михайлова (Ким, 2007):

$$D(jv) = \bar{D}(z) \Big|_{z=\exp(jv)}; \quad v \in [-\pi, \pi], \quad (3)$$

где $\bar{D}(z)$ – нормированный по старшей степени z характеристический многочлен исследуемой системы.

Система с некоторым характеристическим полиномом устойчива, если годограф Михайлова (3) при изменении переменной v от $-\pi$ до π , начинаясь на вещественной оси, обходит последовательно вокруг точки $z = 0$ против часовой стрелки $4n$ квадрантов (Гайдук и др., 2023). Несмотря на внешне сложную процедуру расчета, расчет запаса по устойчивости выполня-

Таблица 3. Программа в пакете MATLAB для расчета запаса по устойчивости авторегрессионной модели (Гайдук и др., 2023)

```
Dz = [1 a [1] a [2];
Dz = Dz/Dz (1);
nu = (-pi: pi / (100 * length (Dz)): pi);
j = sqrt (-1);
z = exp (j*nu);
GM = polyval (Dz, z);
eta = min (abs (GM));
disp ([ 'запас устойчивости η = ' num2str (eta)])
```

ется с помощью простой программы в пакете MATLAB (табл. 3).

Для расчета программы по оценке запаса по устойчивости необходимо в пакете MATLAB загрузить программу из табл. 3 и выполнить лишь одну операцию: ввести в строку 1 значения коэффициентов авторегрессионной модели.

Расчет запаса по устойчивости позволяет оценить свойства системы: чем меньше значение h , тем больше вероятность «срыва» и потери устойчивости системы при внешних воздействиях.

Таким образом, стабильность временного ряда динамики численности для данного местообитания оценивали по запасу устойчивости, вычисляемому по значениям коэффициентов $a_1, \dots, a_k$ модели (2) для этого местообитания. Чем больше значение запаса по устойчивости, тем выше устойчивость ряда динамики.

Расчеты выполняли для всех временных рядов численностей всех популяций насекомых во всех местообитаниях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 4 приведены средние многолетние плотности (особей на дерево) популяций всех изученных видов, стандартные отклонения от средних значений, максимальные значения плотностей в различных местообитаниях. Как видно из табл. 4, суммарная плотность популяций изученных видов филофагов во всех местообитаниях в течение всего времени исследований была низкой и не превышала 13.51 особей на дерево.

Тем не менее такая низкая плотность филофагов наблюдалась не всегда, и еще до начала учетов в 1976–1978 гг. на территории Краснотуранского бора происходила вспышка массового размножения сосновой пяденицы, в ходе кото-

Таблица 4. Средние многолетние плотности (особей на дерево) популяций всех изученных видов, стандартные отклонения от средних значений, максимальные значения плотностей в различных местообитаниях

Местообитание	Параметры, насекомых в расчете на одно дерево	Сосновая пяденица	Серая углокрылая пяденица	Сосновый зеленый пилильщик	Бледноногий сосновый пилильщик	Сосновый шелкопряд
Вершина сопки	Средняя плотность	0.72	0.09	0.14	0.10	0.16
	Стандартное отклонение	1.96	0.14	0.22	0.15	0.28
	Максимальная плотность	10.88	0.55	1.00	0.60	1.30
Плакор	Средняя плотность	0.68	0.05	0.13	0.06	0.15
	Стандартное отклонение	1.28	0.07	0.23	0.11	0.27
	Максимальная плотность	5.60	0.24	1.10	0.45	1.20
Озеро	Средняя плотность	0.18	0.19	0.30	0.15	0.09
	Стандартное отклонение	0.31	0.38	0.59	0.41	0.13
	Максимальная плотность	1.56	2.05	2.68	2.25	0.65
Терраса	Средняя плотность	0.11	0.17	0.14	0.04	0.38
	Стандартное отклонение	0.18	0.30	0.31	0.06	0.77
	Максимальная плотность	0.76	1.56	1.36	0.24	3.08
Дюна	Средняя плотность	1.46	0.16	0.20	0.05	0.33
	Стандартное отклонение	3.39	0.25	0.25	0.08	0.64
	Максимальная плотность	13.51	1.32	0.92	0.40	2.96

рой были повреждены значительные массивы сосны обыкновенной (Пальникова и др., 2002).

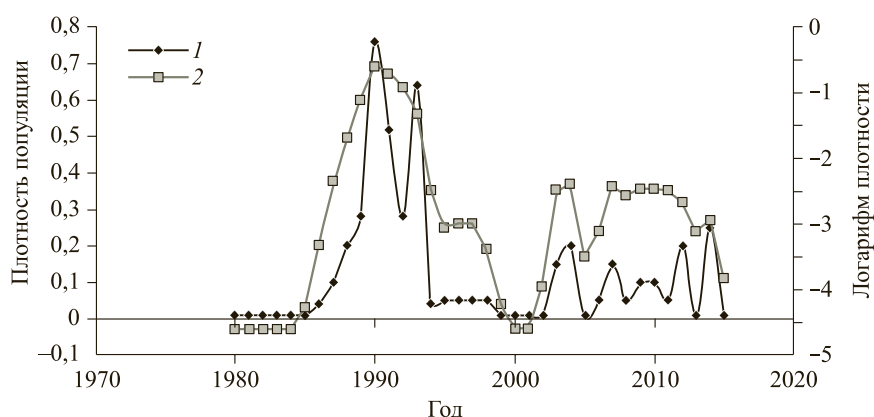
Анализ временных рядов динамики численности изученных лесных насекомых показал, что все изученные ряды можно рассматривать как стационарные. На рис. 3 (кривая 1) приведена типичная кривая временной численности популяции сосновой пяденицы в местообитании Терраса.

После «ремонта», перехода к логарифмической шкале и фильтрации кривая 1 на рис. 3 трансформируется в кривую 2. Все изученные ряды можно характеризовать как стационарные во времени. Стационарность временных рядов динамики численности позволяет рассмотреть AR-модели динамики оценить их характери-

сти. Для оценки порядка авторегрессии вычисляли парциальные автокорреляционные функции трансформированных рядов.

На рис. 4 приведена парциальная автокорреляционная функция (ПАКФ) кривой 2 на рис. 3. Как видно из рис. 4, порядок авторегрессии равен 2, т. е. регуляция временного ряда характеризуется существованием двух обратных связей с характерными временами 1 и 2 года. Для заданного значения $k = 2$ по значениям трансформированного ряда численности вычислялись коэффициенты регрессионного уравнения.

В табл. 5 приведены значения коэффициентов и достоверность этих значений для сосновой пяденицы в местообитании Терраса. AR-модель характеризуется положительной обратной свя-

**Рис. 3.** Ряды натурных (1) и трансформированных (2) данных численности сосновой пяденицы в местообитании Терраса.

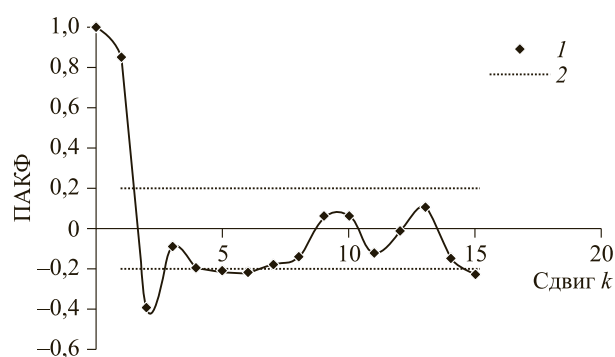


Рис. 4. Парциальная автокорреляционная функция (ПАКФ) трансформированного ряда динамики численности сосновой пяденицы в местообитании Терраса.

Таблица 5. Коэффициенты AR-уравнения (2) и достоверность значений этих коэффициентов для сосновой пяденицы в местообитании Терраса

Переменные	Коэффициент	Стандартное отклонение	t-критерий	p
a_0	-0.565	0.235	-2.406	0.022
$y(i-2)$	-0.530	0.155	-3.427	0.002
$y(i-1)$	1.339	0.159	8.410	0.000
$adjR^2$	0.820			0.000
F-критерий	74.400			
η	0.08			

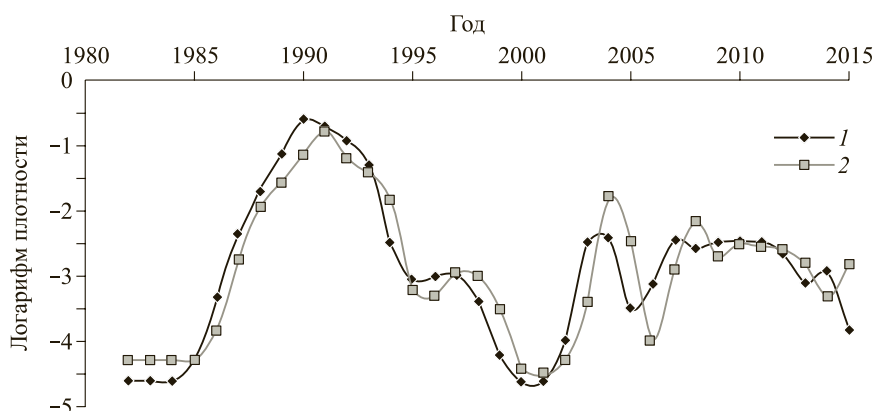


Рис. 5. Трансформированный (1) и модельный (2) ряды динамики численности сосновой пяденицы в местообитании Терраса.

зью между значениями $y(i)$ и $y(i-1)$ (коэффициент $a(i-1) > 0$) и отрицательной обратной связью между значениями $y(i)$ и $y(i-2)$ (коэффициент $a(i-2) < 0$).

Как видно из табл. 5, все коэффициенты AR-модели значимы. Коэффициент детерминации R^2 характеризует вклад систем обратной связи в дисперсию значений трансформированной плотности популяции. Значение $(1 - R^2)$ характеризует вклад других факторов (например, погодных) в динамику численности популяции. На рис. 5 показаны соответствия между трансформированным и модельным рядами динамики численности сосновой пяденицы в местообитании Терраса.

Для оценки синхронности трансформированного и модельного рядов динамики численности сосновой пяденицы вычисляли кросскорреляционную функцию (ККФ) между этими рядами (рис. 6).

Как видно из рис. 6, максимум CCF достигается при сдвиге $k = 0$, что указывает на синхронность этих рядов. Подобная процедура выполнялось для всех 25 изученных временных рядов

(по пять временных рядов в каждом из пяти местообитаний). Анализ показал, что для трех видов (пядениц сосновой и серой углокрылой, соснового шелкопряда) динамика численности характеризуется наличием одной статистически значимой положительной и одной статистически значимой отрицательной обратными связями. При этом характер регуляторных связей не изменяется на расстоянии около 4 км между пробными площадями (см. табл. 1). Положительную

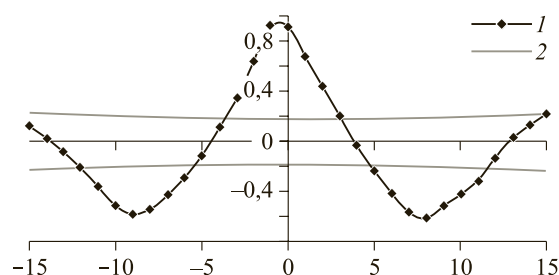


Рис. 6. Кросскорреляционная функция (ККФ) рядов трансформированных натуральных данных и рядов модельных данных сосновой пяденицы в местообитании Терраса.

1 – ККФ; 2 – стандартные ошибки ККФ.

Таблица 6. Средние $\langle \eta_s \rangle$ по всем местообитаниям значения запасов по устойчивости для отдельных видов и средние значения $\langle \eta_m \rangle$ по всем видам в отдельных местообитаниях

Вид	Среднее значение $\langle \eta_s \rangle$ запаса по устойчивости для вида	Местообитание	Среднее значение $\langle \eta_m \rangle$ запаса по устойчивости в местообитании
Сосновая пяденица	0.13	Вершина сопки	0.38
Серая углокрылая пяденица	0.12	Плакор	0.21
Сосновый зеленый пилильщик	0.40	Озеро	0.20
Бледноногий сосновый пилильщик	0.46	Терраса	0.28
Сосновый шелкопряд	0.12	Дюна	0.16

обратную связь можно описать как влияние родительского поколения на текущую плотность, отрицательная обратная связь с запаздыванием в 2 года может отражать влияние паразитов на популяцию. Для соснового зеленого пилильщика в четырех из пяти местообитаний авто-регрессия характеризуется наличием одной положительной (с запаздыванием в 1 год) и одной отрицательной (с запаздыванием в 2 года) обратной связи, точно так же, как и для пядениц сосновой и серой углокрылой, соснового шелкопряда. Однако для одного местообитания (Вершина сопки) AR-модель характеризуется наличием четырех обратных связей с запаздыванием от 1 до 4 лет. Наиболее неоднородная ситуация характерна для бледноногого соснового пилильщика, для которого в местообитании Дюна AR-модель характеризуется наличием двух обратных связей (положительной и отрицательной), в двух местообитаниях (Плакор и Терраса) в AR-модели включены две положительные и одна отрицательная обратная связь, наконец для местообитаний Вершина сопки и Озеро в AR-модели – две отрицательных и две положительных обратные связи.

В моделях сосновой пяденицы вклад авто-регрессионных компонентов в дисперсию данных о плотности популяции колеблется от 82 до 94 %, в моделях пяденицы серой углокрылой вклад изменяется от 80 до 90 %. Практически одинаковый вклад AR-модели в динамику численности (от 85 до 90 %) наблюдается для популяций соснового шелкопряда в разных местообитаниях. Для бледноногого соснового пилильщика вклад AR-компонентов в динамику численности колеблется от 75 до 82 %. Наименьшим (от 61.5 до 71.5 %) является вклад авторегрессионных компонентов в модели соснового зеленого пилильщика.

С точки зрения теории автоматического управления, поддержание стабильного состояния любой системы (в том числе и системы насеко-

мых в лесу) связано с влиянием обратных связей (Дорф, Бишоп, 2004). При наличии сильных и быстрых отрицательных обратных связей система быстро возвращается в норму после воздействия. Напротив, сильные и быстрые положительные обратные связи ведут к сильным отклонениям от нормы. При наличии как отрицательных, так и положительных обратных связей, как это характерно для насекомых в Красно-туранском бору, ситуация становится неясной и для оценки устойчивости системы необходимы комплексные показатели, учитывающие влияние как отрицательных, так и положительных обратных связей. В теории автоматического управления таким комплексным показателем является запас по устойчивости η (Гайдук и др., 2023). Запас по устойчивости вычисляется по значениям коэффициентов AR-модели, характеризующих как положительные, так и отрицательные обратные связи.

В табл. 6 приведены средние по всем местообитаниям значения запасов по устойчивости η для отдельных видов и средние значения по всем видам в отдельных местообитаниях

Как следует из табл. 6, наиболее устойчивыми оказываются пилильщики: сосновый зеленый и бледноногий сосновый. Для трех видов чешуекрылых – пядениц сосновой и серой углокрылой, соснового шелкопряда – запас по устойчивости в 2–3 раза меньше, что указывает на большие риски колебаний плотностей этих видов и возможности возникновения вспышек их массового размножения. При анализе среднего запаса по устойчивости для видов в отдельных местообитаниях наименее устойчивым оказывается местообитание Дюна, а наиболее устойчивым – местообитание Вершина сопки.

Чем больше запас по устойчивости системы, тем меньше вероятность «выбросов» ее характеристик – подъемов и спадов численности в ходе массового размножения насекомых (рис. 7).

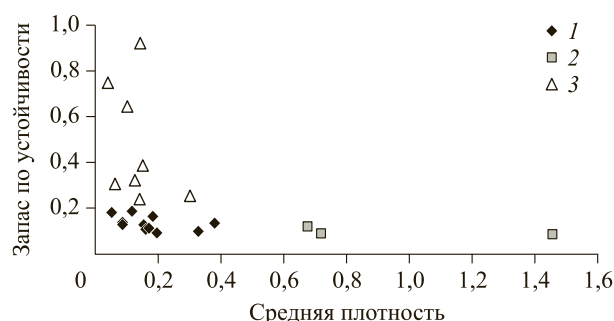


Рис. 7. Связи между средним многолетним значением плотности популяции и запасом h по устойчивости.

1 – пяденицы сосновая и серая углокрылая, сосновый шелкопряд в местообитаниях Озеро и Терраса; 2 – сосновая пяденица в местообитаниях Вершина сопки, Плакор и Дюна; 3 – пилильщики сосновый зеленый и бледноногий сосновый).

Как видно из рис. 7, для сосновой пяденицы – вида, дающего вспышки массового размножения в местообитаниях Вершина сопки, Плакор и Дюна на территории Краснотуранского бора, при средних многолетних значениях плотности популяций в стабильно-разреженных состояниях (не больше 0.6 гусеницы на дерево) запас по устойчивости популяций мал ($\eta < 0.12$), тогда как для видов пилильщиков соснового зеленого и бледноногососнового, характеризующихся лишь подъемами численности, при малых средних многолетних значениях плотности запас по устойчивости достаточно велик ($\eta > 0.2$). Для «промежуточных» видов (пяденицы серой углокрылой, соснового шелкопряда) и для сосновой пяденицы в местообитаниях Озеро и Терраса, где вспышки массового размножения не наблюдались, при низких плотностях популяций малы и значения запаса по устойчивости.

Таким образом, даже в период между вспышками с относительно малой плотностью популяции, по показателям запаса по устойчивости можно в плоскости $\{<N>, \eta\}$ выделить три кластера с разными характеристиками динамики численности и регуляторными свойствами популяций, определяющих запас по устойчивости, и выявить виды и местообитания, где возможны вспышки массового размножения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долгосрочные исследования динамики численности насекомых-филлофагов в Краснотуранском бору на постоянных пробных площадях в течение почти 40 лет позволили выявить изменения, происходившие во многих поколениях насекомых и особенности их многолетней пространственно-временной динамики, что было бы

невозможно при краткосрочных наблюдениях. При использовании многолетних данных были вычислены коэффициенты авторегрессионных моделей динамики численности всех изученных видов насекомых-филлофагов во всех местообитаниях и даны оценки достоверности коэффициентов этих уравнений. Показано, что для большинства популяций в разных местообитаниях регуляторные связи внутри популяции характеризуются наличием одной положительной связи с запаздыванием в 1 год и одной отрицательной обратной связи с запаздыванием в 2 года. Однако для таких видов, как сосновый зеленый пилильщик и бледноногий сосновый пилильщик, характерное время запаздывания обратных связей достигает 4 лет. При наличии обратных связей разных знаков (положительных и отрицательных) трудно оценить устойчивость динамики популяции. Для такой оценки рассмотрен такой показатель, как запас по устойчивости, позволяющий количественно оценить возможность выброса за зону устойчивости системы. Расчеты запаса по устойчивости для разных видов насекомых в различных местообитаниях показали, что устойчивость для таких видов, как сосновый зеленый пилильщик и бледноногий сосновый пилильщик, превосходит устойчивость прочих анализировавшихся видов. Минимальный запас по устойчивости характерен для популяций сосновой пяденицы в местообитаниях, где перед началом учетов наблюдалась вспышка массового размножения этого вида.

Работа выполнена в рамках базового проекта ИЛ СО РАН FWES-2024-0029 «Болезни и вредители основных лесобразующих пород и экономически значимых сельскохозяйственных растений России в условиях глобальных изменений окружающей среды» (2024–2026 гг.). Регистрационный номер НИОКТР 124012900560-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 755 с.
- Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
- Гайдук А. Р., Беляев В. Е., Пьявченко Т. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учеб. пособие. 7-е изд., стер. СПб.: Лань, 2023. 464 с.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. Вып. 1. 316 с.; Вып. 2. 287 с.
- Дорф Р. К., Бишоп Р. Х. Современные системы управления. М.: Лаб. базовых знаний, 2004. 832 с.

- Кендалл М. Д., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
- Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. М.: Физматлит, 2007. 312 с.
- Киреев Д. М. Методы изучения лесов по аэроснимкам. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 213 с.
- Марпл мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Пальникова Е. Н. Экология и лесохозяйственное значение сосновой пяденицы в лесостепных борах Средней Сибири: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.09. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1984. 207 с.
- Пальникова Е. Н. Сосновая пяденица в лесостепных борах Сибири (экология, динамика численности, влияние на насаждения): дис. ... д-ра с.-х. наук: 03.00.16. Красноярск: СибГТУ, 2000. 369 с.
- Пальникова Е. Н., Свидерская И. В., Суховольский В. Г. Сосновая пяденица в лесах Сибири. Новосибирск: Наука, 2002. 252 с.
- Поллард Д. Справочник по вычислительным методам статистики. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.
- Суховольский В. Г. Исследование взаимодействия дерева с насекомыми на основе анализа диэлектрических свойств тканей хвойных: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1984. 179 с.
- Суховольский В. Г. Моделирование роста деревьев и взаимодействия лесных насекомых с древесными растениями: оптимизационный подход: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.02. Красноярск: Ин-т биофиз. СО РАН, 1996. 31 с.
- Тарасова О. В. Ландшафтно-экологическая специфика вредной лесной энтомофауны Минусинских ленточных боров // Насекомые лесостепных боров Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. С. 18–34.
- Тарасова О. В. Ландшафтно-экологический анализ комплекса хвоегрызущих насекомых ленточных боров Средней Сибири: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1983. 156 с.
- Тарасова О. В. Насекомые-филлофаги зеленых насаждений городов: особенности структуры энтомокомплексов, динамики численности популяций и взаимодействия с кормовыми растениями: дис. ... д-ра с.-х. наук: 03.00.16. Красноярск: СибГТУ, 2004. 360 с.
- Тарасова О. В., Суховольский В. Г., Солдатов В. В. Памяти Елены Николаевны Пальниковой (1954–2018) // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах. XI чтения памяти О. А. Катаева: Материалы Всерос. конф. с междунар. участ., Санкт-Петербург, 24–27 ноября 2020 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 43–44.
- Тарасова О. В., Солдатов В. В., Ковалев А. В., Суховольский В. Г. Елена Николаевна Пальникова (12.03.1954 – 26.11.2018) // Сиб. лесн. журн. 2024. № 3. 4 с. (сетевое изд.).
- Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. М.: Недра, 1987. 221 с.
- Baars M. A., Van Dijk T. S. Population dynamics of two carabid beetles at a Dutch heathland 1. Subpopulation fluctuations in relation to weather and dispersal // J. Animal Ecol. 1984. V. 53. N. 2. P. 375–388.
- Baltensweiler W. *Zeiraphera griceana* Hubner (Lepidoptera, Tortricidae) in the European Alps. A contribution to the problem of cycles // Can. Entomol. 1964. V. 96. N. 5. P. 792–800.
- Bascompte J., Sole R. V. Spatiotemporal patterns in nature // Trends Ecol. Evol. 1998. V. 13. Iss. 5. P. 173–174.
- Bentz B. J., Regniere J., Fettig C. J., Hansen E. M., Hayes J. L., Hicke J. A., Kelsey R. G., Negro'n J. F., Seybold S. J. Climate change and bark beetles of the Western United States and Canada: direct and indirect effects // Bioscience. 2010. V. 60. Iss. P. 602–613.
- Bentz B., Vandygriff J., Jensen C., Coleman T., Maloney P., Smith S., Grady A., Schen-Langenheim G. Mountain pine beetle voltinism and life history characteristics across latitudinal and elevational gradients in the western United States // For. Sci. 2014. V. 60. Iss. 3. P. 434–449.
- Bjørnstad O. N., Bascompte J. Synchrony and second-order spatial correlation in host-parasitoid system // J. Animal Ecol. 2002. V. 70. Iss. 6. P. 924–933.
- Bjørnstad O. N., Ims R. A., Lambin X. Spatial population dynamics: analyzing patterns and processes of population synchrony // Trends Ecol. Evol. 1999. V. 14. Iss. 11. P. 427–432.
- Bone C., Wulder M. A., White J. C., Robertson C., Nelson T. A. A GIS-based risk rating of forest insect outbreaks using aerial overview surveys and the local Moran's I statistic // Appl. Geogr. 2013. V. 40. P. 161–170.
- Buonaccorsi J. P., Elkinton J. S., Evans S. R., Liebhold A. Measuring and testing for spatial synchrony // Ecology. 2001. V. 82. Iss. 6. P. 1668–1679.
- Chapman T. B., Veblen T. T., Schoennagel T. Spatiotemporal patterns of mountain pine beetle activity in the southern Rocky Mountains // Ecology. 2012. V. 93. Iss. 10. P. 2175–2185.
- Choi W. I., Ryoo M. I., Chung Y.-J., Park Y.-S. Geographical variation in the population dynamics of *Thecodiplosis japonensis*: causes and effects on spatial synchrony // Popul. Ecol. 2011. V. 53. N. 3. P. 429–439.
- Curran L. M., Webb C. O. Experimental test of the spatiotemporal scale of seeds predation in mast-fruited Dipterocarpaceae // Ecol. Monogr. 2000. V. 70. Iss. 1. P. 129–148.
- Elton C., Nicholson M. The ten-year cycle in numbers of the lynx in Canada // J. Animal Ecol. 1942. V. 11. N. 2. P. 215–244.
- Foster J. R., Townsend P. A., Mladenoff D. J. Spatial dynamics of a gypsy moth defoliation outbreak and dependence on habitat characteristics // Landscape Ecol. 2013. V. 28. N. 7. P. 1307–1320.
- Hanski I., Woiwood I. P. Spatial synchrony in the dynamics of moth and aphid populations // J. Animal Ecol. 1993. V. 62. N. 4. P. 656–668.
- Hart S. J., Veblen T. T., Eisenhart K. S., Jarvis D., Kulakowski D. Drought induces spruce beetle (*Dendroctonus rufipennis*) outbreaks across northwestern Colorado // Ecology. 2014. V. 95. Iss. 4. P. 930–939.
- Haydon D., Steen H. The effect of large- and small-scale random events on the synchrony of metapopulation dynamics: a theoretical analysis // Proc. Royal Soc. London. Ser. B. Biol. Sci. 1997. V. 264. N. 1386. P. 1375–1381.
- Haynes K. J., Liebhold A. M., Johnson D. M. Elevational gradient in the cyclicity of a forest-defoliating insect // Popul. Ecol. 2012. V. 54. N. 2. P. 239–250.

- Henttonen H., McGuire D., Hansson L. Comparisons of amplitude and frequencies (spectral analyses) of density variations in long-term data sets of *Clethrionomys* species // *Ann. Zool. Fenn.* 1985. V. 22. N. 3. P. 221–229.
- Herrero A., Zamora R., Castro J., Hodar J. A. Limits of pine forest distribution at the treeline: herbivory matters // *Plant Ecol.* 2012. V. 213. N. 3. P. 459–469.
- Isaev A. S., Soukhovolsky V. G., Tarasova O. V., Palnikova E. N., Kovalev A. V. Forest insect population dynamics, outbreaks and global warming effects. N. Y.: Wiley, 2017. 298 p.
- Kapeller S., Schroeder H., Schueler S. Modelling the spatial population dynamics of the green oak leaf roller (*Tortrix viridana*) using density dependent competitive interactions: Effects of herbivore mortality and varying host-plant quality // *Ecol. Model.* 2011. V. 222. N. 7. P. 1293–1302.
- Liebholt A., Kamata N. Are population cycles and spatial synchrony a universal characteristic of forest insect populations? // *Popul. Ecol.* 2000. V. 42. Iss. 3. P. 205–209.
- Liebholt A., Koenig W., Bjornstad O. N. Spatial synchrony in population dynamics // *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2004. V. 35. Iss. 1. P. 467–490.
- Maron J. L., Harrison S. Spatial patterns formation in an insect host-parasitoid system // *Science.* 1997. V. 278. Iss. 5343. P. 1619–1621.
- Miller W. E., Epstein M. E. Synchronous population fluctuations among moth species (Lepidoptera) // *Environ. Entomol.* 1986. V. 15. Iss. 3. P. 443–447.
- Moran P. A. P. The statistical analysis of the Canadian lynx cycle. II. Synchronization and meteorology // *Austral. J. Zool.* 1953. V. 1. Iss. 3. P. 291–298.
- Myers J. H. Synchrony in outbreaks of forest Lepidoptera: a possible example of the Moran effect // *Ecology.* 1998. V. 79. N. 3. P. 1111–1117.
- Peltonen V., Liebhold A., Bjornstad O. N., Williams D. W. Spatial synchrony in forest insect outbreaks: roles of regional stochasticity and dispersal // *Ecology.* 2002. V. 83. Iss. 11. P. 3120–3129.
- Peterson R. O., Page R. E. The rise and fall of Isle Royale wolves, 1975–1986 // *J. Mammalogy.* 1988. V. 69. N. 1. P. 89–99.
- Peterson R. O., Thomas N. J., Thurber J. M., Vucetich J. A., Waite T. A. Population limitation and the wolves of Isle Royale // *J. Mammalogy.* 1998. V. 79. N. 3. P. 487–481.
- Pollard E. Population ecology and change in range of the white admiral butterfly *Ladoga Camilla* L. in England // *Ecol. Entomol.* 1979. V. 4. Iss. 1. P. 61–74.
- Raffa K. F., Aukema B. H., Bentz B. J., Carroll A. L., Hicke J. A., Turner M. G., Romme W. H. Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions // *Bioscience.* 2008. V. 58. Iss. 6. P. 501–517.
- Ranta E., Kaitala V., Lundberg P. Population variability in space and time: the dynamics of synchronous populations // *Oikos.* 1998. V. 83. N. 2. P. 376–382.
- Schowalter T. D. Insect responses to major landscape-level disturbance // *Ann. Rev. Entomol.* 2012. V. 57. Iss. 1. P. 1–20.
- Schwerdtfeger F. Untersuchungen über den Bestand von Kiefernspanner (*Bupalus piniarius* L.), Forleule (*Panolis flammea* Schiff.) und Kiefernswärmer (*Hyloicus pinastri* L.) // *Zeitschrift für angew. Entomol.* 1952. Bd. 34. N. 2. S. 216–283.
- Schwerdtfeger F. Ökologie der Tiere. 2. Demökologie. Hamburg, Berlin: Verl. Paul Parey, 1968. 448 p.
- Seidl R., Müller J., Hothorn T., Bässler C., Heurich M., Kautz M. Small beetle, large-scale drivers: how regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle // *J. Appl. Ecol.* 2016. V. 53. Iss. 2. P. 530–540.
- Senf C., Campbell E. M., Pflugmacher D., Wulder M. A., Hostert P. A multi-scale analysis of western spruce budworm outbreak dynamics // *Landscape Ecol.* 2017. V. 32. Iss. 3. P. 501–514.
- Sherriff R. L., Berg E. E., Miller A. E. Climate variability and spruce beetle (*Dendroctonus rufipennis*) outbreaks in south-central and southwest Alaska // *Ecology.* 2011. V. 92. Iss. 7. P. 1459–1470.
- Sutcliffe O. L., Thomas C. D., Yates T. J., Greatorex-Devies J. N. Correlation extinctions, colonisations and population fluctuations in a highly connected ringlet butterfly metapopulation // *Oecologia.* 1997. V. 109. N. 2. P. 235–241.
- Van Rossum F., Triest L. Stepping-stone populations in linear landscape elements increase pollen dispersal between urban forest fragments // *Plant Ecol. Evol.* 2012. V. 145. N. 3. P. 332–340.
- Volney W. J. A., Fleming R. A. Climate change and impacts of boreal forest insects // *Agr. Ecosyst. Environ.* 2000. V. 82. Iss. 1–3. P. 283–294.
- Williams D. W., Liebhold A. Influence of weather on synchrony of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantridae) outbreaks in New England // *Environ. Entomol.* 1995. V. 24. P. 987–995.
- Wolves & moose of Isle Royale. 2024. <https://isleroyalewolf.org/>

LONG-TERM DYNAMICS OF FOREST INSECT POPULATIONS IN KRASNOTURANSKIY PINE FOREST

V. G. Soukhovolsky¹, O. V. Tarasova²

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 Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: soukhovolsky@yandex.ru, olvitarasova2010@yandex.ru

The experience of a long-term study of the population dynamics of phyllophagous insects in Krasnoturansky pine forest (the southern part of Krasnoyarsk Krai) is discussed in the paper. Over the course of 40 years (1978–2016), regular counts of the abundance of five species of phyllophages were carried out in five landscape structures. Based on the data obtained, models of population dynamics of these species were proposed. The models were based on the idea of the existence of positive and negative feedbacks in populations. This approach made it possible to ignore the impact of parasites on insects. For calculations, an autoregressive (AR) model was proposed, according to which the current density linearly depends on the densities of previous years. The model coefficients were calculated using data from long-term surveys. It has been shown that most populations are characterized by the influence of the density of the past season on the current density in the form of a positive feedback and the influence on the current density of the density of the previous season in the form of a negative feedback. The characteristics of the stability of population dynamics of individual species in various habitats are considered. Stability margin indicators, widely used in control theory, were used as stability characteristics. It has been shown that the margin of resistance for sawflies (Tenthredinidae Latreille) is slightly greater than for other groups of species, which is consistent with the smaller dispersion of the population sizes of these species during long-term censuses. The use of AR models and characteristics of the stock of stability made it possible to classify landscape structures on the territory of the Krasnoturansky forest according to the risks of outbreaks of mass reproduction in these landscapes.

Keywords: forest insects – phyllophages, population counts, long-term dynamics, models, autoregression, stability margin.

How to cite: Soukhovolsky V. G., Tarasova O. V. Long-term dynamics of forest insect populations in Krasnoturanskiy pine forest // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 110–122 (in Russian with English abstract and references).

РЕЦЕНЗИЯ

УДК 595.7(075.8)

ВОССОЗДАНИЕ НАУЧНОГО ПОДВИГА

В. И. Пономарев

*Ботанический сад УрО РАН
620000, Екатеринбург, ул. 8-е Марта, 202а*

E-mail: v_i_ponomarev@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.2024 г.

Представлен обзор содержания, процессов написания и воссоздания из рукописных материалов монографии В. П. Гречкина «Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам» под редакцией Ю. И. Гниненко (2019–2021).

Ключевые слова: В. П. Гречкин, лесная энтомология, защита леса в СССР, рецензия.

DOI: 10.15372/SJFS20240312

Три года назад завершено издание трёхтомника «Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам» (Гречкин, 2019, 2020а, б, 2021а, б). Это большой труд, подготовленный в свое время В. П. Гречиным, но не завершённый, который, благодаря скрупулёзной работе, выполненной сотрудниками ВНИИЛМа, стал теперь доступен исследователям.

Владимир Павлович Гречкин до 1952 г. был научным сотрудником ВНИИЛМа, а после – лесопатологом 5-й Московской аэрофотолесо-устроительной экспедиции ВО «Леспроект». В конце 1960-х годов он выполнил огромную работу, обобщив разбросанные в многочисленных литературных и ведомственных источниках сведения о насекомых и болезнях, наносящих повреждения лесам на территории Советского Союза в течение всего времени наблюдений (рис. 1).

Приведённый в трёхтомнике фактический материал позволит исследователям проще оценивать масштаб угроз, которые представляют многочисленные вредители и болезни лесных пород и, возможно, получать более объективные данные о динамике формирования очагов вредных насекомых и болезней лесных пород.



Рис. 1. Владимир Павлович Гречкин (1909–1971 гг.).



Рис. 2. Трехтомник В. П. Гречкина издан в пяти книгах.

Судя по содержанию, В. П. Гречкин не закончил свой труд, так как в нем отсутствуют сведения по некоторым регионам СССР. Несмотря на это, им собран огромный фактический материал, который теперь введен в научный оборот. Под руководством Ю. И. Гниненко, научного редактора издания, сотрудники ВНИИЛМа проделали большую работу по расшифровке рукописи, переводу ее в электронную форму. К сожалению, в издании полностью отсутствует библиография. Наличие списка литературных источников, которыми пользовался В. П. Гречкин, сделало бы это издание еще более ценным. Но в рукописи литературный список отсутствовал и его восстановление в настоящее время оказалось невозможным. Редактирование трехтомника также требовало приведения таксономических названий в соответствие с современными взглядами. В некоторых случаях это вызвало трудности, на что редактор указывает в тексте.

Не все тома издания одинаково тщательно выверены редакторами, особенно первый том (Гречкин, 2019), в тексте которого встречаются досадные опечатки и ошибки. В каждой из пяти книг издания имеется минимум иллюстраций и все они не принадлежат самому Владимиру Павловичу. Они просто несколько оживляют текст, не выполняя какой-либо иной задачи. С обложки двух книг последнего тома выпала фамилия автора.

Трехтомник имеет общее название «Лесопатологическая характеристика лесов СССР по

отдельным природно-географическим зонам» (рис. 2).

Именно так ее назвал сам автор. Рукопись каждого тома находилась в отдельной папке. Первая из них была названа «Лесопатологическая характеристика лесов лесной зоны» и ее материалы посвящены описанию развития вредителей и болезней лесной зоны. В начале каждого тома Владимир Павлович дал краткое, но вполне исчерпывающее описание природных условий лесных зон. Оно ценно тем, что сделано более полувека назад, условия за это время изменились и интересно сопоставить их с теми, которые можно видеть в настоящее время.

Второй и третий тома изданы каждый в двух книгах. Такое их разделение искусственно и не соответствует задумке автора. Вызвано это просто техническими возможностями издательства — объем рукописи столь большой, что было невозможно переплести на имеющейся там технике. Это не мешает пользоваться книгами, хотя несколько нарушает задумку автора.

Второй том (Гречкин, 2020а, б) посвящен лесопатологической характеристике лесов лесостепной, степной, полупустынной и пустынной зон. Первая его часть — «Лесопатологическая характеристика лесов лесостепной зоны», вторая — «Лесопатологическая характеристика лесов степной, полупустынной и пустынной зон». Этот том дает картину лесопатологического состояния лесов наиболее, пожалуй, нестабильных в смысле изменений лесопатологической

обстановки, зон. Хотя суммарная площадь этих зон меньше, чем площадь лесной зоны, именно здесь чаще всего формируются очаги массового размножения многих вредителей леса, а создание искусственных посадок привело к еще большему их разнообразию. Показано, что создание искусственных посадок той или иной древесной породы на больших площадях всегда приводит к появлению вредителей, которые здесь ранее отсутствовали. Очень наглядный пример этого – массовое появление очагов ильмового ногохвоста (*Dicranura ulmi* (Denis & Schiffermuller)) в степных посадках вяза мелколистного (*Ulmus parvifolia* Jacq.) в середине XX в., когда такие посадки были созданы в степной зоне, и последующее полное исчезновение каких бы то ни было упоминаний о нем после того, как старые посадки погибли, а новые перестали создавать. В этом томе таких примеров можно найти несколько.

Третий том (Гречкин, 2021а, б) называется «Лесопатологическая характеристика горных лесов СССР». Автор понимал, что горные леса по своей сути интразональны, поэтому логично было не включать их характеристики в лесные зоны, а выделить в отдельный том. Первая часть третьего тома посвящена характеристикам лесопатологической ситуации в горах Кавказа, Крыма, Средней Азии и Южной Сибири, а вторая часть – горным лесам Саян и Тувы, Прибайкалья, Забайкалья и Дальнего Востока.

Необходимо отметить, что впервые за много лет в российской лесной энтомологической литературе выполнена уникальная работа вовлечения в научный оборот практически утраченного труда коллеги, который завершил его более полувека назад. Это стало возможным благодаря тому, что уже в конце своей жизни Владимир Павлович передал рукопись своему коллеге – сотруднику ВНИИЛМа А. Д. Маслову (рис. 3).

Если бы она осталась у автора, то после его смерти труд был бы навсегда утрачен. К сожалению, мы не знаем случаев, когда наследники или коллеги выдающихся лесных энтомологов взяли на себя труд обобщить, систематизировать накопленный ими материал и сделать его достоянием науки. Огромный объем ценной информации до сих пор пылится на полках, запертый в виде отчетов в архивах большинства научных и производственных организаций.

Листая страницы трехтомника, хочется еще раз отметить большой труд сотрудников ВНИИЛМа, которые бережно вывели и оцифровали текст своего бывшего коллеги. Особой



Рис. 3. Алексей Дмитриевич Маслов (1933–2017), ведущий научный сотрудник ВНИИЛМа, сохранивший рукопись В. П. Гречкина (слева) и Юрий Иванович Гниненко, заведующий лабораторией ВНИИЛМа, научный редактор монографии (справа) на Чтениях памяти А. И. Ильинского (февраль 2015 г.).

благодарности читателей заслуживает подвижническая работа Юрия Ивановича Гниненко – инициатора воссоздания монографии и ее научного редактора (рис. 3).

Приветствуя появление монографии, хочется также несколько слов сказать о самом Владимире Павловиче Гречкине как пытливым и очень работоспособным исследователе. В каждом томе этого издания есть хотя бы несколько страниц, посвященных ему. Мы узнаём о нем как о человеке и лесозащитнике. Это также очень важная часть работы, выполненной коллективом отдела защиты леса ВНИИЛМа. Ведь никогда не стоит забывать, что за каждым изданием стоит труд человека, его мысли, стремления и сама его судьба.

В апреле 2024 г. исполнится 105 лет со дня рождения Владимира Павловича Гречкина. Самый подробный очерк о нем имеется в первой части второго тома. Надо отдать должное редакторам, собравшим и опубликовавшим те немногие сведения, которые удалось отыскать

о В. П. Гречкине. Интересна характеристика, которую дал Владимиру Павловичу А. И. Ильинский. В предисловии к этому тому приведен не только ее полный текст, но и копия, а также копия автобиографии, которую написал сам В. П. Гречкин.

Очень важно не забывать о поколениях предшественников, которые сделали так много для того, чтобы наши современники могли решать профессиональные проблемы на более широком фактологическом материале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гречкин В. П. Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам: В 3 т. Пушкино: ВНИИЛМ, 2019. Т. 1: Лесопатологическая характеристика лесов лесной зоны. 305 с. http://vniilm.ru/media/edition2019/Forest_pathology_characteristics_t1.pdf
- Гречкин В. П. Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам: В 3 т. Пушкино: ВНИИЛМ, 2020а. Т. 2: Лесопатологическая характеристика лесов лесостепной, степной, полупустынной и пустынной зон. Ч. 1: Лесопатологическая характеристика лесов лесостепной, степной, полупустынной и пустынной зон. Ч. 2: Лесопатологическая характеристика лесов степной, полупустынной и пустынной зон. 214 с. http://vniilm.ru/media/edition2020/Characteristics_forests_USSR_t2_p2.pdf
- Гречкин В. П. Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам: В 3 т. Пушкино: ВНИИЛМ, 2021а. Т. 3: Лесопатологическая характеристика горных лесов СССР. Ч. 1: Лесопатологическая характеристика горных лесов Кавказа, Крыма, Средней Азии и Южной Сибири. 234 с. http://vniilm.ru/media/edition2021/Characteristics_forests_USSR_t3_p1.pdf
- Гречкин В. П. Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам: В 3 т. Пушкино: ВНИИЛМ, 2021б. Т. 3: Лесопатологическая характеристика горных лесов СССР. Ч. 2: Лесопатологическая характеристика горных лесов Южной Сибири (Саяны и Тува), Прибайкалья, Забайкалья и Дальнего Востока. 156 с. http://vniilm.ru/media/edition2021/Characteristics_forests_USSR_t3_p2.pdf

RE-CREATION OF A SCIENTIFIC FEAT

V. I. Ponomarev

*Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8-e Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620000 Russian Federation*

E-mail: v_i_ponomarev@mail.ru

A review of the contents, processes of writing and reconstitution from manuscript materials of V. P. Grechkin's monograph «Lesopathological characterization of the forests of the USSR by separate natural and geographical zones» is presented. Edited by Yu. I. Gninenko. In 3 volumes. VNIILM, 2019–2021.

Keywords: *V. P. Grechkin, forest entomology, forest protection in the USSR, review.*

How to cite: Ponomarev V. I. Re-creation of a scientific feat // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 123–126 (in Russian with English abstract and references).

CONTENTS

FOREWORD FROM THE SCIENTIFIC EDITOR

Yu. N. Baranchikov

Foreword From the Scientific Editor for Thematic Issue of the «Siberian Journal of Forest Science»	3
--	---

LETTERS TO THE EDITOR

Yu. N. Baranchikov

Authors at Both Sides of the List	7
---	---

SUMMARIZING ARTICLES

A. G. Dyukarev, S. G. Kopysov, S. A. Krivets, E. N. Pats, N. A. Chernova

An Experience and First Results of Complex Biogeocenological Studies in Dark Coniferous Forests in the South of the Taiga Zone of Western Siberia	11
---	----

I. A. Utkina, V. V. Rubtsov

Tellerman Experimental Forestry of the Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences: 80 Year Polygon of Stationary Biocenotic Studies	25
---	----

A. V. Panov, A. V. Makhnykina, A. V. Urban, V. I. Zyryanov, D. A. Polosukhina, E. A. Kukavskaya, V. E. Aryasov, R. A. Kolosov, I. R. Putilin, P. D. Tretyakov, D. A. Trusov, R. T. Sadykov, A. S. Prokushkin

Carbon Flows in the Ecosystems of the Middle Taiga of Central Siberia	37
---	----

EXPERIMENTAL ARTICLES

S. N. Goroshkevich, E. A. Zhuk, O. G. Bender

The Study of the Geographical Differentiation of Siberian Stone Pine	54
--	----

A. S. Prokushkin, T. N. Geis, R. A. Kolosov, M. A. Korets, A. V. Panov, D. A. Polosukhina, M. P. Prokushkina, S. V. Titov, I. V. Tokareva, N. V. Sidenko, Yu. V. Shamonina, S. G. Prokushkin

Lateral Carbon Flux in the Cryolithozone of Central Siberia	67
---	----

I. N. Bezkorovaynaya, O. M. Shabalina, L. S. Shugaley

The Main Components of Artificial Forest Biogeocenoses of a Multi-Year Experiment	83
---	----

M. I. Sedaeva

Lime Tree in the Arboretum of V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Experimental Station «Pogorelskiy Bor»	96
---	----

V. V. Ivanov, A. N. Borisov

Carbon Deposition by Pine Stands of the Krasnoyarsk Forest Steppe During Care Logging	103
---	-----

V. G. Soukhovolsky, O. V. Tarasova

Long-Term Dynamics of Forest Insect Populations in Krasnoturanskiy Pine Forest	110
--	-----

REVIEW

V. I. Ponomarev

Re-Creation of a Scientific Feat	123
--	-----

* IN MEMORIAM

* *O. V. Tarasova, V. V. Soldatov, A. V. Kovalev, V. G. Sukhovolsky*
Elena Nikolaevna Palnikova (12.03.1954 – 26.11.2018)

* Mikhail Vladimirovich Rogozin (22.10.1950 – 29.05.2024)

* Article is published in online edition.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Ю. Н. Баранчиков

Предисловие научного редактора тематического номера «Сибирского лесного журнала»	3
--	---

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Ю. Н. Баранчиков

Крайние авторы	7
----------------------	---

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

А. Г. Дюкарев, С. Г. Копысов, С. А. Кривец, Е. Н. Пац, Н. А. Чернова

Опыт и первые результаты комплексных биогеоценологических исследований в темновойных лесах на юге таежной зоны Западной Сибири	11
--	----

И. А. Уткина, В. В. Рубцов

Теллермановское опытное лесничество Института лесоведения РАН: 80-летний полигон стационарных биоценологических исследований	25
--	----

А. В. Панов, А. В. Махныкина, А. В. Урбан, В. И. Зырянов, Д. А. Полосухина, Е. А. Кукавская, В. Е. Арясов, Р. А. Колосов, И. Р. Путилин, П. Д. Третьяков, Д. А. Трусов, Р. Т. Садыков, А. С. Прокушкин

Потоки углерода в экосистемах средней тайги Центральной Сибири	37
--	----

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

С. Н. Горошкевич, Е. Н. Жук, О. Г. Бендер

Исследование эколого-географической дифференциации кедра сибирского	54
---	----

А. С. Прокушкин, Т. Н. Гейс, Р. А. Колосов, М. А. Корец, А. В. Панов, Д. А. Полосухина, М. П. Прокушкина, С. В. Титов, И. В. Токарева, Н. В. Сиденко, Ю. В. Шамонина, С. Г. Прокушкин

Латеральный сток углерода в криолитозоне Центральной Сибири	67
---	----

И. Н. Безкоровая, О. М. Шабалина, Л. С. Шугалей

Основные компоненты искусственных лесных биогеоценозов в условиях многолетнего эксперимента	83
---	----

М. И. Седаева

Липа в дендрарии экспериментального хозяйства Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор»	96
---	----

В. В. Иванов, А. Н. Борисов

Депонирование углерода сосновыми древостоями Красноярской лесостепи при рубках ухода за лесом	103
---	-----

В. Г. Суховольский, О. В. Тарасова

Долгосрочная динамика популяций лесных насекомых в Краснотуранском сосновом бору	110
--	-----

РЕЦЕНЗИЯ

В. И. Пономарев

Воссоздание научного подвига	123
------------------------------------	-----

* ПАМЯТИ УЧЕНЫХ

* О. В. Тарасова, В. В. Солдатов, А. В. Ковалев, В. Г. Суховольский
Елена Николаевна Пальникова (12.03.1954 – 26.11.2018)

* Михаил Владимирович Рогозин (22.10.1950 – 29.05.2024)

* Статья публикуется в сетевом издании.