



<http://www.volgatech.net/>

ВЕСТНИК

1(65)
2025

январь – март

ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СЕРИЯ «Лес. Экология. Природопользование»

Научный журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит четыре раза в год

Журнал публикует оригинальные результаты исследований по лесному хозяйству, физико-химической биологии, а также по технологиям, материалам и оборудованию лесозаготовок, лесного хозяйства, деревообработки и химической переработки биомассы дерева.

Журнал включён в систему РИНЦ, ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY и ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 67093 от 15 сентября 2016 г.)

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается только с письменного разрешения редакции.

Адрес издателя и редакции:

424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Тел. (8362) 68-78-46, 68-28-41

Факс (8362) 41-08-72

E-mail: vestnik@volgatech.net

Редактор, корректор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

Т. В. Отмахова

Перевод на английский язык

Ж. О. Кузьминых

Подписано в печать 31.03.25.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 11,16.

Тираж 500 экз. Заказ № 1876

Дата выхода в свет: 09.06.25.

Цена свободная

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

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Вертола»

424004, Йошкар-Ола,
ул. Льва Толстого, 45

Главный редактор

Е. М. Романов, д-р с.-х. наук, профессор

Редакционный совет

Э. А. Курбанов, д-р с.-х. наук, профессор (*председатель*)

Ioannis Z. Gitas, профессор Университета Аристотеля (Салоники, Греция)

Cecil C. Konijnendijk, профессор Университета Британской Колумбии (Ванкувер, Канада)

Davide Pettenella, профессор (Университет Падуи, Италия)

В. В. Усенья, д-р с.-х. наук, профессор, акад. НАН Беларуси (Минск)

Редакционная коллегия

С. А. Денисов, д-р с.-х. наук, профессор (*зам. гл. редактора*)

Адем Ишету Шифа, PhD в области ГИС и картографии, Университет Волло, Эфиопия

В. П. Бессчётнов, д-р биол. наук, профессор (Нижегород)

О. Н. Бурмистрова, д-р техн. наук, профессор (Ухта)

Л. В. Ветчинникова, д-р биол. наук, доцент (Петрозаводск)

О. Н. Воробьёв, канд. с.-х. наук, доцент

Е. А. Гончаров, канд. с.-х. наук, доцент

Ю. П. Демаков, д-р биол. наук, профессор

(*отв. секретарь*)

Н. Н. Дубенок, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН (Москва)

Т. Л. Егошина, д-р биол. наук, профессор (Киров)

А. В. Жигунов, д-р с.-х. наук, профессор (Санкт-Петербург)

А. В. Каверин, д-р с.-х. наук, профессор (Саранск)

М. А. Карасёва, д-р с.-х. наук, профессор

С. А. Куролап, д-р геогр. наук, профессор (Воронеж)

Ман Ханг Бу, PhD в области лесных наук, доцент, Вьетнамский национальный лесной университет (Вьетнам)

Д. И. Мухортов, д-р с.-х. наук, доцент (*зам. гл. редактора*)

А. М. Носов, д-р биол. наук, профессор (Москва)

А. Н. Переволоцкий, д-р биол. наук (Москва)

А. С. Рулёв, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН (Волгоград)

В. В. Тараканов, д-р с.-х. наук, профессор (Новосибирск)

С. А. Угрюмов, д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург)

Е. М. Царёв, д-р техн. наук, профессор

В. Л. Черных, д-р с.-х. наук, профессор

С. И. Чумаченко, д-р биол. наук, профессор (Москва)

Г. О. Османова, д-р с.-х. наук, доцент

К. П. Рукомойников, д-р техн. наук, доцент

В. И. Стурман, д-р геогр. наук, профессор (Санкт-Петербург)

Е. С. Шараров, д-р техн. наук, доцент

О. В. Шейкина, канд. с.-х. наук, доцент

Ю. А. Ширнин, д-р техн. наук, профессор

VESTNIK

1(65)
2025

January – March

OF VOLGA STATE UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Series «Forest. Ecology. Nature Management»

Academic Periodical

Has been published since 11, 2007

Is issued 4 times a year

The original results of researches for forest management, physico-chemical biology as well as for material and equipment of forest harvesting operations, forestry, woodworking and chemical treatment of tree biomass are published in the journal.

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database, ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY and in the list of peer-reviewed scientific editions for publishing the essential scientific results of the theses for the degrees of Candidate and Doctor of Sciences

Founder and Publisher:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology»

The journal is included in the register of Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technology and Mass Communications (Certificate of registration ПИ № ФС 77 – 67093 dated 15 September, 2016)

Any use of articles without the written consent of the editorial board is strictly prohibited.

Address:

424000, Yoshkar-Ola, 3, Lenin Square

Tel. (8362) 68-78-46, 68-28-41

Fax (8362) 41-08-72

E-mail: vestnik@volgatech.net

Editor, proofreader *T. A. Rybalka*

Cover design *L. G. Malankina*

Computer assisted make up

T. V. Otmahova

Translation

Z. O. Kuzminykh

Passed for printing 31.03.25.

format 60×84 1/8. No. of press sheets 11,16

Printing run 500 copies. Order No 1876.

Release date: 09.06.25.

Open price

Volga State University of Technology
424000, Yoshkar-Ola, 3, Lenin Square

Printed from the original layout
at LLC «Vertola»

424004, Yoshkar-Ola,
45, Leo Tolstoy St.

Editor-in-Chief

Evgeny M. Romanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Editorial Board:

Eldar A. Kurbanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (*Chairman*)

Ioannis Z. Gitas, Professor, Aristotle University of Thessaloniki (Thessaloniki, Greece)

Cecil C. Konijnendijk, Professor (The University of British Columbia, Vancouver, Canada)

Davide Pettenella, Doctor in Science in forest policy and economics (University of Padova, Italy)

Vladimir V. Usenya, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk)

Editorial team:

Sergey A. Denisov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (*Vice Editor-in-Chief*)
Adem Eshetu Shifaw, PhD in GIS and Cartography, Wollo University, Ethiopia Desie, Amhara

Dmitry I. Mukhortov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor (*Vice Editor-in-Chief*)

Vladimir P. Besschetnov, Doctor of Biological Sciences, Professor (Nizhny Novgorod)

Olga N. Burmistrova, Doctor of Technical Sciences, Professor (Ukhta)

Lidia V. Vetchinnikova, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor (Petrozavodsk)

Oleg N. Vorobyov, PhD in Agriculture, Associate Professor

Evgeny A. Goncharov, PhD in Agriculture, Associate Professor

Yuriy P. Demakov, Doctor of Biological Sciences, Professor (*Executive Secretary*)

Nikolay N. Dubenok, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

Tatiana L. Egoshina, Doctor of Biological Sciences, Professor (Kirov)

Anatoliy V. Zhigunov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (St. Petersburg)

Aleksandr V. Kaverin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (Saransk)

Margarita A. Karaseva, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Semen A. Kurolap, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Voronezh)

Manh Hung Bui, PhD in Forest Sciences. Associate Professor, Vietnam National University of Forestry (Vietnam)

Aleksandr M. Nosov, Doctor of Biological Sciences, Professor (Moscow)

Aleksandr N. Perevolotsky, Doctor of Biological Sciences (Moscow)

Aleksandr S. Rulev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Member of the Russian Academy of Sciences (Volgograd)

Vyacheslav V. Tarakanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (Novosibirsk)

Sergey A. Ugryumov, Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg)

Evgeny M. Tsarev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Valeriy L. Chernykh, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Sergey I. Chumachenko, Doctor of Biological Sciences, Professor (Moscow)

Konstantin P. Rukomoynicov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Vladimir I. Sturman, Doctor of Geographical Sciences, Professor (St. Petersburg)

Evgeny S. Sharapov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Olga V. Sheykina, PhD in Agriculture, Associate Professor

Yuriy A. Shirnin, Doctor of Technical Sciences, Professor

© Volga State University of Technology, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Колонка главного редактора

5 *Editor's note*

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

FORESTRY

Усолец В. А., Плюха Н. И. Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии

6 **Usoltsev V. A., Plyukha N. I.** Dry Matter Content in Fractions of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia

Севергина Д. А., Арзубов П. А., Паюсова И. В., Осипов А. Ф., Дымов А. А. Оценка качественного и количественного состава древесного опада и его роли в поступлении углерода на вырубке

19 **Severgina D. A., Arzubov P. A., Payusova I. V., Osipov A. F., Dymov A. A.** Assessing the Qualitative and Quantitative Composition of Tree Litter and its Role in Carbon Input in a Clearcut Area

Боровлёв А. Ю., Елсаков В. В. Пространственный анализ ограничений сплошных рубок леса на водосборных бассейнах с использованием материалов дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий

33 **Borovlev A. Yu., Elsakov V. V.** Spatial Analysis of Limitations of Clearcutting in Catchment Areas Using Remote Sensing Data and GIS Technologies

Попов А. Г. Влияние поздних весенних заморозков на репродукцию четырёх видов пятихвойных сосен при их выращивании в условиях юга лесной зоны Западной Сибири

46 **Popov A. G.** The Influence of Late Spring Frosts on the Reproduction of Four 5-Needle Pine Species during their Cultivation in the South of the Forest Zone of Western Siberia

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Лагерева А. В., Макулина А. В. Моделирование динамической нагруженности анкерного каната при работе харвестера на крутом склоне

61 **Lagereva A. V., Makulina A. V.** Simulation of Dynamic Loading of an Anchor Rope during Harvester Operation on a Steep Slope

Кручинин И. Н., Бурмистрова О. Н., Задворнов В. Ю., Отев К. С. Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог

73 **Kruchinin I. N., Burmistrova O. N., Zadvorinov V. Yu., Otev K. S.** Development of Methods for Assessing Winter Road Surfaces of Forest Roads

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. БИОТЕХНОЛОГИИ

PROBLEMS IN ECOLOGY AND RATIONAL NATURE MANAGMENT. BIOTECHNOLOGIES

Мазур В. В. Геоэкологическая оценка перспектив применения отходов угледобывающих предприятий в качестве почвенного субстрата в условиях Арктики

86 **Mazur V. V.** Geo-ecological Assessment of the Prospects of Using Coal Mining Waste as a Soil Substrate in the Arctic Conditions

Информация для авторов

95 *Information for the authors*

Уважаемые коллеги!

Представленные в выпуске статьи объединены ключевой темой **устойчивого управления лесными ресурсами** с акцентом на технологические, экологические и климатические аспекты.

В рубрике «**Лесное хозяйство**» выявлению видовых различий содержания сухого вещества в фитомассе, что критично для оценки углеродного баланса, посвящена работа В. А. Усолцева и Н. И. Плюхи «**Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии**». Исследования Д. А. Севергиной с соавторами «**Оценка качественного и количественного состава древесного опада и его роли в поступлении углерода на вырубке**» дополняют эту тему, анализируя последствия рубок в круговороте углерода. Статья А. Ю. Боровлёва и А. А. Елсакова «**Пространственный анализ ограничений сплошных рубок леса на водосборных бассейнах с использованием материалов дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий**» выделяется как практико-ориентированное исследование, предлагающее инструменты для снижения антропогенной нагрузки на лесные ландшафты. Их подход, сочетающий пространственный анализ и экологические приоритеты, задаёт вектор для современных лесозаготовок, где технологии служат не только эффективности, но и сохранению природного потенциала. Статья А. Г. Попова «**Влияние поздних весенних заморозков на репродукцию четырёх видов пятихвойных сосен...**» связывает климатические факторы (поздние заморозки) с репродуктивной устойчивостью хвойных в условиях подтайёжных лесов и лесной зоны южной тайги Западной Сибири с рекомендацией некоторых экотипов для использования в акклиматизации и дальнейшего внедрения в лесное хозяйство и озеленение.

В рубрике «**Технологии и машины лесного дела**» две статьи связаны с повышением эффективности и безопасности лесозаготовительной деятельности. Авторы предлагают инновационные подходы к решению технических проблем, связанных с эксплуатацией лесной техники и инфраструктуры. Так, статья А. В. Лагерёва и А. В. Макулиной «**Моделирование динамической нагруженности анкерного каната при работе харвестера на крутом склоне**» посвящена разработке математической модели для анализа безопасности работы харвестеров на крутых склонах. «**Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог**» И. Н. Кручининым с соавторами также направлена на повышение эффективности лесозаготовок в сложных зимних условиях.

Рубрика «**Проблемы экологии и рационального природопользования**» представлена исследованиями В. В. Мазур, в статье которой анализируется потенциал техногенных субстратов и биоразлагаемых материалов в условиях Арктики. Эта работа вносит вклад в дискуссию о рациональном природопользовании в условиях техногенной нагрузки, предлагая научно обоснованный подход к использованию отходов. Однако отсутствие чётких закономерностей в воздействии на растения подчёркивает необходимость дальнейших исследований для минимизации экологических угроз в хрупких арктических экосистемах.

Таким образом, данный выпуск отражает многогранность исследований в лесной отрасли, где экологические приоритеты гармонично сочетаются с технологическими инновациями и минимизацией антропогенного воздействия посредством научно обоснованных решений, что соответствует глобальным целям устойчивого развития.

Профессор Евгений Романов



Dear colleagues!

The articles presented in the issue are united by the key topic of **sustainable forest management** with an emphasis on technological, environmental and climatic aspects.

In the **Forestry** section, the article **Dry Matter Content in Fractions of Above-ground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia** by V. A. Usoltsev and N. I. Plyukha is devoted to the identification of species-specific differences in the dry matter content of phytomass, which is critical for assessing the carbon balance. The work **Assessing the Qualitative and Quantitative Composition of Tree Litter and its Role in Carbon Input in a Clearcut Area** by D. A. Severgina and her co-authors complements this topic by analyzing the impacts of logging on the carbon cycle. A. Yu. Borovlev and A. A. Elsakov's article **Spatial Analysis of Limitations of Clearcutting in Catchment Areas Using Remote Sensing Data and GIS Technologies** stands out as a practice-oriented study offering tools for reducing anthropogenic load on forest landscapes. Their approach, which combines spatial analysis and environmental priorities, is setting the vector for modern logging, where technology serves not only efficiency, but also the preservation of natural potential. A. G. Popov's article **The Influence of Late Spring Frosts on the Reproduction of Four 5-needle Pine Species during their Cultivation in the South of the Forest Zone of Western Siberia** connects climatic factors (late frosts) with the reproductive stability of conifers in the conditions of subtaiga forests and the forest zone of the southern taiga of Western Siberia and recommends some ecotypes for use in acclimatization and further introduction into forestry and landscaping.

In the section **Forestry Technologies and Machines**, two articles address the issue of increasing the efficiency and safety of logging activities. The authors propose innovative approaches to solving technical problems associated with the operation of forestry equipment and infrastructure. Thus, A. V. Lagerev and A. V. Makulina's article **Simulation of Dynamic Loading of an Anchor Rope during Harvester Operation on a Steep Slope** focuses on the development of a mathematical model for analyzing harvester safety on steep slopes. **The development of methods for assessing winter road surfaces of forest roads** by I. N. Kruchinin and his co-authors is also aimed at improving the efficiency of logging in difficult winter conditions.

The section **Problems of Ecology and Rational Nature Management** is represented by the research of V. V. Mazur, whose article analyzes the potential of technogenic substrates and biodegradable materials in Arctic conditions. This work contributes to the discussion of rational nature management under technogenic load by proposing a research-based approach to the use of waste. However, the lack of clear patterns in the impact on plants highlights the need for further research in order to minimize environmental threats in fragile Arctic ecosystems.

Thus, this journal issue reflects the multifaceted nature of forestry research where environmental priorities are harmoniously combined with technological innovation and minimization of anthropogenic impact through science-based solutions, which is in line with the global goals of sustainable development.

Professor Evgeniy Romanov

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО FORESTRY

Научная статья
УДК 603.907.3:528.94
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>
EDN: CVACMC

Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии

В. А. Усольцев^{1✉}, *Н. И. Плюха*^{1,2}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет,
Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

² Ботанический сад УрО РАН,
Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а
Usoltsev50@mail.ru[✉]

Аннотация. *Введение.* В условиях непрерывно возрастающей глобальной роли лесного покрова планеты исследование квалитетических показателей деревьев и древостоев становится одним из приоритетных направлений. Содержание сухого вещества (ССВ) в тканях растений является важным, но недостаточно изученным фактором. Определение ССВ в фитомассе деревьев как меры концентрации в ней органического вещества и углерода является одним из составных этапов при исследовании биологической продуктивности, фитомассы и чистой первичной продукции деревьев и древостоев. Различные фракции фитомассы деревьев различаются по соотношению ССВ и влаги, что влияет на скорость естественного разложения и возврата углерода и элементов питания в окружающую среду. Поскольку ССВ во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии на трансконтинентальном уровне ранее не исследовалось, сформулирована цель исследования – выявить видовые особенности ССВ во фракциях надземной фитомассы, а также соотношения ССВ в различных её фракциях, для чего разработать видоспецифичные регрессионные модели ССВ в фитомассе, описывающие его зависимость от дендрометрических показателей деревьев на территории Евразии. *Объекты и методы.* Для осуществления поставленной цели из авторской базы данных о квалитетических показателях основных пород Северной Евразии взяты 7 068 показателей ССВ в разных фракциях надземной фитомассы 14 лесообразующих видов. На их основе построены модели смешанного типа, в которых вклад дендрометрических показателей и фиктивных переменных, кодирующих видовую принадлежность ССВ, составил соответственно 8 и 92 %. *Результаты.* Установлено, что ССВ в древесине ствола изменяется от 72,5 % у ясеня до 42,7 % у пихты; ССВ в коре ствола – соответственно от 63,4 % у робинии до 44,3 % у ели; ССВ в хвое (листве) от 52,0 % у сосны чёрной до 28,4 % у липы; ССВ в ветвях – соответственно от 69,4 % у ясеня до 46,1 % у липы. Разность ССВ в коре ствола минус ССВ в древесине ствола изменяется от +11,6 % у сосны чёрной до -10,1 % у ясеня; разность ССВ в ветвях минус ССВ в древесине ствола изменяется от +10,1 % у пихты до -10,3 % у берёзы пушистой; разность ССВ в коре ствола минус ССВ в ветвях изменяется от +18,4 % у берёзы пушистой до -6,0 % у ясеня. Наконец, разность ССВ в ветвях минус ССВ в хвое (листве) изменяется от +31,4 % у ясеня до -1,2 % у сосны чёрной. *Вывод.* Разработанные регрессионные модели ССВ во фракциях фитомассы показали наличие существенных различий ССВ между фракциями и видами, что необходимо учитывать при оценках углероддепонирующей способности лесообразующих видов Евразии.

Ключевые слова: содержание сухого вещества; древесина и кора ствола; хвоя; листва; ветви; смешанные модели; видовые различия

Финансирование: работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

© Усольцев В. А., Плюха Н. И., 2025

Для цитирования: Усольцев В. А., Плюха Н. И. Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 6–18. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>; EDN: CVACMC

Введение

В условиях непрерывно возрастающей глобальной роли лесного покрова планеты исследование квалитетических показателей деревьев и древостоев становится одним из приоритетных направлений [1]. Содержание сухого вещества (ССВ) в тканях растений является важным, но недостаточно изученным показателем. Известна положительная взаимосвязь между скоростью фотосинтеза и содержанием воды в тканях [2–5]. Наличие воды в тканях является одним из фундаментальных факторов, регулирующих метаболизм и рост растений [6–9] и влияющих на круговорот углерода и энергетический баланс лесных экосистем [10]. В прикладном аспекте знание соотношений влаги и сухого вещества во фракциях фитомассы растений важно при оценке её калорийности [11, 12].

Известно, что вода необходима для всего живого, поскольку она служит биохимическим реагентом, растворителем и переносчиком питательных веществ. Наличие воды в значительной степени определяет продуктивность экосистем и их углеродный баланс [8], о чём свидетельствует гибель деревьев во всём мире, вызванная засухами [13, 14], хотя есть и иное мнение [15].

Определение ССВ в фитомассе деревьев как меры концентрации в ней органического вещества и углерода [16] является одним из составных этапов при исследовании фитомассы и чистой первичной продукции (ЧПП) деревьев и древостоев. ССВ в листе наиболее тесно связано с ЧПП по сравнению с удельной поверхностью листовой (отношением её поверхности к сухой массе). Показатель ССВ в листе рекомендован также в качестве наиболее надёжного показателя плодородия почвы, по крайней мере, в условиях достаточного влагообеспечения [17]. Было показано, что ССВ в листьях

отражает адаптационную стратегию растений, снижаясь по мере увеличения нестабильности субстрата в первичных вулканических отложениях [18].

По другим источникам, для диагностики почвенного плодородия и теневыносливости растений показатель ССВ в листе менее предпочтителен по сравнению с её удельной поверхностью [19]. Установлено, что ССВ в листьях достоверно ($P < 0,05$) отличается у однолетних растений (20 %) по сравнению с многолетними (31 %) [20]. Различные фракции фитомассы деревьев различаются анатомически и по соотношению ССВ и влаги, что влияет на скорость естественного разложения и возврата углерода и элементов питания в окружающую среду [21]. Сегодня в исследованиях фитомассы стволов деревьев превалирует раздельная оценка ССВ в древесине и коре [22, 23].

Обычно ССВ определяется гравиметрически, т. е. деструктивным способом путём взятия, обмера и взвешивания образцов тканей растений, что чрезвычайно затрудняет отслеживание динамики этого показателя в живом растении. Имеются различные сенсорные технологии, позволяющие коррелировать ССВ с другими, легко измеряемыми параметрами. Однако большинство существующих методов не позволяют неинвазивно измерять ССВ напрямую. Этот методологический пробел может восполнить релаксометрия на основе ядерного магнитного резонанса, который даёт возможность неинвазивно обнаруживать протоны в тканях растений и на основе этих измерений количественно определять ССВ в них [24].

Насколько нам известно, ССВ во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Северной Евразии на трансконтинентальном уровне ранее не исследовалось.

Таблица 1. Распределение 7 068 измерений ССВ в надземной фитомассе 14 видов с характеристикой исходных данных
 Table 1. Distribution of 7,068 measurements of DMC in the aboveground phytomass of 14 species with the characteristics of the source data

Вид	Регион	n	Диапазоны							Координаты	
			A, лет	D, см	S _{sw} , %	S _{sb} , %	S _f , %	S _b , %	с. ш., °	в. д., °	
			<i>Pinus sylvestris</i> L.	Центр Северной Евразии	879	7-290	1,0-56,0	31,2-68,8	33,3-72,4	31,0-61,2	25,0-65,5
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>Pallasiana</i> (Lamb.) Holmboe	Крым	17	7-72	6,7-33,0	43,0-55,3	51,0-67,7	46,0-56,7	43,9-55,5	44,6-45,2	33,4-35,1	
<i>Picea abies</i> (L.) Н. Karst.	Центр Северной Евразии	210	10-185	1,0-51,5	32,9-65,3	31,3-77,6	29,3-56,5	32,1-65,4	48,5-64,0	24,0-39,5	
<i>Abies alba</i> Mill.	Украинские Карпаты	46	8-94	1,6-46,2	33,1-57,2	31,8-57,2	41,3-53,1	42,0-61,1	48,2-49,5	22,7-25,0	
<i>Betula pubescens</i> Ehrh	Северо-запад РФ	111	10-142	1,0-40,0	32,4-69,4	48,6-86,6	20,7-59,9	23,6-74,3	61,5-64,0	34,5-39,5	
<i>B. pendula</i> Roth.	Центр Северной Евразии	194	8-98	1,0-44,0	41,1-67,2	35,6-77,7	23,8-67,6	40,2-76,6	48,1-55,8	25,9-83,0	
<i>Populus tremula</i> L.	Центр Северной Евразии	74	3-55	1,1-32,0	43,9-68,0	34,0-67,5	28,1-66,0	42,9-79,8	51,2-61,8	30,7-82,8	
<i>Tilia cordata</i> Mill.	Центр Русской равнины	18	26-77	1,6-38,6	47,9-58,1	47,2-54,0	24,4-34,0	43,2-49,5	51,4-55,8	37,4-42,0	
<i>Quercus robur</i> L.	Украинская лесостепь	67	8-128	3,0-46,1	40,4-66,1	44,7-77,2	38,0-62,0	47,7-67,6	49,0-51,5	31,0-33,0	
<i>Fagus sylvatica</i> L.	Украинские Карпаты	17	10-62	2,5-23,3	51,3-62,4	39,0-55,2	36,0-52,0	47,3-58,8	48,0-49,0	23,5-26,0	
<i>Alnus glutinosa</i> L.	Украинское Полесье	71	7-71	3,2-33,3	42,4-60,7	38,0-68,1	29,0-49,0	45,8-60,9	49,0-51,5	24,0-33,2	
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Украинская лесостепь	21	7-80	3,6-39,6	62,7-77,8	46,6-79,6	28,7-44,0	61,7-72,1	49,0-50,0	27,0-30,0	
<i>Carpinus betulus</i> L.	Украинская лесостепь	27	7-89	1,7-24,8	42,5-70,6	38,5-65,0	24,2-54,3	48,7-64,1	49,0-50,0	27,0-32,5	
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Украинская степь	15	3-89	4,5-28,6	49,7-69,5	47,6-70,4	38,8-52,3	47,8-70,5	48,2-48,5	34,3-36,0	

Примечание: n – число модельных деревьев; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; S_{sw}, S_{sb}, S_f, S_b – соответственно ССВ в древесине, коре, хвое и ветвях, %.

Цель предлагаемого исследования – выявить видовые особенности ССВ во фракциях надземной фитомассы, а также соотношения ССВ в различных её фракциях на основе регрессионного моделирования ССВ в фитомассе.

Объекты и методы исследования

Основу нашего исследования составила база данных о квалитетических показателях фитомассы деревьев лесобразующих древесных видов Центральной Евразии [25]. Из упомянутой базы данных отобраны 7 068 показателей ССВ в надземной фитомассе 14 лесобразующих видов. Их характеристика дана в табл. 1. Методика получения фактических данных о ССВ была изложена ранее [26]. В упомянутой работе [26] была применена модель смешанного типа [27, 28], в которую включены в качестве независимых переменных возраст дерева и диаметр ствола, а региональная принадлежность исходных данных была учтена введением в модель

фиктивных переменных. В настоящем исследовании фиктивными переменными кодируется видовая принадлежность исходных данных согласно табл. 2.

Результаты и их обсуждение

С учётом изложенного принята структура модели:

$$\ln(S_i) = a_0 + a_1 \ln(A) + a_2 \ln(D) + \sum b_i X_i, \quad (1)$$

где S_i – ССВ в i -й фракции фитомассы; $\sum b_i X_i$ – блок фиктивных переменных в количестве $(i+1)$. Результаты расчёта модели (1) даны в табл. 3, где численные (дендрометрические) независимые переменные значимы на уровне от $p < 0,001$ до $p < 0,05$. Соотношение фактических и расчётных по модели (1) данных (рис. 1) свидетельствует об отсутствии корреляции остатков. Результаты анализа вкладов численных и фиктивных независимых переменных модели (1) в объяснение изменчивости ССВ во фракциях приведены в табл. 4.

Таблица 2. Схема кодирования блоком фиктивных переменных принадлежности исходных данных к разным видам

Table 2. The coding scheme using a set of dummy variables to encode the belonging of source data to different species

Вид	Блок фиктивных переменных												
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
<i>Pinus sylvestris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinus nigra</i> subsp.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Picea abies</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Abies alba</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Betula pubescens</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>B. pendula</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Populus tremula</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Tilia cordata</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Quercus robur</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Fagus sylvatica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Alnus glutinosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Fraxinus excelsior</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Carpinus betulus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 3. Результаты расчёта модели (1)

Table 3. Calculation results according to the model (1)

Обозначение регрессионных коэффициентов и независимых переменных	Зависимая переменная			
	$\ln S_{sw}$	$\ln S_{sb}$	$\ln S_f$	$\ln S_b$
a_0^*	3,5520	3,7678	3,7698	3,7679
$a_1 \ln A$	0,1051	0,0583	0,0198	0,0328
$a_2 \ln D$	-0,0383	-	-	-0,0143
<i>Pinus sylvestris</i> $b_0 X_0$	3,5520	3,7678	3,7698	3,7679
<i>Pinus nigra</i> $b_1 X_1$	0,0880	0,1467	0,1057	0,0728
<i>Picea abies</i> $b_2 X_2$	0,0266	-0,1987	-0,0133	0,0771
<i>Abies alba</i> $b_3 X_3$	-0,0955	-0,1475	0,0062	0,1052
<i>Betula pubescens</i> $b_4 X_4$	0,1103	0,1428	-0,1636	0,0508
<i>B. pendula</i> $b_5 X_5$	0,1989	0,1378	-0,2204	0,1769
<i>Populus tremula</i> $b_6 X_6$	0,2532	-0,0372	-0,0635	0,2130
<i>Tilia cordata</i> $b_7 X_7$	0,0956	-0,0964	-0,4982	-0,0244
<i>Quercus robur</i> $b_8 X_8$	0,2371	0,0721	-0,0372	0,1965
<i>Fagus sylvatica</i> $b_9 X_9$	0,2247	-0,0751	-0,0476	0,1261
<i>Alnus glutinosa</i> $b_{10} X_{10}$	0,1258	-0,0134	-0,1854	0,0913
<i>Fraxinus excelsior</i> $b_{11} X_{11}$	0,4342	0,1348	-0,2330	0,3859
<i>Carpinus betulus</i> $b_{12} X_{12}$	0,2220	0,0010	-0,0685	0,2031
<i>Robinia pseudoacacia</i> $b_{13} X_{13}$	0,2580	0,1606	-0,0640	0,2619
Показатели адекватности модели				
Коэффициент детерминации**	0,570	0,355	0,333	0,365
Стандартная ошибка модели	0,100	0,131	0,131	0,106

Примечание: здесь и далее – * свободный член в моделях скорректирован на величину поправки $\exp(SE^2/2)$ [29]; ** – коэффициент детерминации здесь и далее скорректирован на число переменных.

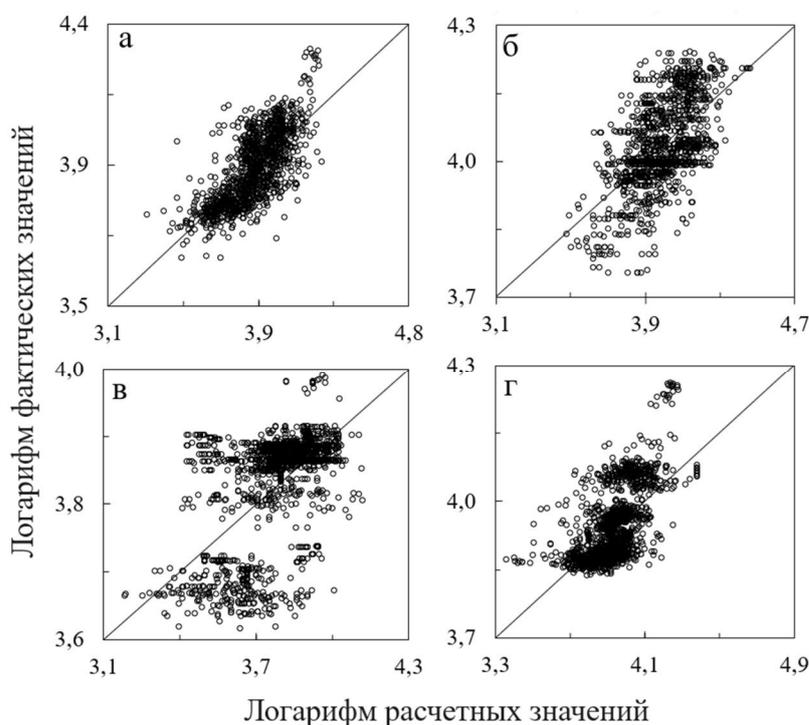


Рис. 1. Соотношение фактических и расчётных по модели (1) данных для ССВ в древесине (а), коре (б), листве (хвое) (в) и ветвях (г)

Fig. 1. The ratio of actual data and data calculated according to the model (1) for DMC in wood (a), bark (b), (needle) foliage (c), and branches (d)

Таблица 4. Вклад независимых переменных модели (1) в объяснение изменчивости зависимых переменных, %

Table 4. Contribution of the independent variables of the model (1) to the explanation of the variation of dependent variables, %

Вклад в объяснение изменчивости зависимой переменной:	Зависимая переменная				в среднем по всем фракциям
	lnSbk	lnSt	lnSf	lnSb	
- численных переменных	6	14	5	8	8,3±4,0
- фиктивных переменных	94	86	95	92	91,7±4,0

Судя по данным табл. 4, численные переменные объясняют изменчивость ССВ на уровне от 5 до 14 % (в среднем 8,3±4,0 %), и наибольший вклад в объяснение общей изменчивости ССВ вносит видовая принадлежность деревьев – 86–95 % (в среднем 91,7±4,0 %).

Путём подстановки в модели (1) средних значений возраста (43 года) и диаметра ствола (14,2 см) деревьев получены средние для каждого вида значения ССВ со среднеквадратическими отклонениями, ранжирование которых в убывающем порядке представлено на рис. 2.

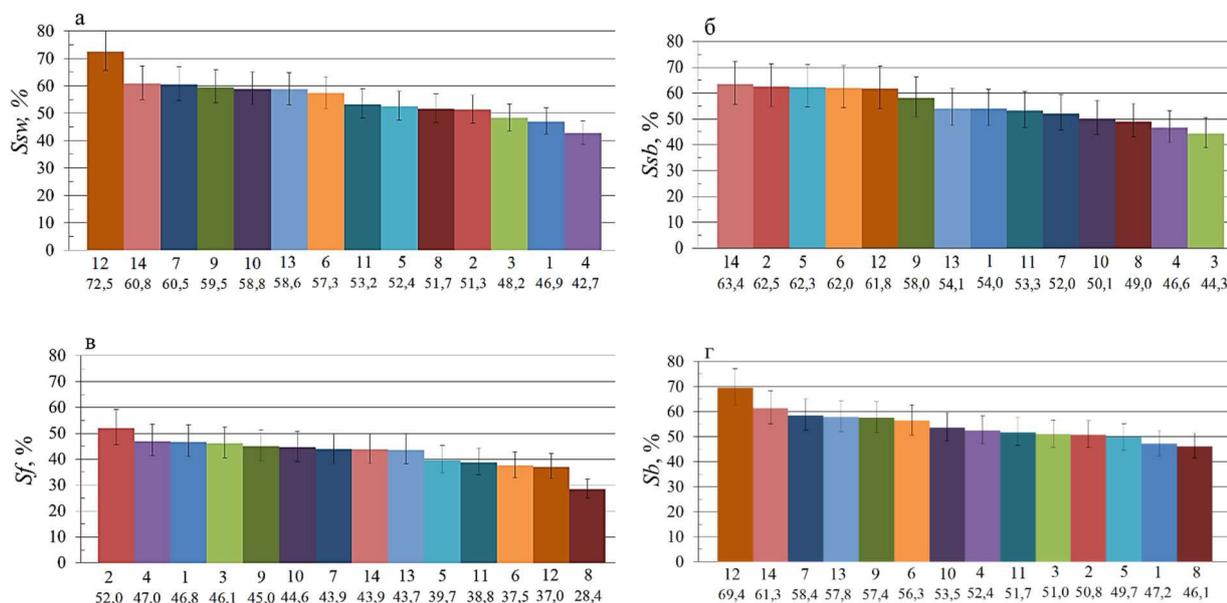


Рис. 2. Ранжирование видов по величине ССВ в разных фракциях надземной фитомассы; а, б, в, г – соответственно ССВ в древесине ствола, коре ствола, хвое и ветвях, %. Цифры вдоль оси абсцисс показывают значения ССВ для соответствующих видов. Обозначения видов: 1 – *Pinus sylvestris*, Центр Северной Евразии; 2 – *Pinus nigra*, Крым; 3 – *Picea abies*, Центр Северной Евразии; 4 – *Abies alba*, Украинские Карпаты; 5 – *Betula pubescens*, Северо-запад РФ; 6 – *B. pendula*, Центр Северной Евразии; 7 – *Populus tremula*, Центр Северной Евразии; 8 – *Tilia cordata*, Центр Русской равнины; 9 – *Quercus robur*, Украинская лесостепь; 10 – *Fagus sylvatica*, Украинские Карпаты; 11 – *Alnus glutinosa*, Украинское Полесье; 12 – *Fraxinus excelsior*, Украинская лесостепь; 13 – *Carpinus betulus*, Украинская лесостепь; 14 – *Robinia pseudoacacia*, Украинская степь

Fig. 2. Ranking of species based on DMC in different fractions of aboveground phytomass; a, b, c, d – DMC in stem wood, stem bark, needles and branches, respectively, %. The numbers along the abscissa axis show DMC values for respective species. Species designations: 1 – *Pinus sylvestris*, Center of Northern Eurasia; 2 – *Pinus nigra*, Crimea; 3 – *Picea abies*, Center of Northern Eurasia; 4 – *Abies alba*, Ukrainian Carpathians; 5 – *Betula pubescens*, North-West of the Russian Federation; 6 – *B. pendula*, Center of Northern Eurasia; 7 – *Populus tremula*, Center of Northern Eurasia; 8 – *Tilia cordata*, Center of the Russian Plain; 9 – *Quercus robur*, Ukrainian forest-steppe; 10 – *Fagus sylvatica*, Ukrainian Carpathians; 11 – *Alnus glutinosa*, Ukrainian Polesie; 12 – *Fraxinus excelsior*, Ukrainian forest-steppe; 13 – *Carpinus betulus*, Ukrainian forest-steppe; 14 – *Robinia pseudoacacia*, Ukrainian steppe

Как было отмечено выше, важное значение имеет знание соотношений ССВ в разных фракциях фитомассы у разных видов, чему в литературе практически не уделяется внимание. С целью восполнить этот пробел, используя данные 7 068 измерений ССВ в наземной фитомассе 14 видов (табл. 1), нами рассчитаны регрессионные модели для четырёх соотношений ССВ в разных фракциях фитомассы (табл. 5). За основу принята структура модели (1) с той разницей, что в качестве зависимой переменной принимается не ССВ в той или иной фракции фитомассы, а попарная разность ССВ во фракциях, в частности, между корой ствола и его древесиной ($Ssb-Ssw$), ветвями и древесиной ствола ($Sb-Ssw$), корой ствола и вет-

вями ($Ssb-Sb$) и, наконец, между ветвями и листвой (хвоей) ($Sb-Sf$), без их логарифмирования:

$$\Delta Si = a_0 + a_1 A + a_2 D + a_3 D^2 + \sum b_i X_i, \quad (2)$$

где ΔSi – разность ССВ между двумя фракциями фитомассы. Приведённые в табл. 5 численные (дендрометрические) независимые переменные значимы на уровне от $p < 0,001$ до $p < 0,05$.

Путём подстановки в модели (2) средних значений возраста (44 года) и диаметра ствола (14,2 см) деревьев получены средние для каждого вида разности ССВ (%) со среднеквадратическими отклонениями, ранжирование которых в плюсовом и минусовом порядке представлено на рис. 3.

Таблица 5. Результаты расчёта модели (2) для попарных разностей ССВ во фракциях фитомассы
Table 5. Calculation results according to the model (2) for pairwise differences of DMC in phytomass fractions

Обозначение регрессионных коэффициентов и независимых переменных	Зависимая переменная			
	$Ssb-Ssw$	$Sb-Ssw$	$Ssb-Sb$	$Sb-Sf$
a_0	6,561	2,509	5,197	1,072
$a_1 A$	-0,046	-0,022	-	-0,016
$a_2 D$	0,290	-0,071	0,074	-
$a_3 D^2$	-0,0056	-	-	0,0011
<i>Pinus sylvestris</i> $b_0 X_0$	6,561	2,509	5,197	1,072
<i>Pinus nigra</i> subsp. $b_1 X_1$	4,120	-0,282	5,190	-1,759
<i>Picea abies</i> $b_2 X_2$	-10,631	1,744	-14,014	5,079
<i>Abies alba</i> $b_3 X_3$	-3,375	9,545	-12,033	4,456
<i>Betula pubescens</i> $b_4 X_4$	-1,030	-10,852	9,054	10,204
<i>B. pendula</i> $b_5 X_5$	-2,761	0,392	-2,219	17,306
<i>Populus tremula</i> $b_6 X_6$	-14,404	0,075	-14,570	11,948
<i>Tilia cordata</i> $b_7 X_7$	-9,112	-6,581	-2,710	17,441
<i>Quercus robur</i> $b_8 X_8$	-8,148	-0,723	-5,363	11,258
<i>Fagus sylvatica</i> $b_9 X_9$	-15,653	-5,057	-9,561	8,220
<i>Alnus glutinosa</i> $b_{10} X_{10}$	-6,608	-0,765	-4,965	11,827
<i>Fraxinus excelsior</i> $b_{11} X_{11}$	-17,574	-1,483	-15,330	30,791
<i>Carpinus betulus</i> $b_{12} X_{12}$	-11,442	-1,280	-9,088	13,430
<i>Robinia pseudoacacia</i> $b_{13} X_{13}$	-5,622	0,343	-5,083	16,523
Показатели адекватности модели:				
коэффициент детерминации	0,316	0,170	0,303	0,489
стандартная ошибка модели	7,20	6,39	7,87	6,95

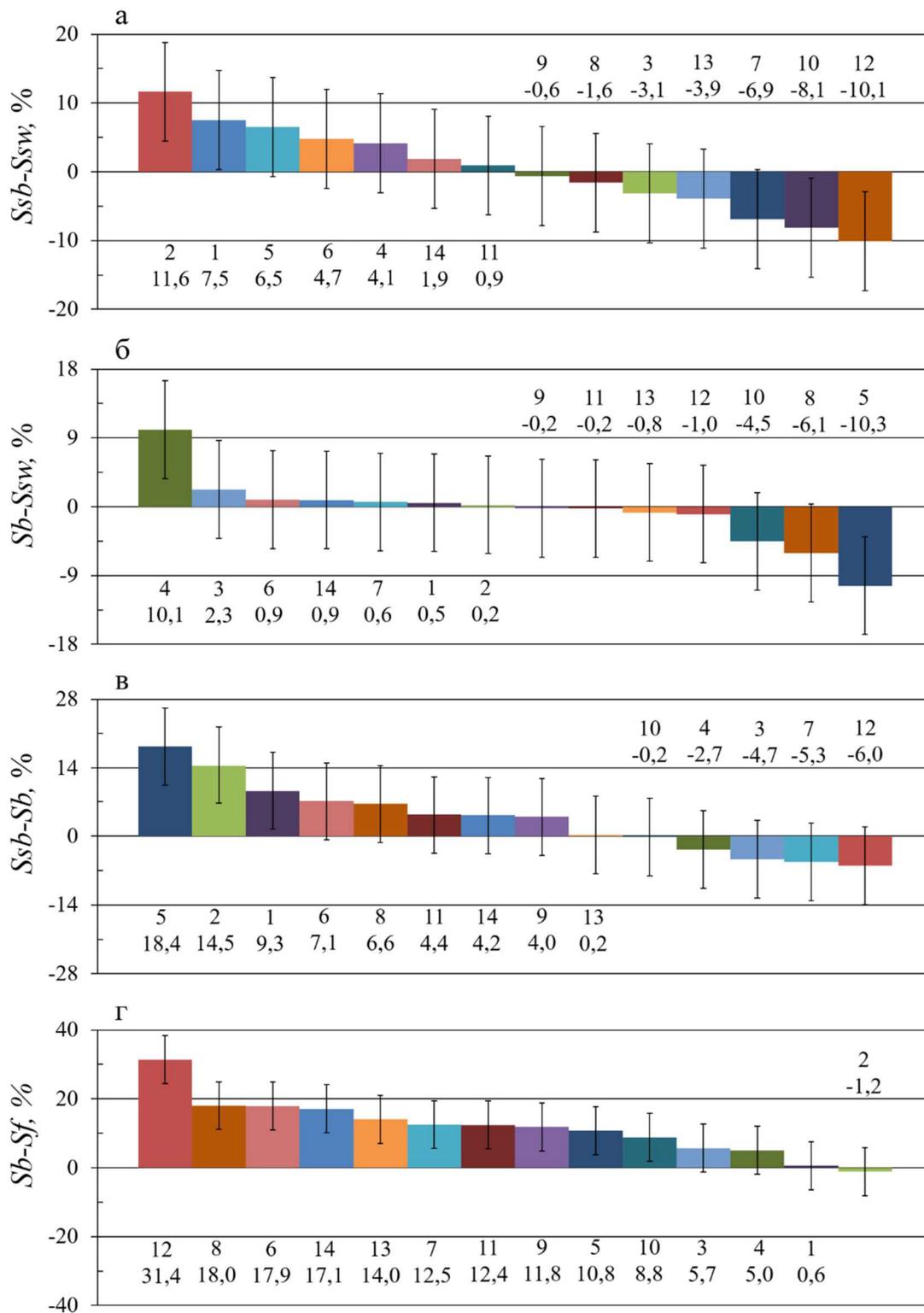


Рис. 3. Ранжирование разностей ССВ различных фракций фитомассы деревьев в плюсовом и минусовом порядке. Обозначения ССВ во фракциях см. табл. 1; обозначения видов см. рис. 2
 Fig. 3. Ranking of differences in DMC of different tree phytomass fractions in positive and negative order.
 Designations of DMC in fractions are given in Table 1; see Fig. 2 for species designations

Согласно рис. 3, а, разность ССВ в коре ствола минус ССВ в древесине ствола последовательно изменяется от +11,6 % у сосны чёрной до +0,9 % у ольхи, а затем от -0,6 у дуба до -10,1 % у ясеня. Разность ССВ в ветвях минус ССВ в древесине ствола (рис. 3, б) последовательно изменяется от +10,1 % у пихты до +0,2 % у сосны чёрной, а затем от -0,2 у дуба до -10,3 % у берёзы пушистой. Разность ССВ в коре ствола минус ССВ в ветвях (рис. 3, в) изменяется от +18,4 % у берёзы пушистой до +0,2 % у граба, а затем от -0,2 % у бука до -6,0 % у ясеня. Наконец, разность ССВ в ветвях минус ССВ в хвое (листве) (рис. 3, г) изменяется от +31,4 % у ясеня до +0,6 % у сосны обыкновенной и составляет -1,2 % у сосны чёрной.

Выводы

1. Построенные в нашей работе модели зависимости ССВ во фракциях фитомассы деревьев от возраста дерева и диаметра ствола, дифференцированные по лесобразующим видам Евразии, характеризуются коэффициентами детерминации в диапазоне от 0,333 до 0,570 и значимостью коэффициентов регрессии на уровне $p < 0,05$.

2. Ранжирование видов по величине ССВ во фракциях фитомассы показало наличие существенных различий между фракциями и видами. ССВ в древесине ствола изменяется от 72,5 % у ясеня до 42,7 % у пихты; ССВ в коре ствола – соответственно от 63,4 % у робинии до 44,3 % у ели; ССВ в хвое (листве) от 52,0 % у сосны чёрной до 28,4 % у липы; ССВ в ветвях – соответственно от 69,4 % у ясеня до 46,1 % у липы.

3. Разность ССВ в коре ствола минус ССВ в древесине ствола изменяется от +11,6 % у сосны чёрной до -10,1 % у ясеня; разность ССВ в ветвях минус ССВ в древесине ствола изменяется от +10,1 % у пихты до -10,3 % у берёзы пушистой; разность ССВ в коре ствола минус ССВ в ветвях изменяется от +18,4 % у берёзы пушистой до -6,0 % у ясеня. Наконец, разность ССВ в ветвях минус ССВ в хвое (листве) изменяется от +31,4 % у ясеня до -1,2 % у сосны чёрной.

4. Представленные закономерности изменения ССВ в различных фракциях фитомассы могут быть полезны при оценках углероддепонирующей способности лесобразующих видов Евразии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Morrow C. D., Gorman T. M., Evans J. W. et al. Prediction of Wood Quality in Small-Diameter Douglas-Fir Using Site and Stand Characteristics. *Wood and Fiber Science*. 2013;45(1):49–61.
2. Williams T. G., Flanagan L. B. Effects of changes in water content on photosynthesis, transpiration and discrimination against ^{13}C and ^{18}O in *Pleurozium* and *Sphagnum*. *Oecologia*. 1996;108(1):38–46. DOI: 10.1007/BF00333212
3. Lawlor D. W., Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell & Environment*. 2002;25(2):275–294. DOI: 10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x
4. Lawlor D. W., Tezara W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*. 2009;103(4):561–579. DOI: 10.1093/aob/mcn244
5. Sibly R. M., Brown J. H., Kodric-Brown A. (Eds.) *Metabolic Ecology: A Scaling Approach*. Chichester, UK, Wiley-Blackwell Press; 2012. 392 p. DOI: 10.1002/9781119968535
6. Wilson P., Thompson K., Hodgson J. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist*. 1999; 143(1):155–162. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x
7. Breshears D. D., Myers O. B., Meyer C. W. et al. Tree die-off in response to global change-type drought: mortality insights from a decade of plant water potential measurements. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2009;7(4):185–189. DOI: 10.1890/080016
8. Anderson-Teixeira K. J., Delong J. P., Fox A. M. et al. Differential responses of production and respiration to temperature and moisture drive the carbon balance across a climatic gradient in New Mexico. *Global Change Biology*. 2011;17(1):410–424. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02269.x

9. Huang H., Ran J., Ji M. et al. Water content quantitatively affects metabolic rates over the course of plant ontogeny. *New Phytologist*. 2020;228(5): 1524–1534. DOI: 10.1111/nph.16808
10. Wang Z., Huang H., Wang H. et al. Leaf water content contributes to global leaf trait relationships. *Nature Communications*. 2022;13(1): 5525. DOI: 10.1038/s41467-022-32784-1
11. Kumar H., Baredar P., Agrawal P. et al. Effect of moisture content on gasification efficiency in down draft gasifier. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2014;3(4):411–413.
12. Kirsanovs V., Žandeckis A., Blumberga D. et al. The influence of process temperature, equivalence ratio and fuel moisture content on gasification process: A review. In: *27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014)*: Proceedings (Finland, Turku, June 15–19, 2014). Turku: Abo Akademi University; 2014;1:1046–1060.
13. Anderegg W. R. L., Kane J. M., Anderegg L. D. L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*. 2013;3(1):30–36. DOI: 10.1038/nclimate1635
14. Chen R. F., Ran J. Z., Huang H. et al. Life history strategies drive size-dependent biomass allocation patterns of dryland ephemerals and shrubs. *Ecosphere*. 2019;10(4):e02709. DOI: 10.1002/ecs2.2709
15. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Bazhina E. V. et al. Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the South Siberian Mountains. *Forests*. 2022;13(9):1378. DOI: 10.3390/f13091378
16. Shipley B., Vu T.-T. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts. *New Phytologist*. 2002;153(2):359–364. DOI: 10.1046/j.0028-646X.2001.00320.x
17. Smart S. M., Glanville H. C., del Carmen Blanes M. et al. Leaf dry matter content is better at predicting above-ground net primary production than specific leaf area. *Functional Ecology*. 2017;31(6): 1336–1344. DOI: 10.1111/1365-2435.12832
18. Korablev A. P., Sandalova E. V., Arapov K. A. et al. Biomorphological traits and leaf dry matter content are important to plant persistence in a highly unstable volcanic ground. *Nature Conservation Research*. 2024;9(2):73–89. DOI: 10.24189/ncr.2024.015
19. Hodgson J. G., Montserrat-Marti G., Charles M. et al. Is leaf dry matter content a better predictor of soil fertility than specific leaf area. *Annals of Botany*. 2011;108(7):1337–1345. DOI: 10.1093/aob/mcr225
20. Li Y., Johnson D. A., Su Y. et al. Specific leaf area and leaf dry matter content of plants growing in sand dunes. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. 2005;46(2):127–134.
21. Huet S., Forgeard F., Nys C. Above- and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) in a time sequence. *Annals of Forest Science*. 2004;61(7): 683–694. DOI: 10.1051/forest:2004063
22. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Содержание сухого вещества в биомассе деревьев 13 видов Евразии: географические аспекты // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 3. С. 194–201. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-194-201; EDN: IXXMOW
- Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Dry matter content in the biomass of trees of 13 species of Eurasia: geographical aspects *Conifers of the Boreal Area*. 2022;40(3):194–201. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-194-201; EDN: IXXMOW (In Russ.).
23. Цепордей И. С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии: монография. Екатеринбург: Учебно-методический центр УПИ, 2023. 467 с. URI: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- Tsepordey I. S. Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia. *Monograph*. Yekaterinburg, Publishing House of the UPI Educational and Methodological Centre; 2023. 467 p. Available from: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450> (In Russ.).
24. Windt C. W., Nabel M., Kochs J. et al. A mobile NMR sensor and relaxometric method to non-destructively monitor water and dry matter content in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12: 617768. DOI: 10.3389/fpls.2021.617768
25. Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia. *Monograph*. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. Available from: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
26. Усольцев В. А., Плюха Н. И., Цепордей И. С. Региональные особенности содержания сухого вещества во фракциях фитомассы деревьев сосны обыкновенной // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 3 (63). С. 6–19. DOI: 10.25686/2306-2827.2024.3.6; EDN: MQBVKU
- Usoltsev V. A., Plukha N. I., Tsepordey I. S. Regional peculiarities of dry matter content in the phytomass fractions of Scots pine trees. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2024;(3):6–19. DOI: 10.25686/2306-2827.2024.3.6; EDN: MQBVKU (In Russ.).
27. Zeng W. S. Using nonlinear mixed model and dummy variable model approaches to construct origin-based single tree biomass equations. *Trees*. 2015;29(1):275–283. DOI: 10.1007/s00468-014-1112-0
28. Fu L., Sharma R. P., Hao K. et al. A generalized interregional nonlinear mixed-effects crown width

model for Prince Rupprecht larch in northern China. *Forest Ecology and Management*. 2017;389:364–373. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.12.034

29. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*. 1972;2(1):49–53. DOI: 10.1139/x72-009

Статья поступила в редакцию 15.07.2024; одобрена после рецензирования 15.09.2024; принята к публикации 25.11.2024

Информация об авторах

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация, фитогеография. Автор 930 научных публикаций, в том числе 43 монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>; SPIN-код: 3668-6843

ПЛЮХА Николай Иванович – аспирант, Институт леса и природопользования, Уральский государственный лесотехнический университет; младший научный сотрудник, Ботанический сад УрО РАН. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация. Автор 19 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>; SPIN-код: 4682-7412

Доступность данных и материалов: наборы данных, проанализированные в ходе исследования, являются общедоступными.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>

EDN: CVACMC

Dry Matter Content in Fractions of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia

V. A. Usoltsev ^{1✉}, N. I. Plyukha^{1,2}

¹ Ural State Forest Engineering University,

37, Sibirskii Trakt, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

² Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch,

202a, 8 Marta str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

Usoltsev50@mail.ru ✉

Abstract. *Introduction.* In the context of the continuously increasing global role of the planet's forest cover, the study of qualimetric indicators of trees and stands is becoming one of the priorities. The dry matter content (DMC) in plant tissues is an important but insufficiently studied factor. Determination of DMC in the phytomass of trees as a measure of organic matter and carbon concentrations in it is an essential stage in studying biological productivity, phytomass and net primary production of trees and stands. Various fractions of tree phytomass differ in the DMC-moisture ratio, which affects the rate of natural decomposition and the return of carbon and nutrients to the environment. Since DMC in fractions of the aboveground phytomass of forest-forming species of Eurasia have not been previously studied at the transcontinental level, *the aim of this study* is to identify species-specific features of DMC in the aboveground phytomass fractions, as well as the DMC ratios in its various fractions, for which species-specific regression models of DMC in phytomass should be developed that will describe its dependence on dendrometric indicators of trees in Eurasia. *Objects and methods.* To achieve this aim, 7,068 indicators of DMC in different fractions of aboveground phytomass of 14 forest-forming species were selected from the author's database on the qualimetry of the main species of Eurasia. Based on them, mixed-type models were built, in which the contribution of dendrometric indicators and dummy variables encoding the belonging of DMC to certain species amounted to 8 and 92 %, respectively. *Results.* It was found that DMC in the stem wood varies from 72.5 % in *Fraxinus excelsior* to 42.7 % in *Abies alba*; DMC in the stem bark varies from 63.4 % in *Robinia pseudoacacia* to 44.3 % in *Picea abies*, respectively; DMC in (needle) foliage varies from 52.0 % in *Pinus nigra* to 28.4 % in *Tilia cordata*; DMC in branches varies from 69.4 % in *Fraxinus* to 46.1 % in *Tilia*, respectively. The difference between DMC in the stem bark and DMC in the stem wood varies from +11.6 % in *Pinus nigra* to -10.1 % in *Fraxinus*; the difference between DMC in the branches and DMC in the stem wood varies from +10.1 % in *Abies* to -10.3 % in *Betula pubescens*; the difference between DMC in the stem bark and DMC in the branches varies from +18.4 % in *Betula pubescens* to -6.0 % in *Fraxinus*. Finally, the difference between DMC in branches and DMC in foliage varies from +31.4 % in *Fraxinus* to -1.2 % in *Pinus nigra*. *Conclusion.* The developed regression models of DMC in phytomass fractions have demonstrated significant differences in DMC between fractions and species, which must be taken into account when assessing the carbon depositing capacity of the forest-forming species of Eurasia.

Keywords: dry matter content (DMC); stem wood and bark; needles; foliage; branches; mixed-type models; species-specific differences

Funding: the study was carried out under the state task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Usoltsev V. A., Plyukha N. I. Dry Matter Content in Fractions of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):6–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>; EDN: CVACMC

The article was submitted 15.07.2024; approved after reviewing 15.09.2024;
accepted for publication 25.11.2024

Information about the authors

Vladimir A. Usoltsev – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University. Research interests – forestry, forest taxation, phytogeography. Author of 930 scientific publications, including 43 monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>; SPIN: 3668-6843

Nikolai I. Plyukha – postgraduate student of the Ural State Forestry Engineering University, Junior Researcher at the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests – forestry, forest taxation. Author of 19 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>; SPIN: 4682-7412

Availability of data and materials. The datasets analyzed during the study are publicly available.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the paper preparation.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.
All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630*114.351

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.19>

EDN: FXPLTA

Оценка качественного и количественного состава древесного опада и его роли в поступлении углерода на вырубке

Д. А. Севергина¹, П. А. Арзубов^{1,2,✉}, И. В. Паюсова¹, А. Ф. Осипов¹, А. А. Дымов¹

¹ Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,

Российская Федерация, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28

² Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,

Российская Федерация, 167001, Сыктывкар, Октябрьский пр., 55

arzubov-2000@mail.ru ✉

Аннотация. *Введение.* Поступление растительного опада является ключевым звеном круговорота веществ в наземных экосистемах. Качество и состав древесного опада, поступающего на поверхность почвы, определяется возрастом и составом древостоя. К настоящему времени слабоизученными являются происходящие изменения в функционировании таёжных экосистем при сплошных рубках с использованием специализированной техники и в процессе лесовозобновления. *Цель* настоящей работы – оценить количественный и качественный состав опада на вырубках хвойно-лиственного насаждения средней тайги Республики Коми на различных технологических участках и поступление в его составе углерода на поверхность почвы. *Объекты и методы исследования.* Исследование проведено на территории Сыктывдинского района Республики Коми. Древесный опад собирали в конце мая 2022–2024 гг. и в конце вегетационных периодов 2021–2023 гг. после осеннего листопада. При анализе полученных данных выделялись две группы фракций по скорости их разложения: активные (листья, хвоя, семена) и неактивные (ветви, кора, шишки). Для пересчёта массы растительного органического вещества подстилки в запасы углерода использовались коэффициенты, специфичные для отдельных фракций в исследуемом регионе. *Результаты.* Масса древесного опада на фоновом участке в разные годы составила: в 2021–2022 гг. – $347,34 \pm 15,64$ г/м², в 2022–2023 гг. – $304,25 \pm 16,33$ г/м², в 2023–2024 гг. – $260,74 \pm 13,30$ г/м². После проведения сплошной рубки среднетаёжного хвойно-лиственного насаждения годовое поступление древесного опада уменьшилось в 14–66 раз за весь период наблюдений. В фоновом хвойно-лиственном насаждении за три года наблюдений количество поступающего углерода изменялось от $164,71 \pm 7,35$ до $123,49 \pm 6,25$ гС/м². Удаление древесного яруса в результате вырубki леса привело к значительному снижению поставок углерода с опадом древесных растений на поверхность почвы в 14–70 раз.

Ключевые слова: древесный опад; поступление углерода; сплошная рубка; лесные экосистемы

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-74-10007, <https://rscf.ru/project/23-74-10007/>.

Для цитирования: Оценка качественного и количественного состава древесного опада и его роли в поступлении углерода на вырубке / Д. А. Севергина, П. А. Арзубов, И. В. Паюсова и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 19–32. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.19>; EDN: FXPLTA

Введение

В бореальных лесах сконцентрированы значительные запасы углерода, около 30–60 % из которых содержится в почвах [1, 2]. Оценка продуктивности этих лесов,

играющих ключевую роль в обеспечении материальных и духовных потребностей человека, а также в поддержании устойчивости биосферы, давно является важной задачей как в научных, так и практических

аспектах. На уровне лесного насаждения общие потоки и запасы углерода определяются для всех её компонентов. Эта проблема особенно актуальна для нашей страны, на территории которой произрастает около четверти всех лесов планеты, включая более половины хвойных лесов [3, 4].

Поступление растительного опада является ключевым звеном в круговороте веществ, связывающим биомассу и почву [5]. В лесных экосистемах он играет важную роль в процессе почвообразования, биологическом круговороте углерода, азота и зольных элементов, поступающих в почву. Этот процесс также служит одним из входящих параметров при моделировании временной динамики органического вещества в экосистемах после нарушений и при различных сценариях ведения лесного хозяйства [6].

Опад древесных растений – листья, хвоя, семена, ветви, кора и другие части, отмирающие в течение определённого времени, являются одним из важнейших компонентов, влияющих на формирование биогеохимических циклов лесных экосистем [7]. Качество и состав древесного опада зависят от возраста и состава древостоя. Анализ состава опада в фитоценозе позволяет оценить некоторые аспекты биологического круговорота веществ [8]. Качественный состав опада является одним из важнейших факторов, определяющих формирование и аккумуляцию углерода в подстилках лесных сообществ [9].

На территории Республики Коми в подзоне средней тайги еловые леса составляют 6,74 млн. га [10]. Известно, что в лесных экосистемах изменения, вызываемые хозяйственной деятельностью, ведут к нарушению биологического круговорота веществ. Рубка леса является одним из мощных факторов динамики лесных сообществ, вызывающих трансформацию структурных компонентов лесных экосистем и нарушение обменных процессов. Оценку изменений функционирования

лесных биогеоценозов в процессе рубки невозможно проводить без всестороннего изучения связей между фитоценозами и почвой [11]. Лесозаготовительные мероприятия являются одним из главных антропогенных факторов, изменяющих лесные экосистемы [12].

На сегодняшний день остаются малоизученными изменения в функционировании таёжных экосистем, вызванные сплошными рубками с применением специализированной техники, а также процессы лесовозобновления. Это затрудняет оценку количественного и качественного состава древесного опада [13]. В условиях изменения климата и антропогенного воздействия на лесные массивы изучение состава древесного опада становится особенно актуальным.

Исследований, посвящённых количественному и качественному составу опада на вырубках, недостаточно [8, 13–15] для полного понимания их влияния на хвойные лесные сообщества. Работы, посвящённые поступлению углерода с древесным опадом на поверхность почвы, носят единичный характер [11, 16, 17]. При этом в данных исследованиях не учитывались различия между технологическими участками вырубок (пасека, волок, выравненный волок), что является новизной в настоящей работе.

Цель данного исследования – оценить количественный и качественный состав опада на вырубке хвойно-лиственного насаждения средней тайги Республики Коми на различных технологических участках, а также определить поступление углерода в составе опада на поверхность почвы в первые три года после рубки.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1) подобрать три различных технологических участка вырубки и фоновый лес для сравнения;

2) исследовать количественный и качественный состав древесного опада в течение первых трёх лет наблюдений;

3) определить поступление углерода на поверхность почвы с древесным опадом за первые три года наблюдений после рубки.

Объекты и методы

Исследование проводилось на территории Республики Коми (РК) в Сыктывдинском районе с октября 2021 года по май 2024 года. Климат района умеренно-континентальный, с умеренно холодными условиями. Среднемесячная температура воздуха составляет $+16,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в июле и $-15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в январе, среднегодовая температура – $+0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, годовое количество осадков – 514 мм [18].

Древесный ярус фонового участка представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), берёзой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и берёзой повислой (*Betula pendula* Roth.). В виде незначительной примеси встречаются пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и осина (*Populus tremula* L.). Ярусность в древостое не выражена. В подросте доминировала ель с небольшой примесью берёзы

и осины [19]. Естественное лесовозобновление на вырубках происходит преимущественно лиственными породами, с преобладанием берёзы.

Определение качественного и количественного состава древесного опада проводили в среднетаёжном хвойно-лиственном насаждении в фоновом лесу рядом с вырубкой, в 400 м от неё [20]. Рубка леса проводилась в декабре 2020 года с использованием специализированной техники (форвардер и харвестер). Площадь вырубki составила 30 га, на которой были выбраны пасечные участки и волока, доля которых составляет 17–18 % территории вырубki [21]. Согласно почвенно-географическому районированию Республики Коми [22], исследуемая территория расположена в южной части Вымь-Вычегодского округа типичных подзолистых почв, иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых почв. Описание свойств почв и растительных сообществ до и после рубки было исследовано нами ранее [23].

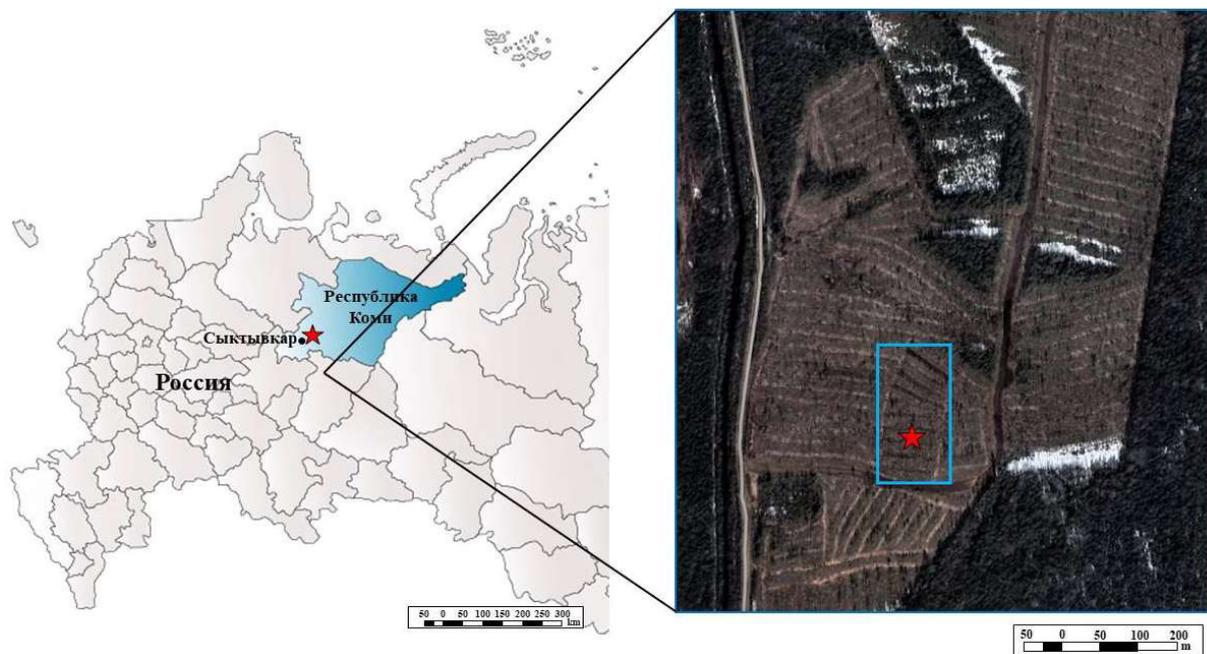


Рис. 1. Расположение объекта исследования
Fig. 1. Location of the study object

Поскольку проведение ежегодного цикла наблюдений перед рубкой леса было невозможно, масса опада определялась в условно-фоновом насаждении, растущем рядом с вырубкой [24]. Использование такого подхода позволило исключить влияние погодных условий конкретного года на массу поступающего опада из-за одинакового периода наблюдений [25].

Отбор опада производился с помощью 30 случайно расположенных опадоуловителей (ОУ) размером 0,25 м². Десять ОУ были установлены в фоновом хвойно-лиственном насаждении, расположенном рядом с вырубкой. Двадцать ОУ на вырубке, причём пять из них установлены на пасечных участках, а 15 на волоках, из которых пять установлены на волоке, на котором было проведено выравнивание колеи, удаление подстилки, пней и порубочных остатков (10Р) (рис. 2). Опад собирали в конце мая 2022–2024 гг. и в конце вегетационных периодов 2021–2023 гг. после осеннего листопада.



Рис. 2. Внешний вид опадоуловителя на волоке 10Р

Fig. 2. Appearance of a litterfall collector on Skidding Trail 10R

В лабораторных условиях собранные образцы сортировали на фракции. При анализе полученных данных выделяли две группы фракций по скорости их разложения: активные (листья, хвоя, семена) и неактивные (ветви, кора, шишки) [26]. Трудно дифференцируемые, сильно измельчённые образцы были отнесены к фракции «растительный остаток» [25]. Для пересчёта массы растительного органического вещества в подстилке в запасы углерода использовались коэффициенты, специфичные для отдельных фракций в исследуемом регионе [8, 13, 27, 28].

Статистический анализ выполнен в Microsoft Excel и R 4.2.2 (R Core Team, 2022). Рассчитывались средние значения и их ошибки. Нормальность распределения исходных данных и остатков линейных моделей регрессии проверяли методом Шапиро–Уилка. В случае нормального распределения парные межгодовые сравнения проводили при помощи t-теста (t_f). Для сравнения поступления древесного опада на поверхность почвы технологических элементов вырубке использовали критерий Краскелла–Уоллиса вследствие ненормальности распределения исходных данных и отсутствия однородности групповых дисперсий.

Результаты и их обсуждение

Одним из важнейших параметров поступления химических элементов на поверхность почвы является растительный опад [29]. Масса древесного опада (табл. 1), поступившего на поверхность почвы ненарушенного участка хвойно-лиственного насаждения, за разные годы составила: в 2021–2022 гг. – $347,34 \pm 15,64$ г/м², в 2022–2023 гг. – $304,25 \pm 16,33$ г/м², в 2023–2024 гг. – $260,74 \pm 13,30$ г/м². Получившиеся результаты соответствуют литературным данным [8, 10]. Так по полученным данным [8] в ельнике черничном масса опада составила 198–303 г/м² в разные годы наблюдений, а в [10] ельнике чернично-сфагновом данные колеблются от 244,56–274,13 г/м².

Таблица 1. Масса древесного опада в фоновом хвойно-лиственном насаждении древесного яруса
Table 1. The mass of litter from the tree layer in the background coniferous-deciduous stand

Фракция	Масса, г/м ² в год, воздушно-сухого вещества по годам		
	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.
<i>Активные фракции, в т. ч.</i>	265,43±14,19	236,34±10,86	182,25±12,48
хвоя ели	99,02±7,46	113,27±12,68	58,20±5,02
хвоя сосны	0,82±0,49	0,71±0,49	0,51±0,49
хвоя пихты	0,05±0,04	0,01±0,01	0,06±0,03
листья берёзы	125,40±11,42	112,13±9,26	110,91±11,84
листья осины	4,29±1,91	4,56±3,79	9,15±3,77
листья рябины	–	–	0,04±0,04
РОДР ¹	35,87±10,86	5,66±0,70	3,39±0,41
<i>Неактивные фракции, в т. ч.</i>	66,74±11,77	45,58±12,06	61,35±11,04
кора	2,52±0,73	11,32±9,97	3,00±1,94
ветви	64,07±11,75	33,94±4,52	52,49±8,96
шишки	0,16±0,16	0,32±0,18	5,86±3,38
РО ²	15,17±2,12	22,32±1,82	13,75±1,18
<i>Всего</i>	347,34±15,64	304,25±16,33	260,74±13,30

Примечание: ¹РОДР – репродуктивные органы древесных растений (почки, семена); ²РО – растительный остаток; ± – ошибка среднего; прочерк – данные отсутствуют.

В составе древесного опада преобладает активная фракция (75 % от общего опада), в составе которой преобладают хвоя (55 %) и листья (39 %), незначительная часть приходится на семена, около 6 %. Неактивная фракция занимает 19 % от общего опада, составленная из коры (11 %), ветвей (85 %), а также шишек (4 %). Растительный остаток составляет 6 % от всего опада. Наблюдаемое распределение фракций типично для изучаемых лесов. В работе [10] доля активных фракций составила 65 %, а неактивных – 35 %. Наблюдается резкое уменьшение РОДР в 10 раз после первого года изучения, что обуславливается уменьшением количества семян берёзы. В ельнике чернично-сфагновом средней тайги [17] годовое поступление древесного опада составляло 260 г/м², доля активной фракции составляла 64 % (преобладает хвоя – 55 % от общей массы), неактивной – 24 %.

После проведения сплошной рубки среднетаёжного хвойно-лиственного насаждения годовое поступление древесного опада уменьшилось в 14–66 раз за весь период наблюдений (табл. 2). На поверхность технологических участков вырубке в течение 2021–2022 гг. поступает

4,79–10,27 г/м², причём меньший показатель на выравненном волоке (10Р), а больший – на волоке. На всех элементах вырубке преобладает активная фракция (71–81 %), преимущественно составленная листьями древесных растений (44–66 %), что является следствием активного заселения пространства вырубке мелколиственными породами. Доля опада хвои (сосны, ели и пихты) составляет всего 17 % на 10Р, 25 % на волоке и 30 % на пасеке. Согласно А. А. Дымову с соавт. [8], опад листьев древесных растений на вырубке составлял 62,5 %.

В течение 2022–2023 гг. масса поступившего древесного опада на волоке и 10Р практически не изменилась (12,1±1,4 и 6,1±1,6 г/м² соответственно), за исключением пасечного участка, где наблюдалось увеличение в 2,1 раза и составила 18,67±6,6 г/м². Наблюдается схожая тенденция преобладания активной фракции (70–79 %) с предыдущим годом, которая также в большей степени состоит из листьев (48–57 %). Доля хвои (сосны, ели) варьирует от 8 до 20 %. Исключением является 10Р, где доля хвои больше доли листьев древесных растений (34 и 28 % соответственно).

Таблица 2. **Масса древесного опада древесного яруса на вырубке**
 Table 2. The mass of litter from the tree layer in a clearcut area

Фракции	Масса древесного опада, г/м ² в год, воздушно-сухого вещества								
	Пасека			Волок			10Р ¹		
	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.
<i>Активные фракции, в т. ч.</i>	7,08±0,81	13,61±4,07	15,10±4,31	7,36±1,31	9,56±1,50	11,89±2,86	4,20±0,00	3,91±0,42	3,77±0,75
хвоя ели	1,61±0,59	0,70±0,36	0,17±0,10	0,90±0,23	1,18±0,50	0,21±0,06	0,48±0,10	1,73±0,31	0,38±0,14
хвоя сосны	0,93±0,35	0,93±0,43	0,43±0,11	1,13±0,25	1,33±0,29	1,26±0,32	0,37±0,14	0,32±0,13	0,07±0,03
листья берёзы	2,19±0,27	5,03±1,60	5,74±2,60	3,12±0,78	5,08±1,23	5,53±1,06	1,40±0,51	1,39±0,48	3,07±0,66
листья осины	1,75±0,83	2,28±0,67	7,97±3,23	0,84±0,30	0,25±0,18	1,87±0,65	1,95±1,95	0,37±0,37	0,09±0,07
листья рябины	0,35±0,22	1,59±1,59	–	0,02±0,02	0,11±0,11	–	–	–	–
листья ивы	0,24±0,24	0,05±0,05	0,15±0,15	0,57±0,57	0,17±0,11	0,42±0,30	–	–	0,10±0,10
листья шиповника	–	2,99±1,74	0,27±0,18	–	1,28±0,70	2,39±1,52	–	–	0,02±0,02
РОДР ²	–	0,04±0,03	0,38±0,18	0,16±0,11	0,16±0,09	0,20±0,06	–	0,11±0,11	0,05±0,03
<i>Неактивные фракции, в т. ч.</i>	0,74±0,26	3,98±3,83	0,70±0,28	2,41±0,56	1,62±0,69	1,08±0,58	0,26±0,07	1,40±0,82	0,06±0,04
кора	0,30±0,14	0,07±0,04	0,14±0,01	0,93±0,32	1,37±0,73	0,02±0,02	0,19±0,05	0,46±0,20	–
ветви	0,43±0,17	3,90±3,80	0,56±0,28	1,48±0,40	0,25±0,09	1,06±0,56	0,07±0,04	0,94±0,68	0,06±0,04
<i>РО³</i>	0,56±0,11	1,09±0,18	2,00±0,86	0,50±0,08	0,88±0,11	0,75±0,23	0,39±0,16	0,78±0,36	0,08±0,04
<i>Всего</i>	8,68±0,78	18,67±6,60	18,18±4,98	10,27±1,80	12,06±1,38	13,71±3,45	4,79±2,28	6,09±1,55	3,92±0,82

Примечание: ¹10Р – волок, на котором проведено выравнивание и удаление подстилки; ²РОДР – репродуктивные органы древесных растений (почки, семена); ³РО – растительный остаток; ± – ошибка среднего; прочерк – данные отсутствуют.

В период с 2023 по 2024 гг. получают схожие результаты поступления опада на технологические элементы вырубки. На пасечный участок поступило $18,18 \pm 4,98$, на волок – $13,71 \pm 3,45$, на 10Р – $3,92 \pm 0,82$ г/м² в год. Заметно явное превалирование активной фракции, на долю которой приходится 81–97 %. Всё так же доминируют листья древесных растений – 74–83 %.

На вырубках 1–4-летней давности в Архангельской области ельника чернично-влажного доля хвои и листьев не превышает 14–15 г/м² [15], что сопоставимо с нашими результатами. В работе [14] на вырубках 4–6-летних ельников чернично-влажного и долгомошно-сфагнового годовое поступление древесного опада составляло 36,61 и 41,21 г/м² соответственно, что существенно превышает получившиеся показатели в данной работе. Доля активной фракции составляет 61 %, неактивной – 32 %. Спустя 20 лет после сплошной рубки в ельнике черничном годовое поступление древесного опада составило 158 г/м² [30].

По данным наблюдений за три года, на вырубке хвойно-лиственного насаждения отмечается возрастание массы древесного опада, что обусловлено начальными сукцессионными процессами. Однако достоверные межгодовые различия этого параметра за период исследований отсутствуют, что во многом связано с неравномерным размещением подроста по территории вырубки. Стоит отметить, что на участках волоков за время наблюдений увеличение годового поступления опада не происходит, так как полученные данные находятся в пределах погрешности.

На пасечном участке за весь промежуток исследования с 2021 по 2024 гг. различий в годовом поступлении опада не обнаружено ($pt > 0,05$) по всем показателям, за исключением поступления хвои сосны и ели в 2022 и 2024 годах, где показатель упал в 1,6 раза ($pt = 0,023$). На воло-

ке заметно сокращение поступления хвои сосны и ели, где с 2023 по 2024 год оно сократилось в 1,7 раза ($pt = 0,005$). Происходит существенное увеличение поступления всех листьев древесных растений с 2022 по 2024 гг. в 2,2 раза ($pt = 0,043$), практически исчезает кора растений за три года наблюдений, уменьшилась в 46 раз ($pt = 0,17$). На выравненном волокне (10Р) доля неактивной фракции с 2022 по 2024 год уменьшилась в 4,4 раза ($pt = 0,037$). Хвоя древесных растений с 2023 по 2024 год уменьшилась в 4,5 раза ($pt = 0,011$) за счёт уменьшения хвои ели в 4,6 раза ($pt = 0,016$).

В целом, за весь период наблюдений на вырубке преобладает активная фракция (61–97 %), в состав которой входят хвоя, листья, РОДР. Неактивная фракция занимает 2–30 % (кора, ветви, шишки) от общего поступления опада. Незначительная часть приходится на растительный остаток 1–11 %.

В фоновом хвойно-лиственном насаждении за три года наблюдений количество поступающего углерода с древесного опада изменялось от $164,71 \pm 7,35$ до $123,49 \pm 6,25$ г/м² (табл. 3). Значения данных находятся в аналогичных пределах, что совпадает с литературными данными ($69,6–172$ г/м²) [16]. По другим материалам [17], количество поступающего углерода на поверхность почвы с опадом составило 130 г/м². После проведения сплошной рубки скорость поступления углерода уменьшается в 1,3–1,9 раза, из которых лишь 17–18 % приходится на древесный опад ($17–18$ г/м²).

Удаление древесного яруса в результате вырубки леса привело к значительному снижению поставок углерода с опадом древесных растений на поверхность почвы. Произошло уменьшение в первый год в 34–70 раз, за второй год в 16–50 раз, в третий год в 14–67 раз (табл. 4). Стоит отметить, что наименьшие показатели всегда получены на участке 10Р.

Таблица 3. Поступление углерода с древесным опадом в хвойно-лиственном насаждении
Table 3. Carbon input from tree litter in a coniferous-deciduous stand

Фракция	Поступление углерода, гС/м ² в год		
	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.
<i>Активные фракции, в т. ч.</i>	124,88±6,67	111,08±5,10	85,66±5,87
хвоя ели	46,76±3,51	53,49±5,96	27,48±2,36
хвоя сосны	0,44±0,23	0,38±0,23	0,27±0,23
хвоя пихты	0,02±0,01	0,01±0,01	0,03±0,01
листья берёзы	60,19±5,37	53,82±4,35	53,23±5,56
листья осины	2,02±0,90	2,15±1,78	4,31±1,77
листья рябины	–	–	0,02±0,02
РОДР ¹	16,98±5,09	2,68±0,33	1,60±0,19
<i>Неактивные фракции, в т. ч.</i>	31,69±5,53	21,59±5,67	29,06±5,19
кора	1,27±0,34	5,36±4,69	1,42±0,91
ветви	30,34±5,52	16,07±2,12	24,86±4,21
шишки	0,08±0,08	0,15±0,08	2,78±1,59
РО ²	7,18±0,99	10,57±0,86	6,51±0,55
<i>Всего</i>	164,71±7,35	144,09±7,68	123,49±6,25

Примечание: ¹РОДР – репродуктивные органы древесных растений (почки, семена); ²РО – растительный остаток; ± – ошибка среднего; прочерк – данные отсутствуют.

На пасечном участке годовое поступление углерода в 2021–2022 гг. составило 4,08±0,37 гС/м², в период с 2022 по 2023 гг. – 8,77±3,10 гС/м², а с 2023 по 2024 гг. – 8,54±2,34 гС/м². На волоке в первый год 4,83±0,85 гС/м², во второй год – 5,67±0,65 г/м², в третий год наблюдений – 6,44±1,62 гС/м². На 10Р 2,35±1,07 гС/м², 2,86±0,73 гС/м², 1,84±0,39 гС/м² за три года наблюдений соответственно. В статье [11] отмечается, что на вырубках ельника чернично-влажного и долгомошно-сфагнового в Республике Коми годовое поступление углерода с древесного опада на поверхность почвы составляло 15,2 и 17,6 гС/м² соответственно, что выше в несколько раз.

На вырубках ельников 15–20-летней давности [9] фитоценоз активно восстанавливается, поэтому количество углерода с древесного опада начинает возрастать и достигает 70 гС/м². Похожие результаты поступления углерода с дре-

весным опадом на вырубках ельников черничных 20-тилетней давности показаны в работе [30], где поступление углерода составило 77 гС/м².

Исходя из полученных результатов, можно сказать о том, что в фоновом хвойно-лиственном насаждении чернично-зеленомошного типа количество ежегодно поступающего древесного опада колеблется в зависимости от климатических условий. На вырубках поступление опада не связано с конкретным технологическим участком, но связано с открытым пространством вырубки, способствующим равномерному распространению отмерших растительных остатков. При этом на волоках наблюдается минимальное количество древесного опада из-за обеднения древесной растительности растений, тогда как на пасечных участках его запас несколько выше. Поступление углерода на поверхность почвы с древесным опадом напрямую зависит от его массы.

Таблица 4. Поступление углерода с древесным опадом на вырубке
Table 4. Carbon input from tree litter in a clear-cut area

Фракции	Поступление углерода, гС/м ² в год								
	Пасека			Волок			10Р ¹		
	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.	2021–2022 гг.	2022–2023 гг.	2023–2024 гг.
<i>Активные фракции, в т. ч.</i>	3,33±0,38	6,40±1,91	7,10±2,03	3,46±0,62	4,49±0,71	5,59±1,34	1,97±1,11	1,84±0,20	1,77±0,35
хвоя ели	0,76±0,28	0,33±0,17	0,08±0,05	0,42±0,11	0,55±0,24	0,10±0,03	0,23±0,05	0,81±0,15	0,18±0,07
хвоя сосны	0,44±0,16	0,44±0,20	0,20±0,05	0,53±0,12	0,63±0,14	0,59±0,15	0,17±0,07	0,15±0,06	0,03±0,01
листья берёзы	1,03±0,13	2,36±0,65	2,70±1,22	1,47±0,37	2,39±0,58	2,60±0,50	0,66±0,24	0,65±0,23	1,44±0,31
листья осины	0,83±0,39	1,07±0,31	3,75±1,52	0,39±0,14	0,12±0,08	0,88±0,31	0,92±0,92	0,17±0,17	0,04±0,03
листья рябины	0,16±0,10	0,75±0,75	–	0,01±0,01	0,05±0,05	–	–	–	–
листья ивы	0,11±0,11	0,02±0,02	0,07±0,07	0,27±0,27	0,08±0,05	0,20±0,14	–	–	0,05±0,05
листья шиповника	–	1,41±0,82	0,13±0,08	–	0,60±0,33	1,12±0,71	–	–	0,01±0,01
РОДР ²	–	0,02±0,01	0,18±0,08	0,08±0,05	0,08±0,04	0,09±0,03	–	0,05±0,05	0,02±0,01
<i>Неактивные фракции, в т. ч.</i>	0,35±0,12	1,87±1,80	0,33±0,13	1,13±0,26	0,76±0,32	0,51±0,27	0,20±0,03	0,66±0,39	0,03±0,02
кора	0,14±0,07	0,04±0,01	0,07±0,01	0,44±0,15	0,64±0,34	0,01±0,01	0,08±0,02	0,22±0,09	–
ветви	0,21±0,08	1,83±1,79	0,26±0,13	0,70±0,19	0,12±0,04	0,50±0,26	0,04±0,02	0,44±0,32	0,03±0,02
РО ³	0,26±0,05	0,51±0,08	0,94±0,40	0,24±0,04	0,41±0,05	0,35±0,11	0,18±0,08	0,37±0,17	0,04±0,02
<i>Всего</i>	4,08±0,37	8,77±3,10	8,54±2,34	4,83±0,85	5,67±0,65	6,44±1,62	2,35±1,07	2,86±0,73	1,84±0,39

Примечание: ¹10Р – волок, на котором проведено выравнивание и удаление подстилки; ²РОДР – репродуктивные органы древесных растений (почки, семена); ³РО – растительный остаток; ± – ошибка среднего; прочерк – данные отсутствуют.

Выводы

Выявлено, что в условно-фоновом хвойно-лиственном насаждении чернично-зеленомошного типа масса древесного опада в год составляет от 260,74 до 347,34 г/м², в котором преобладает активная фракция (75 %), состоящая из хвои и листьев древесных растений. На технологических участках вырубке этот параметр составил: в первый год 4,79–10,27 г/м², во второй год – 6,09–18,67 г/м², в третий год – 3,92–18,18 г/м². Наименьшая масса древесного опада была зафиксирована на выравненном волоке. На всех участках во все годы наблюдений преобладала активная фракция (70–97 %), состоящая из листьев мелколиственных деревьев.

После проведения сплошной рубки масса древесного опада сократилась в 14–66 раз за весь период наблюдений.

Установлено значительное уменьшение годового поступления углерода с древесного опада на поверхность почвы после сплошной рубки леса. В сравнении с фоновым хвойно-лиственным насаждением чернично-зеленомошного типа, это снижение составило от 14 до 70 раз. На пасечном участке показатели годового поступления углерода варьировались от 4,08 до 8,77 гС/м², на волоке – от 4,83 до 6,44 гС/м², а на участке 10Р – от 1,84 до 2,86 гС/м² за период с осени 2021 года по весну 2024 года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курганова И. Н., Кудеяров В. Н. Экосистемы России и глобальный бюджет углерода // Наука в России. 2012. № 5 (191). С. 25–32. EDN: PFRAGB
2. Osipov A. F., Bobkova K. S., Dymov A. A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional. 2021. Vol. 27. Art. e00427. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00427; EDN: TQVIZW
3. Демаков Ю. П., Симанова А. А. Распространение и производительность ельников в различных экотопах Республики Марий Эл // Научный диалог. 2013. № 3 (15). С. 26–42. EDN: PXQKOV
4. Курбанов Э. А. Моделирование бюджета углерода лесных насаждений на примере сосняков Поволжья // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2009. № 2. С. 7–15. EDN: MUCKWN
5. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils / P. Smith, M. F. Cotrufo, C. Rumpel et al. // Soil. 2015. Vol. 1, iss. 2. Pp. 665–685. DOI: 10.5194/soil-1-665-2015
6. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels / O. Chertov, A. Komarov, A. Loukianov et al. // Ecological Modelling. 2006. Vol. 194, iss. 1–3. Pp. 227–232. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.10.015
7. Сравнительная оценка скорости разложения растительного опада в еловых и сосновых лесах на северном пределе распространения / Е. А. Иванова, М. А. Данилова, В. Э. Смирнов и др. // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6, № 3. С. 92–122. DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132; EDN: WHOTJK
8. Растительный опад в коренном ельнике и лиственно-хвойных насаждениях / А. А. Дымов, К. С. Бобкова, В. В. Тужилкина и др. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2012. № 3 (327). С. 7–18. EDN: OZITPN
9. Пристова Т. А. Аккумуляция углерода в подстилках среднетаёжных лиственных лесов Республики Коми // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 2. С. 81–85. DOI: 10.55355/snvt2023122112; EDN: HEGAOM
10. Кузнецов М. А. Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаёжном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60. EDN: NBKODD
11. Лиханова Н. В., Бобкова К. С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 91–100. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100; EDN: QNTOOZ
12. Старцев В. В., Севергина Д. А., Дымов А. А. Динамика содержания водорастворимых форм углерода и азота почв в первые годы после сплошной рубки // Почвоведение. 2024. № 6. С. 797–812. DOI: 10.31857/S0032180X24060028; EDN: YCDBMV
13. Дымов А. А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. DOI: 10.34756/GEOS.2020.10.37828; EDN: WLXSUO
14. Лиханова Н. В. Роль растительного опада в формировании лесной подстилки на вырубках ельников средней тайги // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 52–66. EDN: SEEOIV
15. Чертовской В. Г. Долгомошные вырубки, их образование и облесение. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 136 с.
16. Осипов А. Ф., Кузнецов М. А., Бобкова К. С. Запасы и потоки углерода в хвойных экосистемах и на вырубках средней тайги // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая

продуктивность и дистанционный мониторинг. 2017. № 3. С. 105–112. EDN: YOKZTN

17. Кузнецов М. А., Осипов А. Ф. Растительный опад как компонент биологического круговорота углерода в заболоченных хвойных сообществах средней тайги // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 9. С. 10–12. EDN: VVEXMN

18. Атлас почв Республики Коми / Ред. Г. В. Добровольский, А. И. Таскаев, И. В. Забоева. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2010. 356 с. EDN: QLNHTN

19. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги / И. Н. Кутявин, А. В. Манов, В. В. Старцев и др. // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 123–132. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132; EDN: FCHCEN

20. Осипов А. Ф., Старцев В. В., Дымов А. А. Влияние сплошной рубки на эмиссию CO₂ с поверхности подзолистой почвы среднетаёжного хвойно-лиственного насаждения (Республика Коми) // Почвоведение. 2024. № 5. С. 728–737. DOI: 10.31857/S0032180X24050066; EDN: YLNPY

21. Физические свойства минеральных горизонтов почв вырубки (средняя тайга, Республика Коми) / С. А. Огородняя, М. А. Бутылкина, С. Р. Крайков и др. // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024. Т. 79, № 2. С. 15–25. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25; EDN: NUMGPK

22. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / А. П. Братцев и др.; Отв. ред. А. И. Таскаев. М.: Дрофа; Дик, 1997. 115 с.

23. Изменения почв и растительности при разном числе проездов колёсной лесозаготовительной

техники (средняя тайга, Республика Коми) / А. А. Дымов, В. В. Старцев, Н. М. Горбач и др. // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1426–1441. DOI: 10.31857/S0032180X22110028; EDN: ULGVOC

24. Carbon Pools and Fluxes in Mixed Coniferous-Small-Leaved Forests and Clearcut Areas / A. A. Dymov, A. F. Osipov, V. V. Startsev et al. // Eurasian Soil Science. 2024. Vol. 57, iss. 11. Pp. 1867–1878. DOI: 10.1134/S1064229324601847; EDN: GLFNIH

25. Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests / M. Portillo-Estrada, J. F. J. Korhonen, M. Pihlatie et al. // Annals of Forest Science. 2013. Vol. 70, iss. 4. Pp. 367–379. DOI: 10.1007/s13595-013-0273-0

26. Карпачевский Л. О. Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность, 1981. 264 с.

27. Бобкова К. С., Машика А. В., Смагин А. В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаёжных ельниках на автоморфных почвах: монография. СПб.: Наука, 2014. 270 с. EDN: TNBFNN

28. Бобкова К. С., Тужилкина В. В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах севера // Экология. 2001. № 1. С. 69–71.

29. Кошелева Ю. П., Трофимов С. Я. Особенности биохимического состава растительного опада разной степени разложения (по данным термического анализа) // Известия РАН. Серия Биологическая. 2008. № 1. С. 77–83. EDN: IBYSRV

30. Запасы фитомассы и органического углерода среднетаёжных ельников при восстановлении после сплошнолесосечной рубки / А. Ф. Осипов, В. В. Тужилкина, А. А. Дымов и др. // Известия РАН. Серия Биологическая. 2019. № 2. С. 215–224. DOI: 10.1134/S0002332919020103; EDN: YYEKLJ

Статья поступила в редакцию 15.01.2025; одобрена после рецензирования 06.02.2025; принята к публикации 28.02.2025

Информация об авторах

СЕВЕРГИНА Дарья Андреевна – аспирант, младший научный сотрудник отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – вырубки, микробиологические свойства. Автор 10 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3464-2744>; SPIN-код: 9380-5418

АРЗУБОВ Павел Андреевич – аспирант, Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина; старший лаборант отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – вырубки, дыхание почв, газообмен. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4941-3799>

ПАЮСОВА Ирина Владимировна – аспирант, старший лаборант отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – почвенное органическое вещество, гари, бензолполикарбоновые кислоты. Автор трёх научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7169-3727>; SPIN-код: 2672-0391

ОСИПОВ Андрей Фёдорович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – газообмен, вырубки. Автор 120 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>; SPIN-код: 9431-5624

ДЫМОВ Алексей Александрович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – лесное почвоведение, цикл углерода, бореальные леса. Автор 253 научных публикаций, в том числе 12 монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>; SPIN-код: 3678-3807

Вклад авторов:

Севергина Д.А. – выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Арзубов П.А. – выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Паюсова И.В. – выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Осипов А.Ф. – постановка цели и задач, разработка программы и методики, организация мониторинговых наблюдений, вычитка окончательного варианта рукописи.

Дымов А.А., – постановка цели и задач, разработка программы и методики, организация мониторинговых наблюдений, вычитка окончательного варианта рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*114.351

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.19>

EDN: FXPLTA

Assessing the Qualitative and Quantitative Composition of Tree Litter and its Role in Carbon Input in a Clearcut Area

D. A. Severgina¹, P. A. Arzubov^{1,2,✉}, I. V. Payusova¹, A. F. Osipov¹, A. A. Dymov¹

¹ Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, 167982, Russian Federation

² Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, 55, Oktyabrsky Prosp., Syktyvkar, 167001, Russian Federation
arzubov-2000@mail.ru ✉

Abstract. *Introduction.* In terrestrial ecosystems, the input of plant litter is a key link in the biogeochemical element cycling. The quality and composition of tree litter supplied to the soil surface is determined by the age and composition of the forest stand. To date, insufficient research attention has been given to changes in the functioning of taiga ecosystems in the case clear cutting is performed using specialized equipment, as well as to changes occurring during regeneration. This work *aims* to assess the quantitative and qualitative composition of litter in clear-cut areas of the middle taiga coniferous-deciduous stands of the Komi Republic at various technological sites and to estimate the carbon influx from litter to the soil surface. *Objects and methods.* The study was conducted on the territory of the Syktyvdinsky district of the Komi Republic. Tree litter was collected in late May in 2022–2024 and at the end of the 2021–2023 growing seasons after autumn leaf fall. Based on the analysis of data obtained, two groups of fractions were distinguished according to their decomposition rate: active fractions (leaves, needles, seeds) and inactive ones (branches, bark, cones). To convert the mass of plant organic matter of the ground litter into carbon stocks, coefficients specific to individual fractions in the studied region were used. *Results.* In different years, the tree litter mass at the background site was as follows: 347.34±15.64 g/m² in 2021–2022, 304.25±16.33 g/m² in 2022–2023, and 260.74±13.30 g/m² in 2023–2024. After clear-cutting in the middle taiga coniferous-deciduous stand, annual litter fall decreased 14–66 times over the entire observation period. In the background coniferous-deciduous stand, the amount of carbon input varied from 164.71±7.35 to 123.49±6.25 gC/m² during three years of observation. Removal of the tree layer through forest clear cutting resulted in a significant 14- to 70-fold reduction in carbon supply from tree litter to the soil surface.

Keywords: tree litter; carbon input; clear cutting; forest ecosystems

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-74-10007, <https://rscf.ru/project/23-74-10007/>

For citation: Severgina D. A., Arzubov P. A., Payusova I. V. et al. Assessing the Qualitative and Quantitative Composition of Tree Litter and its Role in Carbon Input in a Clearcut Area. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):19–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.19>; EDN: FXPLTA

REFERENCES

1. Kurganova I. N., Kudeyarov V. N. Ecosystems of Russia and global carbon budget. *Nauka v Rossii (Science in Russia)*. 2012;5(191):25–32. EDN: PFRAGB (In Russ.).
2. Osipov A. F., Bobkova K. S., Dymov A. A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional*. 2021;27:e00427. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00427; EDN: TQVIZW
3. Demakov Yu. P., Simanova A. A. Expansion and yield of spruce forests in various ecotopes of Mari El Republic. *Nauchnyi dialog (Scientific Dialogue)*. 2013;(3 (15)):26–42. EDN: PXQKOV (In Russ.).
4. Kurbanov E. A. Carbon budget simulation in forest stands based on example of Povolzhje pine forests. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2009;(2):7–15. EDN: MUCKWN (In Russ.).
5. Smith P., Cotrufo M. F., Rumpel C. et al. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil*. 2015;1(2):665–685. DOI: 10.5194/soil-1-665-2015
6. Chertov O., Komarov A., Loukianov A. et al. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels. *Ecological Modelling*. 2006;194(1-3):227–232. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.10.015
7. Ivanova E. A., Danilova M. A., Smirnov V. E. et al. Comparative assessment of the decomposition rate of plant litterfall in spruce and pine forests at the northern distribution limit. *Forest Science Issues*. 2023;6(3):92–122. DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132; EDN: WHOTJK (In Russ.).
8. Dymov A. A., Bobkova K. S., Tuzhilkina V. V. et al. Tree waste in an aboriginal spruce forest and mixed stands. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*; 2012;(3(327)):7–18. EDN: OZITPN (In Russ.).
9. Pristova T. A. Carbon stocks in the litter of the middle taiga deciduous forests of the Komi Republic. *Samara Journal of Science*. 2023;12(2):81–85. DOI: 10.55355/snv2023122112; EDN: HEGAOM (In Russ.).
10. Kuznetsov M. A. Effect of decomposition conditions and falloff composition on litter reserves and characteristics in a bilberry-sphagnum spruce forest of middle taiga. *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*. 2010;(6):54–60. EDN: NBKODD (In Russ.).
11. Likhanova N. V., Bobkova K. S. Pools and carbon fluxes in felling ecosystems spruce forests of the middle taiga of the Komi Republic. *Theoretical and Applied Ecology*. 2019;(2):91–100. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100; EDN: QNTOOZ (In Russ.).
12. Startsev V. V., Severgina D. A., Dymov A. A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting. *Eurasian Soil Science*. 2024;(6):797–812. DOI: 10.31857/S0032180X24060028; EDN: YCDBMV (In Russ.).
13. Dymov A. A. Soil successions at boreal forests of the Komi Republic. Moscow, GEOS Publ.; 2020. 336 p. DOI: 10.34756/GEOS.2020.10.37828; EDN: WLXSUO (In Russ.).
14. Likhanova N. V. The role of tree waste in the litter layer formation in cutting areas of middle taiga spruce forests. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2014;(3(339)):52–66. EDN: SEEOIV (In Russ.).
15. Chertovskoy V. G. Cutting areas in haircap-moss forests, their formation and afforestation. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1963. 136 p. (In Russ.).
16. Osipov A. F., Kuznetsov M. A., Bobkova K. S. Carbon stocks and flows in coniferous ecosystems and clearings of the middle taiga. *Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring*. 2017;(3):105–112. EDN: YOKZTN (In Russ.).
17. Kuznetsov M. A., Osipov A. F. Plant litter as a component of the biological carbon cycle of wet coniferous communities in the middle taiga. *Vestnik of the Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2011;(9):10–12. EDN: VVEXMN (In Russ.).
18. Soil atlas of the Komi Republic. Dobrovolsky G. V., Taskaev A. I., Zaboeva I. V. (Eds.). Syktyvkar, Komi Republic Publishing House; 2010. 356 p. EDN: QLNHTN (In Russ.).
19. Kutyavin I. N., Manov A. V., Starcev V. V. et al. The logging equipment effect on the dynamics of natural reforestation of after cutting mixed coniferous-deciduous stand in the middle taiga. *Theoretical and Applied Ecology*. 2024;(3):123–132. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132; EDN: FCHCEN (In Russ.).
20. Osipov A. F., Startsev V. V., Dymov A. A. Influence of clear felling on CO₂ emission from the podzolic soil surface of the coniferous-deciduous forest (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science*. 2024;(5):728–737. DOI: 10.31857/S0032180X24050066; EDN: YLINPY (In Russ.).
21. Ogorodnyaya S. A., Butylkina M. A., Krasikov S. R. et al. Physical properties of upper mineral horizons of cutting area (Middle Taiga, Komi Republic). *Lomonosov Soil Science Journal*. 2024;79(2):15–25. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25 (In Russ.).
22. Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology. Bratsev A. A., Bratsev A. P. (Map eds.), Taskaev A. I. (Ed.). Moscow, DiK, Drofa Publ.; 1997. 116 p. (In Russ.).

23. Dymov A. A., Startsev V. V., Gorbach N. M. et al. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science*. 2022;(11): 1633–1646. DOI: 10.31857/S0032180X22110028; EDN: ULGVOC (In Russ.).

24. Dymov A. A., Osipov A. F., Startsev V. V. et al. Carbon pools and fluxes in mixed coniferous–small-leaved forests and clearcut areas. *Eurasian Soil Science*. 2024;57(11):1867–1878. DOI: 10.1134/S1064229324601847; EDN: GLFNIIH

25. Portillo-Estrada M., Korhonen J. F. J., Pihlatie M. et al. Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests. *Annals of Forest Science*. 2013;70(4):367–379. DOI: 10.1007/s13595-013-0273-0

26. Karpachevskiy L. O. Forest and forest soils. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1981. 264 p. (In Russ.).

27. Bobkova K. S., Mashika A. V., Smagin A. V. Dynamics of carbon organic matter content of spruce forests in middle taiga growing on automorphic soils. *Monograph*. St. Petersburg, Nauka; 2014. 270 p. EDN: TNBFNN (In Russ.).

28. Bobkova K. S., Tuzhilkina V. V. Carbon concentrations and caloric value of organic matter in northern forest ecosystems. *Ecology*. 2001;(1):69–71. (In Russ.).

29. Kosheleva Yu. P., Trofimov S. Ya. Characteristics of the biochemical composition of plant litter at different stages of decomposition (according to thermal analysis data). *Izvestiya Akademii nauk. Seriya biologicheskaya*. 2008;(1):77–83. EDN: IBYSRV (In Russ.).

30. Osipov A. F., Tuzhilkina V. V., Dymov A. A. et al. Phytomass and organic carbon stocks in the middle taiga spruce forests during restoration after clear cutting. *Biology Bulletin*. 2019; (2): 215–224. DOI: 10.1134/S0002332919020103; EDN: YYEKLJ (In Russ.).

The article was submitted 15.01.2025; approved after reviewing 06.02.2025; accepted for publication 28.02.2025

Information about the authors

Darya A. Severgina – postgraduate student, Junior Researcher at the Soil Science Department, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS). Research interests – cuttings, soil respiration, gas exchange. Author of 10 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3464-2744>; SPIN: 9380-5418

Pavel A. Arzubov – postgraduate student, Pitirim Sorokin Syktyvkar State University; Senior Laboratory Assistant at the Soil Science Department, IB FRC Komi SC UB RAS. Research interests – cuttings, soil respiration, gas exchange. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4941-3799>

Irina V. Payusova – postgraduate student and Senior Laboratory Assistant at the Soil Science Department, IB FRC Komi SC UB RAS. Research interests – soil organic matter, burnt areas, benzene polycarboxylic acids. Author of three scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7169-3727>; SPIN: 2672-0391

Andrey F. Osipov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Department of Forest Biological Problems of the North, IB FRC Komi SC UB RAS. Research interests – gas exchange, cuttings. Author of 120 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>; SPIN: 9431-5624

Alexey A. Dymov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Soil Science Department, IB FRC Komi SC UB RAS. Research interests – forest soil science, carbon cycle, boreal forests. Author of 253 scientific publications, including 12 monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>; SPIN: 9431-5624

Contribution of the authors:

Severgina D.A. – carrying out experimental work, writing and preparing the article.

Arzubov P.A. – carrying out experimental work, writing and preparing the article.

Payusova I.V. – carrying out experimental work, writing and preparing the article.

Osipov A.F. – setting the research goal and objectives, developing the program and methodology, organizing monitoring observations, collecting litter, revising the final version of the manuscript.

Dymov A.A. – setting the research goal and objectives, developing the program and methodology, organizing monitoring observations, revising the final version of the manuscript.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630*58:528.8

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.33>

EDN: HCHNEU

Пространственный анализ ограничений сплошных рубок леса на водосборных бассейнах с использованием материалов дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий

А. Ю. Боровлёв[✉], В. В. Елсаков

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
Российская Федерация, 167000, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
borovlev.a.yu@ib.komisc.ru[✉]

Аннотация. *Введение.* Лесозаготовительная деятельность существенно влияет на важнейшие функции лесных экосистем. Интенсификация лесного хозяйства подразумевает не только увеличение объёмов заготовки леса, но и обоснованное планирование, контроль реализуемой деятельности по восстановлению участков рубок. Реализация таких мероприятий основывается на учёте ландшафтно-экологических особенностей территории, на которой происходит хозяйственная деятельность. Минимизация негативного воздействия рубок леса на экосистемы учтена в Лесном кодексе, в стандартах лесопользования независимых систем добровольной лесной сертификации. *Цель* исследований – разработка и анализ применимости отдельных параметров оценки состояния лесозаготавливаемых участков в ранжировании рисков, возникающих при заготовке древесины. *Объекты и методы.* Основное внимание уделено количественным показателям, которые можно обрабатывать методами статистического анализа. Набор предложенных величин опирается на использование геоинформационных методов, данных дистанционного зондирования Земли, инструментов пространственного анализа. На примере анализа пространственных данных активно осваиваемых лесных территорий бассейнов рек Большая Визинга, Кобра, Лопью, Нившера, Низьма Республики Коми предложены дополнительные критерии мониторинга и оценки возможных рисков, возникающих в процессе рубки леса. *Результаты.* В соответствии с целью выделены следующие критерии оценки состояния лесозаготавливаемых участков: 1) локализация рубок в сети охраняемых участков; 2) площади сплошных рубок; 3) наличие малонарушенных лесных территорий вблизи планируемого участка промышленного освоения; 4) мозаичность лесной среды; 5) показатель сохранения водорегулирующей функции лесов. Все измеряемые параметры территориально привязаны к естественным ландшафтными контурам, включённым в единый водосборный бассейн. *Выводы.* Все вышеуказанные критерии могут быть использованы в качестве дополнительной оценки участков лесохозяйственной деятельности, мониторинге освоения территорий, а также при ландшафтно-экологическом планировании. Критерии тесно связаны с требованиями добровольной лесной сертификации и позволяют минимизировать негативное воздействие на экологические функции лесных ландшафтов при интенсификации лесного хозяйства.

Ключевые слова: устойчивое лесопользование; добровольная лесная сертификация; ГИС-анализ; сплошная рубка; ландшафтно-гидрологический подход

Финансирование: статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках реализуемого на базе НИУ «Высшая школа экономики» проекта № 24-68-00055 «Из прошлого в будущее: сельские сообщества в условиях постаграрного вектора трансформаций».

Для цитирования: Боровлёв А. Ю., Елсаков В. В. Пространственный анализ ограничений сплошных рубок леса на водосборных бассейнах с использованием материалов дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 33–45. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.33>; EDN: HCHNEU

Введение

Если рассматривать процесс рубки леса как фактор антропогенного преобразования ландшафта, общее негативное воздействие можно классифицировать по тем функциям, на которые оказывается наиболее сильное влияние: средообразующая (или сохранение биоразнообразия), водорегулирующая и почвозащитная [1]. Для снижения экологических последствий лесохозяйственной деятельности на всех этапах – начиная от планирования рубки во время отвода участка и заканчивая рекультивационными работами в последующие годы после промышленного освоения, разработаны стандарты лесопользования, которые включают в себя наборы различных характеристик. Фундаментальной основой для использования таких параметров служат как признанные схемы сертификации (*FSC* и *PEFC*), так и введенная в 2022 году в России добровольная лесная сертификация «Лесной эталон»¹. Вышеуказанные системы контроля за поддержанием устойчивого лесного хозяйства обязывают проводить как внутренние (силами самого предприятия), так и внешние (со стороны контролирующих органов) аудиты. Сопутствующие рекомендации для разработки стратегического и тактического планов по управлению биоразнообразием требуют комплексного подхода в оценке антропогенной и естественной динамик ландшафта. Измеряемые показатели для такого анализа законодательно не определены.

Целью настоящего исследования является разработка и анализ применимости отдельных параметров оценки состояния лесозэксплуатируемых участков в ранжировании рисков и ограничений, возникающих в процессе сплошных рубок леса. В случае успешного выбора показателей возможна дальнейшая интеграция мето-

дики в процессы внутренних и внешних аудитов лесной сертификации. Под рисками, в данном случае, понимаются как нарушения лесного законодательства (сплошные рубки в защитных лесах и на охраняемых участках), так и негативное влияние лесохозяйственной деятельности на компоненты ландшафта. Параметры могут быть систематизированы по нескольким свойствам: во-первых, по возможности осуществления контроля исполнения регламентирующих требований с привлечением геоинформационных систем пространственных данных и ГИС-анализа; во-вторых, возможностью количественной оценки интенсивности воздействия (анализ площадей, концентрации рубок и т. д.). Поскольку площадь как количественная характеристика оценивается методом геоанализа, возникает необходимость представить показатель как массив геоданных, включающих сопутствующую информацию:

- отсутствие сплошных вырубок в сети охраняемых участков;
- вырубки на малонарушенных лесных территориях;
- сохранение мозаичности лесной среды;
- поддержание водорегулирующей функции на уровне водосборного бассейна.

Границы арендуемых лесных участков предприятий чаще всего привязаны к искусственному разделению территории (административные районы, участковые лесничества, квартальная сеть), поэтому наиболее приемлемой единицей анализа при территориальной оценке ландшафтов является водосборный бассейн.

Объекты и методы исследования

Материалами для геоаналитических исследований выступали открытые данные о заготовке леса на территории (лесохозяйственные регламенты, современная съёмка спутников *Landsat* и *Sentinel*, информация о ежегодных лесных потерях, полученная в рамках проекта *Global Forest Watch* [2], а также прочая доступная информация в формате геоданных).

¹ Система добровольной лесной сертификации «Лесной эталон» // [Собственные стандарты системы «Лесной эталон»]. URL: <https://forest-etalon.org/documents> (дата обращения: 10.10.2024).

Обработку данных проводили на основе свободно распространяемого программного обеспечения (*QuantumGIS*). В качестве модельного региона выбрана центральная часть Республики Коми, где характерна интенсивная заготовка древесины. Как было описано выше, территориальный анализ опирается на ландшафтно-гидрологический подход, поэтому в качестве географической основы была выбрана сеть водосборных бассейнов рек региона. Границами охвата стали реки Пинега (верхнее и среднее течение), Юг (нижнее течение), Молома (нижнее и среднее течение), Вятка (нижнее и среднее течение), Кама (среднее течение) и Вишера (рис. 1). Ландшафтной единицей анализа обозначен водосборный бассейн, ограниченный либо водораздельными линиями, либо берегами рек. Для территории был подготовлен векторный слой с контурами водосборных бассейнов на основе информации, представленной

в топографических картах масштаба 1:1 000 000 и цифровой модели рельефа *SRTM 90* (открытый источник данных www.viewfinderpanoramas.org) [3]. Подготовленная географическая основа позволяет выбрать модельные водосборные бассейны реки, в рамках которых осуществлялась разработка методики по определению измеряемых параметров оценки рисков в результате сплошных рубок. Создание контуров водосборных бассейнов крупных рек (на рис.1 – пронумерованы) состояло из двух этапов – ручная оцифровка топографических карт, а также автоматическое формирование границ в программе *SAGA GIS 9.5.1*. Векторный слой ручной оцифровки использовался для проверки качества итоговых данных автоматической обработки цифровой модели рельефа, в первую очередь – для редактирования ошибочных контуров, возникающих из-за артефактов растровой модели *SRTM 90*.

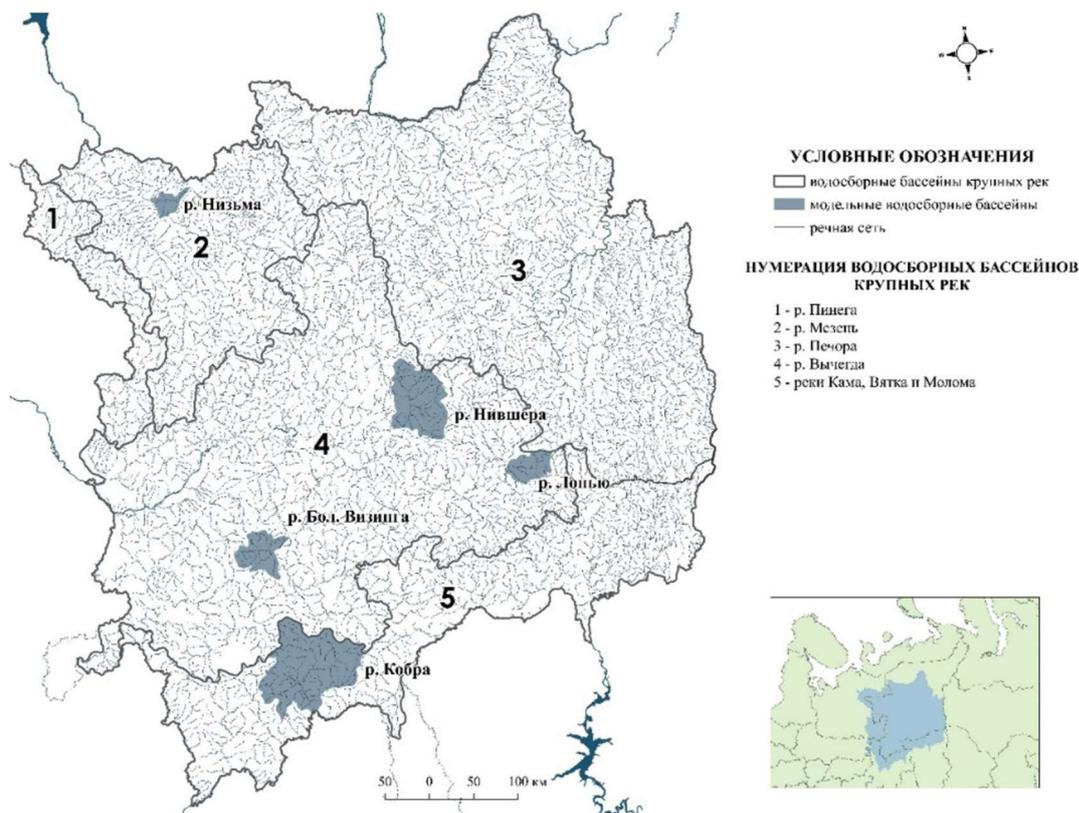


Рис. 1. Выделенная зона исследования на основе водосборных бассейнов крупных рек, а также модельные водосборные бассейны

Fig. 1. Designated research area based on the catchment basins of large rivers, as well as model catchment basins

Следующий этап заключался в выделении модельных водосборов – определении меньших по площади участков, для территории которых будет произведён более детальный анализ. Модельные бассейны притоков крупных рек подбирались по критериям:

- водосборный бассейн реки имел протяжённость более 50 км;
- участки имели различные по степени освоения территории (активное пионерное освоение, рубки «советского» периода, наличие давно освоенных участков, включая земли с/х назначения);
- наличие лесов высокой природоохранной ценности (малонарушенные лесные территории, ключевые орнитологические территории, девственные леса, водоохранные полосы лесов и т. д.);
- присутствие масштабных концентрированных рубок последних лет;
- различия географического положения.

Для проведения исследований экспертным путём отобраны модельные водосборные бассейны рек: Низьма (приток Мезени первого порядка), Большая Визинга (приток Вычегды второго порядка), Лопью и Нившера (притоки Вычегды первого порядка), Кобра (приток Вятки первого порядка). Дополнительно каждый из отобранных водосборных бассейнов был сегментирован по границам водосборных площадей притоков первого порядка (элементарные водосборные бассейны) [4].

Последующий анализ отдельных параметров оценки состояния лесоэксплуатируемых участков (расчёт площадей лесосек, выявление сплошных рубок в сети охраняемых участков и малонарушенных лесов, а также оценка мозаичности) требовал использование мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли. В первую очередь, использовались открытые данные проекта *Global Forest Watch* [2]. Это растровые модели, позволяющие оценить лесные потери различной природы (пожары, ветровалы, сплошная рубка леса) за период с 2000 го-

да. Преобразование данных в векторный формат определяет возможность получения площадной информации о ежегодных потерях лесных экосистем. Параметр мозаичности водосборного бассейна подразумевал классификацию территории по типам ландшафтов. Для этого обрабатывались мультиспектральные космоснимки платформ Landsat 8 и Sentinel 2A периода 2022–2023 гг. Даты спутниковых изображений охватывали вегетационный сезон с июня по сентябрь, когда существовала возможность осуществить классификацию земель. Для работы использовалась комбинация каналов видимого красного, зелёного и ближнего инфракрасного диапазонов электромагнитного излучения.

Анализ показателя «отсутствие сплошных рубок в сети охраняемых участков»

Согласно п. 2 Статьи 111 Лесного Кодекса РФ выделяются следующие категории защитных лесов: леса, расположенные на особо охраняемых природных территориях; леса, расположенные в водоохраных зонах; леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов; ценные леса; городские леса². Эти леса играют важную роль в поддержании экосистемных функций. Проведение сплошных рубок в защитных лесах допускается при строительстве, реконструкции, эксплуатации объектов, не связанных с лесной инфраструктурой и в случаях, если выборочные рубки не обеспечивают замену лесных насаждений, утрачивающих свои средообразующие, водоохранные, санитарно-гигиенические, оздоровительные и иные полезные функции, на лесные насаждения, обеспечивающие сохранение целевого назначения защитных лесов и выполняемых ими по-

² Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 29.12.2022). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/507ec1491677c2ce1db9eb350e0147e5fa9e8ba7/ (дата обращения: 19.03.2023).

лезных функций, если иное не установлено настоящим Кодексом³.

Оценка параметра связана с выявлением наличия сплошных концентрированных вырубок в сети охраняемых участков. Процедура реализуема в рамках проведения пространственного анализа. Входными данными являются границы защитных лесов и контура лесосек. Для получения информации о наличии защитных лесов на исследуемой территории можно использовать регламенты лесничеств региона, часто представленные отсканированными картами. Для корректного использования необходима пространственная привязка материалов растровых данных в картографической системе координат. В основе процесса пространственной привязки лежит использование имеющихся данных с существующей географической привязкой к местности (целевые данные). Это могут быть как базовые карты, WMS-слои, космоснимки, а также географически «привязанные» векторные объекты. В качестве идентификаторов местоположений могут использоваться визуально дешифрируемые объекты – пересечения дорог или водотоков, устья рек, обнажения горных пород, углы улиц или площадей, пересечения лесозащитных полос. В рамках исследования применялась полиномиальная трансформация. Она использует построение полинома на основе опорных точек и алгоритм подбора методом наименьших квадратов (*LSF*) [5]. После пространственной привязки контуры сети охраняемых участков были оцифрованы и переведены в векторный формат. Следующий этап – анализ сплошных вырубок.

³ О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования правового регулирования отношений, связанных с обеспечением сохранения лесов на землях лесного фонда и землях иных категорий: Федеральный закон от 27.12.2018 № 538-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314666/ (дата обращения: 19.03.2023).

Количественные данные о сплошных рубках

Показатели можно получить посредством как ручной оцифровки, так и автоматической классификации данных космосъёмки. Существуют и готовые данные, позволяющие упростить методику и уменьшить затраченное время на создание ГИС-слоёв. В рамках исследования площади вырубок были получены из материалов, разработанных проектом *Global Forest Watch* [2]. Растровые геоданные содержат информацию о лесных потерях с 2000 по 2024 гг.

Перед этапом оценки критерия подготовленные растры были переведены в векторный формат и проведена их экспертная оценка, позволившая убрать погрешности (например, артефакты анализа) и классифицировать лесные потери на три категории: рубки, пожары и прочие потери (ветровалы, окна вывала) (рис. 2, б). Поскольку параметр заключается в выявлении сплошных вырубок на территориях сети охраняемых участков, прочие лесные потери были удалены из анализа. Статистические данные были получены геометрическим пересечением векторных слоёв сети охраняемых участков и лесных потерь в результате рубок леса. На территории модельных бассейнов доля охраняемых участков составила: р. Большая Визинга – 5,8; р. Лопью – 1,2; р. Нившера – 13,2; р. Низьма – 24,1; р. Кобра – 20,2 %.

Единственным модельным водосборным бассейном, на территории которого были выявлены крупные по площади массивы сплошных рубок на сети охраняемых участков, оказался бассейн р. Нившера (рис. 2, а). Вырубки на территории комплексного заказника «Сывьюдорский» датируются 2002–2004 гг. Значительная часть заказника не выполняет функцию обеспечения охраны ненарушенных лесов, и в связи с этим ставится вопрос о целесообразности функционирования особо охраняемой природной территории.

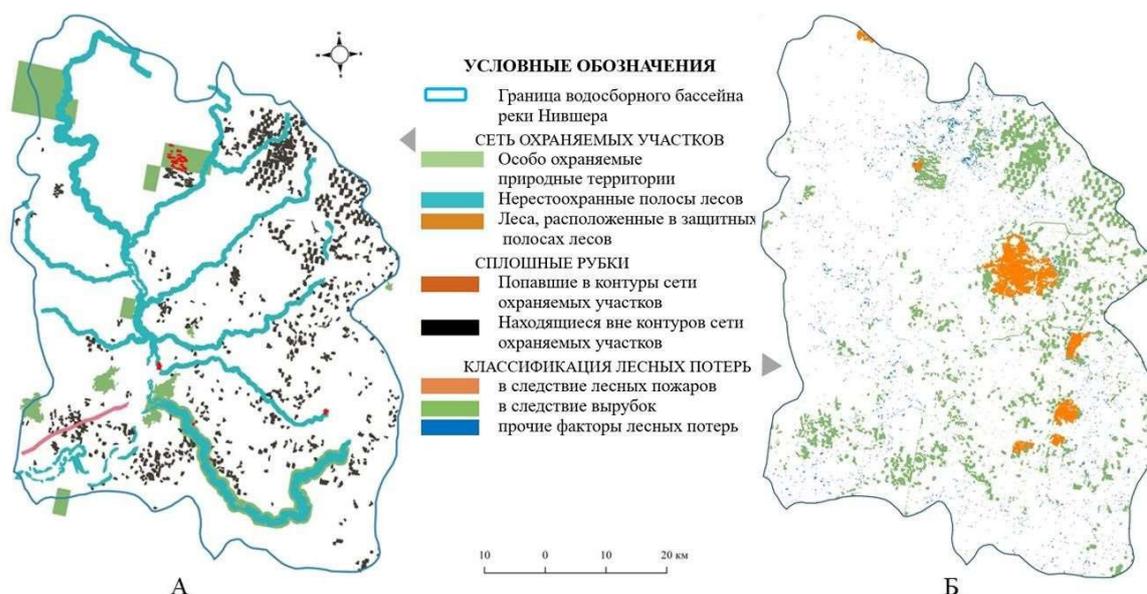


Рис. 2. Классификация рубок леса на сети охраняемых участков (А) и выявленные существующие лесные потери 2001–2021 гг. (Б) на территории модельного водосборного бассейна реки Нившера
 Fig. 2. Classification of logging on a network of protected areas (A) and identified existing forest losses in 2001–2021 (B) on the territory of the model catchment area of the Nivshera River

Показатель площади сплошных рубок на малонарушенных лесных территориях

Цель параметра заключается в количественном анализе первичного освоения лесных территорий. В рамках исследования геоданные о малонарушенных лесах взяты

из Атласа малонарушенных лесных территорий [6] (рис. 3). Количественные данные вырубленных территорий использовались те же, что и для предыдущего критерия. Совокупность данных позволила вычислить долю освоенных первичных лесов на территории элементарных водосборов (табл. 1).

Рис. 3. Карта-схема расположения малонарушенных лесных территорий в рамках выделенной зоны исследования (сост. автором на основе [6, с. 40])
 Fig. 3. The map of the location of intact forest areas within the designated research area (compiled by the author on the basis of [6, с. 40])

Таблица 1. Критерий освоения первичных лесов (малонарушенных лесных территорий) модельных водосборных бассейнов

Table 1. The criterion for the development of primary forests (intact forest areas) of model catchment areas

Модельный водосбор	Площадь, тыс. га	Доля малонарушенных лесов, %	Доля вырубок в первичных лесах, %
р. Большая Визинга	189,4	1,5	30,5
р. Лопью	134,9	2,1	–
р. Нившера	428,4	7,9	6,6
р. Низьма	68,6	96,3	3,9
р. Кобра	778,2	11,2	6,5

Показатель поддержания мозаичности лесной среды

Лесные экосистемы обладают выраженной структурированностью и сильной неоднородностью – пространственной мозаикой, состоящей из разрозненных в пространстве групп растений [7]. Единицей этой системы является совокупность деревьев, произрастающих на определённом участке. Согласно требованиям систем лесной сертификации, при сплошных рубках площадью более 10 га должен сохраняться мозаичный ландшафт в виде ветроустойчивых полос и куртин леса, а также ключевых местообитаний (биотопов). Также для поддержания мозаичности лесной экосистемы сама концентрация сплошных вырубок должна опираться на ландшафтные особенности территории. На этапе разработки методик оценки этого критерия автоматический анализ для мозаичности лесной среды вызвал ряд затруднений. В первую очередь, это связано с тем, что выявление, насколько учитывается мозаичность ландшафта при лесохозяйственной деятельности, опирается на экспертный подход и определяется путём ручной проверки входных данных. Дополнительно к этому нельзя исключать фактор подготовленности специалиста – два исполнителя могут оценить выполнение критерия на одинаковую территорию по-разному.

Первый этап разработки алгоритма анализа данного параметра включал в себя классификацию ландшафтов исследуемой территории. Анализ сохранения мозаичности территории опирается на систему поддержания природных ценностей –

совокупность мероприятий, обеспечивающих устойчивость экологических свойств леса в долговременной перспективе, в ходе ведения лесного хозяйства на управляемом лесном участке. В рамках исследования было принято решение унифицировать разнообразие ландшафтов, отталкиваясь от механизмов воздействия на лесные экосистемы. За основу классификации взята пирогенная динамика, дополненная антропогенным воздействием [3, 8]. Пожарная динамика лесов связана с периодическим полным или частичным выгоранием участка леса в результате пожара (возникшего в результате естественных или антропогенных причин). На разных территориях, в силу особенностей экосистемы, частота и характер пожаров и последующая сукцессия различны, что формирует своеобразную «мозаику» лесов (рис. 4). Территории модельных водосборов были разделены на следующие категории:

– территории, связанные с водными объектами. В класс входят как непосредственно все водные объекты (реки и озёра), болота, поймы, а также участки экосистем, приуроченные к переувлажнённым местообитаниям (например, приречейные или травяно-болотные типы леса, ельник-лог – территории соответствуют еловой беспожарной динамике);

– преобразованные территории. Территории, на которых не происходит сукцессионных изменений в результате антропогенеза (населённые пункты, используемые сельскохозяйственные земли);

– боровые террасы (сосновая пожарная динамика). Тип территории соответ-

ствует сосновой пожарной динамике и характерен для сосняков лишайниковых, брусничных и черничных, расположенных на борových речных террасах с песчаными почвами;

– смешанные леса (динамика со сменной пород). В класс входят оставшиеся типы пирогенных динамик – сосново-еловая, елово-лиственнная, а также – вырубки. Данные территории характеризуются смешанным хвойным и листвен-

ным древостоем, на них отмечен процесс лесовосстановления.

Классификация ландшафтных единиц осуществлялась экспертной оценкой на основе мультиспектральных данных космосъёмки *Sentinel 2A* с пространственным разрешением в 10 метров. После классификации территории модельных водосборных бассейнов был осуществлён расчёт доли площадей вырубок в каждом из типов ландшафтов (табл. 2).

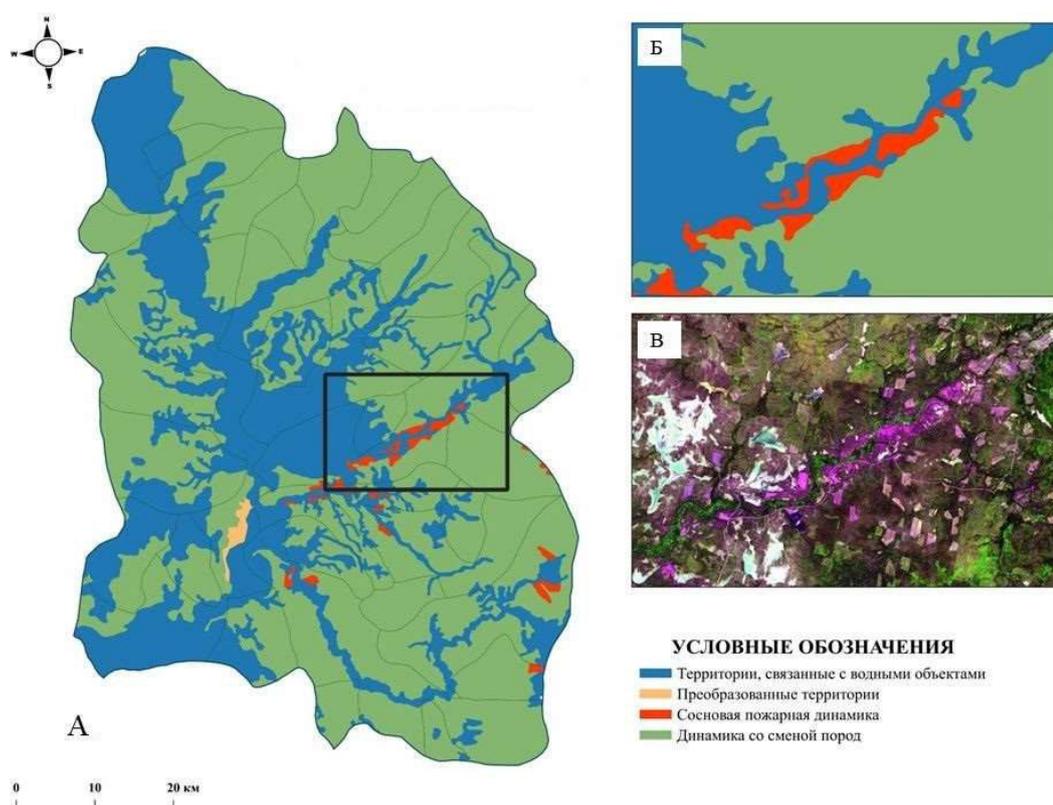


Рис. 4. Карта-схема классификации ландшафтов модельного водосбора реки Нившера (А – типы ландшафтов на территории, Б – выноска участка бассейна, В – космоснимок Sentinel 2A 2023 года на участок работ)

Fig. 4. The map of the classification of landscapes of the model catchment area of the Nivshera River (A – types of landscapes on the territory of the watershed, B – a callout of the basin area, C – a Sentinel 2A 2023 satellite image of the work site)

Таблица 2. Доля вырубок в каждом типе ландшафта модельных водосборных бассейнов (%)
Table 2. The proportion of deforestation in each type of landscape of the model catchment areas (%)

Тип ландшафта	р. Низьма	р. Лопью	р. Нившера	р. Большая Визинга	р. Кобра
Территории, связанные с водными объектами	0,2	0,1	0,4	0,0	0,0
Преобразованные территории	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Борových террасы	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
Смешанные леса	3,6	3,7	4,4	15,9	6,3
Суммарная доля рубок	3,8	4,1	4,8	15,9	6,3

Для второго этапа оценки мозаичности рубок была спроектирована полуавтоматическая методика. Алгоритм её реализации состоит из построения регулярной сети квадратов площадью 25 га (квадрат со стороной 500 метров). После формирования сетки в виде ГИС-слоя осуществляется векторный анализ взаимного расположения квадратов и слоя вырубок. Таким образом, в результате генерализации пространственных данных каждому квадрату присваивается значение доли рубок в каждом квадрате – 0; 25; 50; 75 и 100 %. Чем выше доля вырубок в квадратах и чем больше группа взаимно соприкасающихся квадратов, тем меньше вероятность сохранения мозаичности.

Показатель поддержания водорегулирующей функции на уровне водосборного бассейна

Влиянию сплошных рубок на гидрологический режим рек и территорий посвящено немало научных публикаций [1, 9, 10]. В результате механизированных сплошных рубок происходит ухудшение водно-физических свойств лесных почв, снижается их инфильтрационная способность, увеличивается поверхностный сток и, соответственно, усиливается эрозия почвы. На техногенно нарушенных участках вырубок, общая доля которых может достигать 30 % площади лесосеки, изменяются структура и физические свойства лесных почв, снижается их плодородие, вследствие этого происходит задержка лесовосстановительных процессов, снижается продуктивность вторичных древостоев [9]. Аналитическая оценка данного критерия заключается в вычислении доли площади вырубок на модельных водосборах. В рамках исследования количественный показатель водорегулирующей функции лесов подразумевал дробное деление модельного водосборного бассейна на элементарные водосборные бассейны. Согласно исследованиям [11, 12], при концентрации вырубок, занимающих более 50 % площади элементарного водосбора, происходит существенное изменение как

гидрологических характеристик водного объекта, так и водорегулирующей функции лесов в целом. В табл. 3 приведены расчёты доли сплошных вырубок на элементарных водосборах реки Большая Визинга. Основная роль параметра – выявить наиболее уязвимые с точки зрения дальнейшего освоения территории и осуществить более грамотное ландшафтно-экологическое планирование процесса заготовки древесины.

Таблица 3. Критерий поддержания водорегулирующей функции на примере модельного водосборного бассейна р. Большая Визинга (Жирным шрифтом выделены элементарные бассейны с наибольшей долей площадей вырубок*)

Table 3. Criterion of maintaining the water-regulating function on the example of a model catchment area of the Bolshaya Vizinga River. (Elementary basins with the largest proportion of cut areas are highlighted in bold*)

№ _{эв}	S _{басс} , тыс. га	S _{выр} , тыс. га	Доля вырубок, %
1	3,74	0,52	13,9
2	32,43	6,08	18,7
3	19,36	2,74	14,2
4	4,78	2,06	43,1
5	9,63	1,31	13,6
6	9,32	2,13	22,9
7	3,87	0,51	13,1
8	10,66	0,74	6,9
9	4,74	1,49	31,4
10	4,18	1,20	28,7
11	57,68	7,38	12,8
12	12,55	1,60	12,7
13	16,50	2,37	14,4
Итого	189,44	30,12	15,9

Примечание: *№_{эв} – порядковый номер элементарного водосбора в модельном водосборе; S_{басс} – площадь элементарного водосбора (в гектарах); S_{выр} – площадь вырубок в элементарном водосборе (в гектарах); доля – процентное соотношение вырубок от площади элементарного водосбора.

Результаты и их обсуждение

В результате проведённых исследований был выделен ряд критериев оценки рисков лесопользования на основе материалов дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий.

Подходы, используемые в работе, позволили создать набор пространствен-

ных данных, необходимых для анализа расположения и количества сплошных рубок на участках, требующих особого внимания при заготовке древесины.

В первую очередь, привязка и оцифровка лесохозяйственных регламентов, а также получение данных о лесных потерях и последующая обработка этой информации в ГИС является универсальным инструментом при мониторинге и выявлении сплошных рубок в сети охраняемых участков. Более того, включение в анализ контуров малонарушенных лесных территорий играет ключевую роль при внешней оценке деятельности предприятия в рамках систем сертификации лесопользования. Согласно стандартам добровольной лесной сертификации, предприятие должно поддерживать и/или улучшать малонарушенные лесные территории (как и другие высокие природоохранные ценности). В процессе принятия решений необходимо провести ландшафтно-экологическое планирование территории, которое позволит минимизировать воздействие на уязвимые экосистемы и первичные леса.

Классификация мультиспектральных спутниковых данных позволяет выделить различные типы ландшафтов на водосборе, необходимые для анализа мозаичности. Данный измеряемый показатель важен с точки зрения дальнейшего планирования лесохозяйственной деятельности – он позволяет учесть существующие нарушения мозаичности и минимизировать негативные риски, связанные с антропогенным воздействием на лесные экосистемы.

Выводы

Таким образом, в рамках исследования осуществлена попытка разработки подходов пространственного анализа для последующей оценки и минимизации последствий сплошных рубок леса на экологические характеристики ландшафтов. Набор выделенных параметров не является закрытым – при ландшафтно-экологическом планировании хозяйственной деятельности можно увеличивать

количество показателей. Например, оценивать площади деградировавших лесов после пожаров (характерно для территорий Сибири) или выявлять вырубки в редких экосистемах и биологически ценных лесах. Однако вышеуказанный список критериев является основным при оценке возникающих рисков. Нами выделены следующие базовые показатели:

Параметр оценки отсутствия сплошных рубок в сети охраняемых участков показателен в рамках внешних и внутренних аудитов. При ГИС-оценке действий предприятия на арендуемом лесном участке возможно оперативное выявление нарушений и их последующий анализ.

Параметр оценки рубок в первичных лесах (на малонарушенных лесных территориях) важен с точки зрения сохранения малонарушенных лесных территорий. Безусловно, промышленное освоение на таких территориях уменьшает саму площадь первичных лесов и параметр оценки позволяет анализировать количественные характеристики ландшафтов, а также выявлять нарушения на участке.

Параметр оценки поддержания мозаичности лесной среды важен с точки зрения грамотного планирования освоения с учётом уязвимости экосистемы. Унифицированная классификация типов ландшафтов позволяет рассмотреть количественные характеристики – доли площадей рубок в каждом ландшафте. При оценке лесохозяйственной деятельности важно использовать методики ландшафтно-экологического планирования для минимизации нарушения экосистемных функций. Дополнительным инструментом в анализе того, насколько сохраняется мозаичность, является возможность использования регулярных сетей и визуализации плотности расположения лесосек на ландшафте.

Параметр оценки поддержания водорегулирующей функции лесов на уровне водосборного бассейна служит индикатором возможных гидрологических изменений, связанных с концентрацией рубок

на элементарном водосборе. Данный критерий позволяет осуществить анализ антропогенного воздействия на модельный водосбор и разработать более грамотное ландшафтно-экологическое планирование рубок леса с учётом сохранения функций лесов на гидрологический режим.

Мониторинг использования природных ресурсов для заготовки древесины является важным инструментом для обеспечения устойчивости процессов промышленного освоения лесов и минимизации негативного воздействия на экосистемы. Внедрение использования данных дистанционного зондирования Земли позволяет получать актуальную информацию

о состоянии ландшафтов, локализации зон рубок и динамики процессов лесовосстановления. Интеграция ландшафтно-гидрологического подхода, который учитывает естественные границы экосистем, является универсальным методом – бассейновый метод является наиболее удобным способом осуществить пространственную оценку территории, а также реализовать методики экологического мониторинга. При возникновении проблем, связанных с решением задач рационального природопользования, именно бассейновый подход максимально адаптирует экологическую эффективность планирования антропогенной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крестовский О. И. Влияние вырубki леса и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 117 с.
2. High-resolution global maps of 21-st-century forest cover change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore et al. // Science. 2013. Vol. 342, iss. 6160. Pp. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693
3. Никитенков А. Н., Дутова Е. А., Покровский Д. С. Картографические построения и оценка морфометрических параметров водосборов горноскладчатых территорий по данным спутниковой съемки (SRTM) (на примере северной части Кузнецкого Алатау) // Вестник ТГАСУ. 2013. № 1 (38). С. 223–231. EDN: PWWKQJ
4. Елсаков В. В., Щанов В. М. Спутниковые методы в анализе изменений экосистем бассейна р. Вычегда // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 135–145. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-13-135-145; EDN: WMIXKJ
5. Лыгин А. Н. Применение RFID-технологии и ГИС в геодезии // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. Т. 60, № 6. С. 105–110. EDN: XHARST
6. Атлас малонарушенных лесных территорий России / Д. Е. Аксенов, Д. В. Добрынин, М. Ю. Дубинин и др. М.: МСоЭС; Вашингтон: World Resources Inst., 2003. 187 с.
7. Володченкова Л. А., Гуц А. К. Математическое моделирование мозаичности лесных экосистем // Математические структуры и моделирование. 2020. № 4 (56). С. 49–63. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.49-63; EDN: DPWNVD
8. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS / Ф. В. Стыценок, С. А. Баргалева, В. А. Егоров и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 254–266. EDN: QIXEWV
9. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н., Демидов В. Н. Модель гидрологического цикла лесного водосбора и оценка изменений водного баланса при рубке леса // Лесоведение. 2012. № 6. С. 3–13. EDN: PHFZUH
10. Jones J. A., Post D. A. Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States // Water Resources Research. 2004. Vol. 40, iss. 5. Art. W05203. DOI: 10.1029/2003WR002952
11. Лесогидрологические последствия рубок в условиях Средней Сибири / А. А. Онучин, Т. А. Буренина, Н. В. Зирюкина и др. // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 110–118. EDN: SLRSTV
12. Корытный Л. М. Бассейновый подход в географии // География и природные ресурсы. 1991. № 1. С. 161–166.

Статья поступила в редакцию 29.12.2024; одобрена после рецензирования 04.03.2025; принята к публикации 12.03.2025

Информация об авторах

БОРОВЛЁВ Александр Юрьевич – инженер отдела флоры и растительности севера, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – ГИС-анализ, дистанционные методы исследований. Автор 18 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9072-2397>; SPIN-код: 2228-7743; AuthorID: 941581

ЕЛСАКОВ Владимир Валериевич – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела флоры и растительности севера, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов – спутниковые методы исследований растительного покрова. Автор 200 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7111-5161>; SPIN-код: 7581-2681; AuthorID: 92267

Вклад авторов:

Боровлёв А.Ю. – разработка методики, выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Елсаков В.В. – постановка цели, задач, редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*58:528.8

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.33>

EDN: HCHHEU

Spatial Analysis of Limitations of Clearcutting in Catchment Areas Using Remote Sensing Data and GIS Technologies

A. Yu. Borovlev[✉], V. V. Elsakov

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, 167000, Russian Federation
borovlev.a.yu@ib.komisc.ru [✉]

Abstract. *Introduction.* Logging activities significantly affect the most important functions of forest ecosystems. Forestry intensification implies not only an increase in timber harvest volumes, but also informed planning and control over the implemented activities aimed at forest restoration in felled areas. The basis for carrying out these measures rests on taking into account the landscape-ecological features of the territory where the economic activity takes place. Minimization of the negative impact of logging on ecosystems is taken into consideration in the Forest Code and in the standards of forest management of independent systems of voluntary forest certification. *The purpose of the study* is to develop and analyze the applicability of individual parameters for assessing the condition of exploited forest sites in the ranking of risks associated with timber harvesting. *Materials and methods.* The main attention is paid to the quantitative indicators that can be processed using methods of statistical analysis. The set of proposed values is based on the use of geoinformation methods, remote sensing data, and spatial analysis tools. On the example of analyzing the spatial data on the actively developed forest areas in the basins of the rivers Bol. Vizinga, Kobra, Lopyu, Nivshera, and Nizhma of the Komi Republic, additional criteria have been proposed for monitoring and assessing possible risks arising in the wood logging process. *Results.* In accordance with the purpose of the study, the following criteria for assessing the condition of exploited forest areas have been identified: (1) logging localization in the network of protected areas, (2) areas of clearcuts, (3) presence of intact forest areas in the vicinity of a planned logging area, (4) the mosaic of forest environment, and (5) the indicator of preservation of the water-regulating function of forests. All measured parameters are territorially linked not to administrative or forestry boundaries but to the natural landscape contours included in a single watershed. *Conclusion.* All of the above parameters can be used as an additional assessment of forest management sites, in land development monitoring, as well as in landscape-ecological planning. The criteria are closely related to the requirements of voluntary forest certification and allow minimizing the negative impact on the ecological functions of forest landscapes in the context of forest management intensification.

Keywords: sustainable forest management; voluntary forest certification; GIS-analysis; clearcutting; landscape hydrology approach

Funding: this study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 24-68-00055 “From the Past to the Future: Rural Communities in the Conditions of Post-Agricultural Vector of Transformations” implemented at the National Research University Higher School of Economics.

For citation: Borovlev A. Yu., Elsakov V. V. Spatial Analysis of Limitations of Clearcutting in Catchment Areas Using Remote Sensing Data and GIS Technologies. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):33–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.33>; EDN: HCHHEU

REFERENCES

1. Krestovskiy O. I. The impact of deforestation and reforestation on river water content. Leningrad, Gidrometeoizdat; 1986. 117 p. (In Russ.).
2. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. 2013;342(6160):850–853. DOI: 10.1126/science.1244693
3. Nikitenkov A. N., Dutova D. S., Pokrovskiy D. S. Cartography and estimation of morphometrical characteristics of river basins of mountain areas on the basis of SRTM data (exemplified by the northern part of Kuznetsky Alatau). *Journal of Construction and Architecture*. 2013;(1(38)):223–231. EDN: PWWKQJ (In Russ.).
4. Elsakov V. V., Shchanov V. M. Satellite data in analysis of changes in ecosystems of the Vychegda River basin. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2016;13(4):135–145. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-13-135-145145; EDN: WMIXKJ (In Russ.).
5. Lygyn A. N. Implementation of RFID-technologies in GIS and in a field of geodesy. *Proceedings of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2016;60(6):105–110. EDN: XHARST (In Russ.).
6. Aksenov D., Dobrynin D., Dubinin M. et al. Atlas of Russia's intact forest landscapes. Moscow, ISEU Publ.; Washington, World Resources Inst., 2003. 187 p.
7. Volodchenkova L. A., Guts A. K. Mathematical modeling of the mosaic of forest ecosystems. *Mathematical Structures and Modeling*. 2020;(4(56)): 49–63. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.49-63; EDN: DPWNVD (In Russ.).
8. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A. et al. Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2013; 10(1):254–266. EDN: QIXEWV (In Russ.).
9. Kuchment L. S., Gelfan A. N., Demidov V. N. A model for the hydrological cycle of a forested catchment and assessment of the changes caused in water balance by cuttings. *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*. 2012;(6):3–13. EDN: PHFZUH (In Russ.).
10. Jones J. A., Post D. Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and re-growth in the northwest and eastern United States. *Water Resources Research*. 2004;40(5):W05203. DOI: 10.1029/2003WR002952
11. Onuchin A. A., Burenina T. A., Ziryukina N. V. et al. Impact of forest harvesting and forest regeneration on runoff dynamics at watersheds of Central Siberia. *The Siberian Forest Journal*. 2014;(1):110–118. EDN: SLRSTV (In Russ.).
12. Korytny L. M. Basin approach in geography. *Geography and Natural Resources*. 1991;(1):161-166. (In Russ.).

The article was submitted 29.12.2024; approved after reviewing 04.03.2025; accepted for publication 12.03.2025

Information about the authors

Alexander Yu. Borovlev – Engineer, Department of Flora and Vegetation of the North, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests – GIS-analysis, remote sensing methods. Author of 18 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9072-2397>; SPIN: 2228-7743; AuthorID: 941581

Vladimir V. Elsakov – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Department of Flora and Vegetation of the North, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests – satellite methods of vegetation research. Author of 200 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7111-5161>; SPIN: 7581-2681; AuthorID: 92267

Contribution of the authors:

Borovlev A. Yu. – development of methodology, performing experimental work, writing and preparing the article.
Elsakov V.V. – formulation of the research goal and objectives, editing the article

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья
УДК 582.475: 581.522.4: 581.6
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.46>
EDN: LEBDJG

Влияние поздних весенних заморозков на репродукцию четырёх видов пятихвойных сосен при их выращивании в условиях юга лесной зоны Западной Сибири

А. Г. Попов

Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук,
Российская Федерация, 634055, Томск, пр. Академический, 10/3
popovaleksa@yandex.ru

Аннотация. *Введение.* Из теории интродукции известно, что для полной акклиматизации вида в новых местообитаниях необходимыми условиями являются его устойчивость и воспроизводимость. Наиболее важным фактором, приводящим к гибели урожая у лесных древесных видов в условиях юга лесной зоны Западной Сибири, являются поздние весенние заморозки. Например, для ценного местного вида сосны сибирской *P. sibirica* периодичность урожая напрямую зависит от влияния поздних весенних заморозков на его генеративные органы. Подобные научные исследования на интродукционных объектах экзотических видов пятихвойных сосен в данном регионе до настоящего времени не проводились, поэтому *целью* настоящей работы стала оценка влияния поздних весенних заморозков на репродуктивные органы четырёх видов пятихвойных экзотов при их интродукции вегетативным способом в условиях подтаёжных лесов и лесной зоны южной тайги Западной Сибири. *Методы.* Привои производили на четырёхлетний подвой *P. sibirica* с размещением деревьев 3×6 м в девяти повторностях. Исследования проводили в течение семи лет после вступления привоев в генеративную фазу онтогенеза. Оценка повреждаемости шишек от весенних заморозков проводили в связи со следующими показателями: средняя суточная сумма эффективных температур, дата последнего заморозка, сумма эффективных температур перед последним заморозком, температура последнего заморозка и число дней с $T > 5^\circ\text{C}$ перед последним заморозком. *Результаты.* Виды по срокам пика пыления и рецептивных фаз шишек расположились в порядке накопления необходимой суммы температур в зависимости от условий их естественного происхождения: субарктическо-субальпийский *P. pumila*, горно-таёжный *P. cembra*, неморальный *P. koraiensis*, муссонные области умеренного и субтропического пояса *P. strobus*. Выяснилось, что вероятность сохранения и устойчивость репродуктивных органов у пятихвойных экзотов сосен выше в том случае, если последний весенний заморозок в сочетании с низкой накопленной суммой эффективных температур, а также относительно небольшим числом дней с $T > 5^\circ\text{C}$ перед последним заморозком происходил раньше в мае. *Выводы.* Виды *P. cembra* и *P. strobus* устойчивы к заморозкам, а *P. pumila* и *P. koraiensis* менее устойчивы, причём диапазон устойчивости генеративных структур у последнего вида был шире. Основная причина связана со сроками развития шишек. Наименьшие негативные влияния от весенних заморозков у *P. pumila* продемонстрировали западный континентальный и неморальный экотипы, а у *P. koraiensis* – экотипы из северной части его естественного ареала. Именно эти экотипы рекомендуется использовать в данном районе интродукции для работ по их полной акклиматизации и дальнейшего внедрения в лесное хозяйство и озеленение.

Ключевые слова: интродукция; вегетативное потомство; пик пыления; рецептивные фазы; устойчивость и повреждаемость генеративных органов; перспективность видов и экотипов

Финансирование: работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН.

Для цитирования: Попов А. Г. Влияние поздних весенних заморозков на репродукцию четырёх видов пятихвойных сосен при их выращивании в условиях юга лесной зоны Западной Сибири // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 46–60. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.46>; EDN: LEBDJG

© Попов А. Г., 2025

Введение

Виды из семейства *Pinaceae* Lindl. являются основными лесообразователями, поэтому важно их разностороннее исследование, в том числе изучение устойчивости и воспроизводимости при выращивании за пределами естественных ареалов для различных целей интродукции. Оценивая перспективность растений при интродукции в регионы с отличающимися климатическими условиями, одним из важнейших факторов является их способность к репродукции в данной местности [1]. В условиях Западной Сибири самым чувствительным периодом, когда погодные условия могут повлиять на репродуктивную способность сосен, считается время дифференциации мужских и женских гаметофитов (май–начало июня) [2]. Именно в этот период на юге региона наблюдаются неустойчивые атмосферные условия с высокой вероятностью возникновения погодных экстремумов, в частности, приводящих к возникновению поздних весенних заморозков [3], которые увеличивают риск их повреждения [4]. Так, например, было показано, что наибольшее климатическое влияние на генеративную сферу местного пятихвойного вида сосен – кедра сибирского (*P. sibirica* Du Tour) в условиях юга лесной зоны Западной Сибири оказывают поздние весенние заморозки в год «цветения» и опыления [4, 5], при этом кроме даты заморозка имеет значение накопленная к этому времени сумма эффективных температур и температура заморозка [4, 6]. Хотя это не единственный фактор, который может вызывать гибель шишек, он всё же является наиболее критическим (лимитирующим) для урожая. Разумеется, это природное явление должно влиять и на репродуктивные способности пятихвойных экзотов, выращиваемых в данных условиях для целей более широкого их внедрения в лесное хозяйство. В настоящее время во многих регионах севера России ведутся научные работы по введению в местную культуру пятихвойных экзотических видов сосен, получены значительные результаты по устойчивости [7–9], даны

методические рекомендации [10, 11], в том числе по видовому ассортименту [7, 12, 13]. К сожалению, некоторые авторы и вовсе не привязывают результаты своих исследований к лимитирующим климатическим факторам региона и недостаточно обсуждают причины наблюдаемых явлений. В настоящей работе делается попытка анализа результатов исследования с учётом основных лимитирующих факторов среды района интродукции.

Так как устойчивость вегетативной сферы у некоторых пятихвойных сосен нами была рассмотрена ранее [14–16], поэтому **целью** настоящей работы стала оценка влияния поздних весенних заморозков на репродуктивные органы четырёх видов пятихвойных экзотов при их интродукции вегетативным способом в условиях подтаёжных лесов и лесной зоны южной тайги Западной Сибири.

Материалы и методы

Объектами исследования послужили экотипы четырёх видов пятихвойных экзотов сосен (рис. 1):

1. Кедр европейский, *P. cembra* L., распространён в верхней трети горно-таёжного пояса Альп и Карпат в зоне широколиственных лесов. Площадь распространения 80 тыс. км² [17].

2. Сосна веймутова, *P. strobus* L., растёт в северо-восточных районах Северной Америки в муссонных областях умеренного и субтропического пояса. Площадь распространения 1,8 млн. км² [17].

3. Кедровый стланик, *P. pumila* (Pall.) Regel, преимущественно субарктический и субальпийский вид с обширным ареалом в Северной и Восточной Азии от Байкала до Чукотки и от низовьев Лены до центральной части о. Хонсю. Площадь распространения 6 млн. км² [17].

4. Кедр корейский, *P. koraiensis* Sieb. et Zucc., неморальный вид из Маньчжурии, Приамурья и Приморья России, северо-восточных областей Китая, Корейского полуострова и горных районов Японских островов. Площадь распространения 600 тыс. км² [17].



Рис. 1. Распространение интродуцированных видов и районы происхождения вегетативного потомства. Зелёным цветом указано распространение сосен в северном полушарии Земли
 Fig. 1. Distribution of introduction species and regions of origin of the vegetative progeny.
 Distribution of pines in the Northern Hemisphere is marked in green

Пятихвойные экзоты сосен представляли собой вегетативное потомство, произрастающее на плантации Научного стационара «Кедр» Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (30 км к югу от г. Томска, юго-восток Западно-Сибирской равнины, крайний юг таёжной зоны, $56^{\circ}13'$ с. ш., $84^{\circ}51'$ в. д., 78 м н. ур. м.) с размещением деревьев 3×6 м в девяти повторностях (блоках). Черенки для каждого вида были заготовлены с 15–20-ти 100–180-летних случайно отобранных деревьев в каждом районе исследования, за исключением *P. strobus*, по которой данная информация отсутствовала. Привои производили на четырёхлетний подвой *P. sibirica* в 1997 году. К концу периода исследования возраст вегетативного потомства достиг 15-ти лет. Характеристика мест произрастания маточных деревьев вегетативного потомства представлена в табл. 1. Виды *P. cembra* и *P. strobus* содержали по одному экотипу, *P. pumila* был представлен пятью экотипами, *P. koraiensis* – шестью. Каждый экотип состоял из 2–13 клонов, которые были представлены 2–8 «цветущими» раметами. Малая представленность раметами некоторых клонов *P. strobus*, *P. koraiensis* и *P. pumila* объясняется пониженной устойчивостью вегетативной сферы небольшого числа экотипов этих видов к суровым условиям юга Западной Сибири, так как климат данного района интродукции переходный от умеренно влажного, мягкого климата Европейской части России к резко континентальному климату Восточной Сибири [18]. Почва района исследования тёмно-серая лесная, супесчаная.

В течение семилетнего периода наблюдений для оценки репродуктивных

способностей учитывали число плодоносящих привоев у всех видов, на которых подсчитывали среднее число мужских побегов и женских шишек (озими) в начале сезона их появления до периода пика пыления мужских и рецептивной фазы женских шишек. Отмечали наилучшие по устойчивости и продуктивности экотипы с максимальным числом репродуктивных органов в год их появления. Сроки пика пыления у мужских и рецептивных фаз у женских шишек указывали по методике Е. В. Титова [19] и И. А. Забелина [20]. Долю «цветущих» клонов у экотипов представляли от всех «цветущих» клонов вида за весь период наблюдения. Клон считался «цветущим», если хотя бы одна из его рамет имела репродуктивные структуры. Повреждаемость генеративных органов оценивали долей женских шишек и мужских побегов, претерпевших негативные последствия в результате влияния поздних весенних заморозков, от числа заложившихся женских шишек и мужских побегов. Информацию о погодных условиях использовали по данным станции Томск Росгидромета, находящейся в 20 км восточнее плантации (табл. 2). По средним суточным температурам высчитывали сумму эффективных температур перед последним заморозком и в момент пыления мужских и рецептивных фаз женских шишек. Этот показатель рассчитывался как нарастающая сумма положительных температур с минимальным значением $+5^{\circ}\text{C}$. Также в течение периода мониторинга использовали данные о дате и температуре последнего весеннего заморозка и числе дней с $T > 5^{\circ}\text{C}$ перед последним заморозком.

Таблица 1. Характеристика мест произрастания маточных деревьев вегетативного потомства
Table 1. Characteristics of the growth areas of parent trees of vegetative progeny

Вид	Географическое местоположение экотипа	Природная зона, высотный пояс	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.	Высота н. ур. м., м
Кедр европейский	Южная часть провинции Брешиа, Италия, южный макросклон Альп	Верхняя часть лесного пояса	46°10'	10°30'	1800
Сосна веймутова	Ботанический сад Ботанического института РАН (г. Санкт-Петербург)	—	—	—	—
Кедровый стланик	№ 1. Иркутская обл., долина р. Слюдянка, крутой северо-западный склон хр. Хамар-Дабан	Нижняя часть лесного пояса (тёмнохвойные горно-таёжные леса)	51°30'	103°40'	900
	№ 2. Забайкальский край, южный склон Черомного хр., долина правого притока р. Могоча	Средняя часть лесного пояса (лиственничные горно-таёжные леса)	54°00'	119°55'	800
	№ 3. Хабаровский край, южный склон хр. Мяочан, долина р. Силинка, д. Горный	Нижняя часть лесного пояса (тёмнохвойные горно-таёжные леса)	50°45'	136°25'	600
	№ 4. Амурская обл., подножье Станового хр., вершина водораздела р. Сигикта и р. Гектан, г. Тында	Среднетаёжные светлохвойные (сосново-лиственничные) леса	55°15'	124°35'	600
	№ 5. Юг Якутии. Пологий северный склон долины р. Хани	Верхняя часть пояса лиственничных лесов	56°55'	121°05'	1000
Кедр корейский	№ 1. Северо-Восточный Китай, юг провинции Гирич, юго-западный пологий склон хребта вдоль р. Сунгари	Граница кедрово-широколиственного и кедрово-тёмнохвойного поясов	44°20'	128°25'	850
	№ 2. Китай. Юго-восток китайской провинции Хэйлуцзян. ЛСП.	Кедрово-широколиственные леса	44°	128°	—
	№ 3. Еврейская авт. обл., юго-восточный склон хр. Малый Хинган, пгт. Известковый	Низкогорные широколиственно-тёмнохвойные леса	49°05'	131°35'	500
	№ 4. Хабаровский край, южный склон хр. Мяочан, долина р. Силинка, д. Горный	Нижняя часть лесного пояса (тёмнохвойные горно-таёжные леса)	50°45'	136°25'	600
	№ 5. Хабаровский край, останец в пойме р. Амур (правобережье), с. Пивань	Широколиственно-тёмнохвойные подтаёжные леса	50°30'	137°10'	250
	№ 6. Хабаровский край, крайний север Сихотэ-Алиня подножье г. Шаман, с. Софийск	Нижняя часть пояса тёмнохвойных лесов	51°32'	140°03'	250

Таблица 2. Дата и температура последнего весеннего заморозка, сумма эффективных температур перед последним заморозком и число дней с $T > 5^{\circ}\text{C}$ перед последним заморозком в течение периода мониторинга

Table 2. The last frost date and temperature, the sum of effective temperatures before the last frost date, and the number of days with temperatures above $+5^{\circ}\text{C}$ before the last frost date during the monitoring period

Год	Дата последнего заморозка	Сумма эффективных температур перед последним заморозком	Температура последнего заморозка, $^{\circ}\text{C}$	Число дней с $T > 5^{\circ}\text{C}$ перед последним заморозком
2006	08 мая	5,80	-0,3	1
2007	31 мая	434,40	-1,1	43
2008	25 мая	310,60	-0,5	27
2009	27 мая	296,90	-0,9	32
2010	23 мая	170,20	-1,2	20
2011	18 мая	299,90	-0,9	29
2012	17 мая	219,00	-1,2	22

Результаты и их обсуждение

P. pumila являлся видом с наиболее ранним развитием генеративных органов (рис. 2) по причине накопления меньшего количества дней с эффективной температурой, необходимых для их развития, так как вид в естественных условиях обитания произрастает в самых суровых условиях. В среднем пик пыления мужских и рецептивные фазы женских шишек происходили в основном ближе к концу первой декады июня (9–13 июня) при средней сумме эффективных температур $529,4^{\circ}\text{C}$ (lim: 511,6–547,2). Появление генеративных органов начиналось с девятилетнего возраста привоев (табл. 3). В течение всего периода наблюдений шишки отсутствовали только в 2011 году. Наиболее

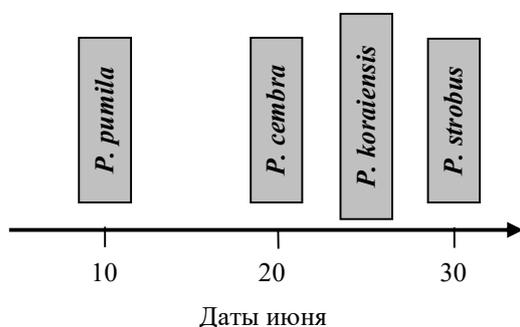


Рис. 2. Сроки пика пыления и рецептивных фаз у пятихвойных экзотов сосен
Fig. 2. The peak of pollen shedding and receptivity phases times in 5-needle exotic pine

репродуктивными оказались 2007 и 2012 гг. В данное время наблюдалось максимальное число привоев со средним количеством мужских побегов и большим числом женских шишек. Но в 2007 году весь урожай женских шишек и большое число мужских побегов пострадали от прошедшего в последний день мая заморозка.

По этой причине макростробилы темнели и становились мягкими на фазе тупых почек и кончиков не до конца вышедшей из почечных чешуй озимы (середина первой декады июня), которые в дальнейшем быстро усыхали и опадали. Микростробилы также повреждались как на внутривидовой фазе, так и на фазах освободившихся от покровных чешуй почки частично и полностью дифференцированных шишек, и только в единичных случаях доживали до фазы пыления. Повреждения полностью отсутствовали только в течение двух лет (2010 и 2012 гг.) и были минимальными в 2008 году. Хотя в данные годы и была самая низкая температура последнего заморозка, которая по дате приходилась на конец второй–начало третьей декады мая, при сумме эффективных температур перед последним заморозком в 200°C , этого оказалось достаточно для выживания уже вполне сформировавшихся к этому времени шишек в почках. Тем не менее, по сравнению

со всеми исследованными видами, генеративная сфера *P. pumila* являлась наименее устойчивой и более чувствительной даже к небольшим весенним заморозкам, происходящим в начале мая при переходе температуры воздуха через 5 °С, когда, по мнению И. Н. Третьяковой [2], начинают возобновляться митотические деления в спорогенной ткани. Так, например,

показательным являлся первый год обнаружения абортивных мужских репродуктивных органов на привоях, когда они все повреждались минимальными весенними заморозками на десятую долю ниже нуля, но происходящими для этого вида в начальный период формирования шишек в почках после их заложения в прошлом году.

Таблица 3. Репродуктивные способности и устойчивость видов и их экотипов в условиях интродукции

Table 3. Reproductive capacity and resistance of species and their ecotypes in the introduction conditions

Вид	Экотип	Год	♂ lim	♀ lim	Число деревьев, шт. (%)	Повреждения, ♂, ♀, %
					♀, ♂, ♂+♀	
<i>P. pumila</i>	2	2006	$\frac{8,5 \pm 3,5}{6-11}$	–	$\frac{2 (100)}{-}$	♂ 100
	2, 3, 4	2007	$\frac{5 \pm 3,5}{1-10}$	$\frac{5,6 \pm 3,3}{1-13}$	$\frac{21}{16 (76), 9 (43), 5 (24)}$	♂ 84, ♀ 100
	1, 2, 4, 5	2008	мало	$\frac{2,6 \pm 1,5}{1-4}$	$\frac{7}{3 (43), 5 (71), 1 (14)}$	♂ 20, ♀ 5
	3	2009	мало	–	$\frac{1 (100)}{-}$	♂ 100
	2, 3	2010	–	$\frac{1,5 \pm 0,7}{1-2}$	$\frac{2 (100)}{-}$	–
	2, 3, 4	2012	средне	$\frac{6,7 \pm 5,8}{1-22}$	$\frac{19}{18 (95), 1 (5), 0}$	–
<i>P. koraiensis</i>	1, 2, 3, 4, 5	2006	$\frac{6 \pm 6,4}{1-31}$	1	$\frac{42}{1 (2), 41 (98), 0}$	♂ 14, ♀ –
	3, 4, 5	2007	$\frac{6,8 \pm 8,8}{1-42}$	–	$\frac{30 (100)}{-}$	♂ 100
	3, 5	2008	ед.–ср.	$\frac{2,1 \pm 1,4}{1-5}$	$\frac{29}{8 (28), 23 (79), 2 (7)}$	–
	3, 4, 5, 6	2009	мало	–	$\frac{17 (100)}{-}$	♂ 20
	1–6, 3, 5	2010	ед.–мало	$\frac{5,8 \pm 4,2}{1-15}$	$\frac{100}{35 (35), 92 (92), 27 (27)}$	–
	1, 3, 4, 5	2011	ед.	$\frac{3,6 \pm 2,4}{1-11}$	$\frac{39}{34 (87), 9 (23), 4 (10)}$	♂ –, ♀ 15
1, 3, 4, 5	2012	много	$\frac{5 \pm 4,8}{1-26}$	$\frac{131}{63 (48), 117 (89), 49 (37)}$	–	
<i>P. cembra</i>	1	2006	7	–	1 (100)	–
	1	2007	–	1	1 (100)	–
	1	2008	2	–	1 (100)	–
	1	2012	средне	–	1 (100)	–
<i>P. strobus</i>	1	2008	средне	–	1 (100)	–
	1	2012	много	–	1 (100)	–

Примечание: ♂ – среднее число мужских побегов (много – 11 и более, средне – 6–10, мало – 3–5, единичные (ед.) – 1–2); ♀ – среднее число женских шишек; ♂+♀ – наличие мужского и женского цветения. Полужирным шрифтом отмечены экотипы с максимальным числом шишек.

Привои *P. pumila* в основном были двудомными с уклоном к женскому типу «цветения» (табл. 3). По сравнению с другими видами они характеризовались средним количеством закладываемых мужских побегов и большим средним числом женских шишек. Всего за весь период исследований репродуктивные органы были обнаружены на 24 клонах. Лучшими по продуктивности и устойчивости экотипами оказались западно-континентальный № 2 «Могоча» и неморальный № 3 «Горный», кроме того, первый раньше всех вступал в генеративную фазу онтогенеза. Данные экотипы в наиболее репродуктивные годы для вида характеризовались наличием большего числа «цветущих» клонов с максимальным числом репродуктивных органов (рис. 3). Далее по продуктивности выделялся восточно-континентальный экотип № 4 «Тында» с меньшим количеством «цветущих» клонов, на которых шишки закладывались в течение трёх лет из шести. Наименее продуктивными оказались экотипы южно-прибайкальский № 1 «Слюдянка» и континентальный № 5 «Хани» с небольшим количеством «цветущих» клонов, которые плодоносили лишь в 2008 году. Дифференциация экотипов по срокам пика пыления и рецептивных фаз была незначительной (1–2, редко 3 дня), все они имели возможность к переопылению. Направление различий было таковым, что экотипы из более холодных мест, перемещённые в

более тёплые условия района интродукции, «цвели» раньше, чем неморальный экотип № 3 происхождением из более тёплого умеренного муссонного климата.

У всех экотипов прослеживалась значимая связь повреждаемости генеративных органов с накопленными к моменту заморозка суммой эффективных температур, числом дней, которые накопились до даты последнего заморозка, и с датой последнего заморозка, либо с одним из них. Ни с какими другими факторами значимых корреляций обнаружено не было. Так, анализ дат последнего заморозка в год наблюдения и температурных показателей позволил сделать следующее заключение для *P. pumila*. В исследованном районе интродукции сохранение и устойчивость репродуктивных органов к последним весенним заморозкам будет выше в том случае, если накопленная сумма эффективных температур колеблется на 20–30 °С в диапазоне 200 °С, а число дней с $T > 5$ °С перед последним заморозком не превышает 20–22 дня, при возможных заморозках ни раньше и ни позже конца второй–начала третьей декады мая. Кроме того, даже небольшой заморозок, произошедший в конце мая при довольно высокой накопленной сумме эффективных температур перед последним заморозком (~ выше 300 °С) и большим числом дней с $T > 5$ °С перед последним заморозком (~ более 27 дней), наиболее губителен для генеративной сферы *P. pumila*.

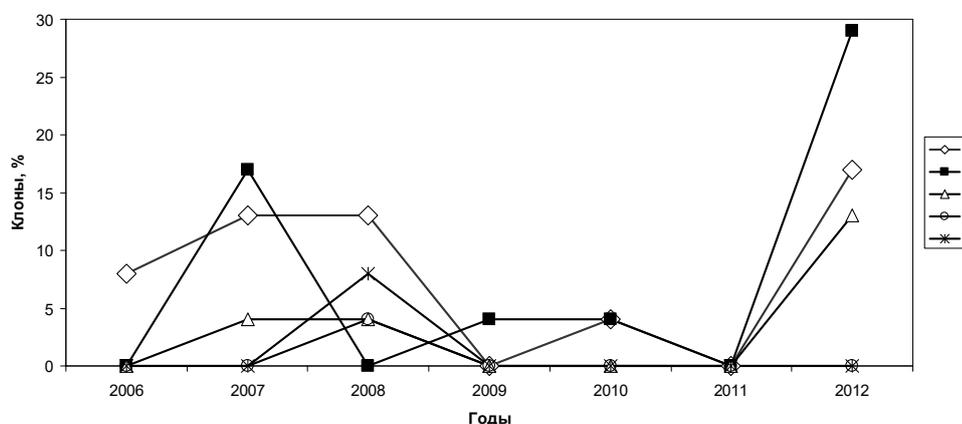


Рис. 3. Погодичная динамика «цветущих» клонов *P. pumila*
 Fig. 3. Annual dynamics of the “flowering” clones of *P. pumila*

На основании исследований роста и развития генеративных структур у *P. sibirica* [2] и полученных в настоящей работе данных можно предположить, что наиболее чувствительными к любым заморозкам для *P. pumila* являются начальный внутрипочечный (первые этапы митотических делений в спорогенной ткани и при формировании семенных чешуй) и конечный внутрипочечный (при завершении дифференциации микроспорофиллов и при закладке тканей семян в период перед освобождением от покровных чешуй почки молодых не до конца дифференцированных шишек) этапы при формировании мужских и женских гаметофитов. Всё это связано с тем, что вид является субарктическим и субальпийским, произрастающим в условиях короткого сезона вегетации с минимальными суммами эффективных температур, поэтому сроки сезонного роста и развития как вегетативных [21, 22], так и репродуктивных органов проходили раньше, чем у других (более теплолюбивых) экзотических пятихвойных сосен. Именно поэтому в условиях юга Западной Сибири, для территории которой характерны практически ежегодные весенние заморозки [3, 4], репродуктивные структуры *P. pumila* очень часто подвержены их негативным влияниям. Полученные результаты полностью согласуются с существующей научной генеральной идеей о том, что деревья северного происхождения, перемещённые в южном направлении, начинают рост и цветение раньше остальных и по этой причине более подвержены губительному влиянию поздних весенних заморозков [23–25].

Проведённое исследование добавляет очередной аргумент в пользу снижения перспективности вида в данном регионе интродукции, так как немаловажным критерием для его акклиматизации является высокая способность интродуцента к полноценному развитию гаметофитов и появлению последующих поколений путём самосева. Тем не менее, хотя в целом вид *P. pumila* позиционируется как субарктическо-субальпийский, он произ-

растает в довольно широком экологическом диапазоне и его западно-континентальный и неморальный экотипы показали лучшую устойчивость к весенним заморозкам юга Западной Сибири. Поэтому необходимо при дальнейших интродукционных испытаниях в данном регионе обратить внимание именно на них.

P. koraiensis – вид, генеративные органы которого развивались по времени после *P. pumila* и *P. cembra* (рис. 2). Так, сроки пика пыления мужских шишек и рецептивные фазы женских шишек проходили с середины по конец третьей декады июня (23–30 июня) при средней сумме эффективных температур 704,7 °C (lim: 674,5–734,8). Развитие генеративных органов начиналось с девятилетнего возраста и продолжалось ежегодно в течение всего периода наблюдений (табл. 3). Мужские шишки присутствовали ежегодно, а женские шишки отсутствовали в 2007 и в 2009 гг. Наиболее репродуктивные сезоны с максимальным числом привоев с мужскими и женскими шишками зафиксированы в период с 2010 по 2012 год, среди которых по продуктивности выделялся последний год наблюдений.

Результаты исследований показали, что данный вид подвержен весенним заморозкам, но не в такой степени как *P. pumila*. Повреждения касались, как правило, только мужской генеративной сферы. Повреждённые заморозками шишки останавливали своё развитие на внутрипочечной фазе, что связано с более поздними сроками прохождения фенофаз по причине большей необходимой для роста и развития суммы эффективных температур, чем у *P. pumila* и *P. cembra*. Повреждения полностью отсутствовали лишь в трёх из семи исследованных сезонах, были минимальными в остальные года и максимальными в 2007 году.

Для данного вида было характерно большее число привоев с мужским типом сексуализации (исключение 2011 год). Кроме того, по сравнению с другими видами встречались деревья с обильным

заложением мужских побегов (до 50 шт. на дерево). По среднему же числу женских шишек *P. koraiensis* незначительно уступал лишь *P. pumila*.

В течение всего периода исследований репродуктивные структуры появлялись на 35 клонах вида. Так, наибольшая доля «цветущих» клонов была характерна для экотипов происхождением из северной части естественного ареала *P. koraiensis* – № 5 «Пивань», № 4 «Горный» и чуть ближе к центральной (континентальной) – № 3 «Известковая» (рис. 4). Генеративные органы на их привоях закладывались ежегодно и в большем количестве по сравнению с экотипами происхождением из более южной части ареала, а потери от майских заморозков снижались от южных к северным экотипам. Дифференциация экотипов по датам пыления мужских шишек и рецептивных фаз женских шишек в годы с отсутствием негативных последствий от заморозков была незначительной (1–3 дня), но прослеживалась тенденция более раннего «цветения» северных по сравнению с южными экотипами.

Как и у *P. pumila*, у всех экотипов *P. koraiensis* также прослеживалась значимая связь повреждаемости генеративных органов с накопленными к моменту заморозка суммой эффективных температур, числом дней, которые накопились до даты последнего заморозка, и с датой последнего заморозка, либо с одним из них.

Анализируя полученные результаты исследования, можно заключить, что генеративные структуры *P. koraiensis* устойчи-

вы к заморозкам (или несут незначительные потери), происходящим до середины третьей декады мая при сумме эффективных температур перед последним заморозком до ~ 300 °С и числе дней с $T > 5$ °С перед последним заморозком не более 32. Основные негативные последствия для генеративной сферы представляли заморозки, происходящие позже и, соответственно, при больших остальных использованных в работе показателях. Поэтому в сравнении с повреждаемым заморозками *P. pumila* диапазон устойчивости генеративных структур *P. koraiensis* оказался шире (рис. 5). Это связано с тем, что *P. koraiensis* – вид неморальный, обитающий в природных условиях с большей теплообеспеченностью, поэтому сроки роста и развития начинались позже (при большей накопленной сумме эффективных температур), чем у субарктического *P. pumila* и горно-таёжного *P. cembra*, о чём было сказано выше. Соответственно повреждаемость генеративных органов на привоях была меньше по сравнению с *P. pumila*, причём повреждения в основном приходились, предположительно, на начальные, а не конечные внутрипочечные этапы дифференциации шишек. Тем не менее, экотипы *P. koraiensis*, материнские деревья которых произрастают в местах с меньшей теплообеспеченностью, оказались более устойчивыми к природным условиям юга Западной Сибири, и поэтому именно они могут быть рекомендованы для дальнейших исследований их полной акклиматизации в данном районе интродукции.

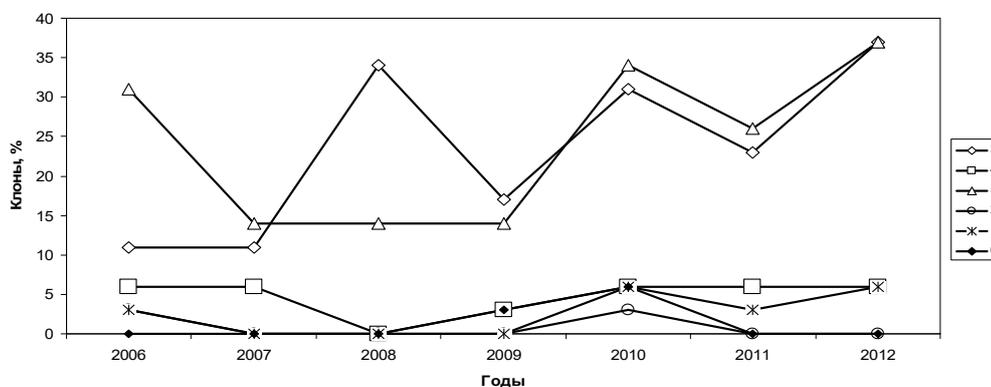


Рис. 4. Погодичная динамика «цветущих» клонов *P. koraiensis*
Fig. 4. Annual dynamics of the «flowering» clones of *P. koraiensis*

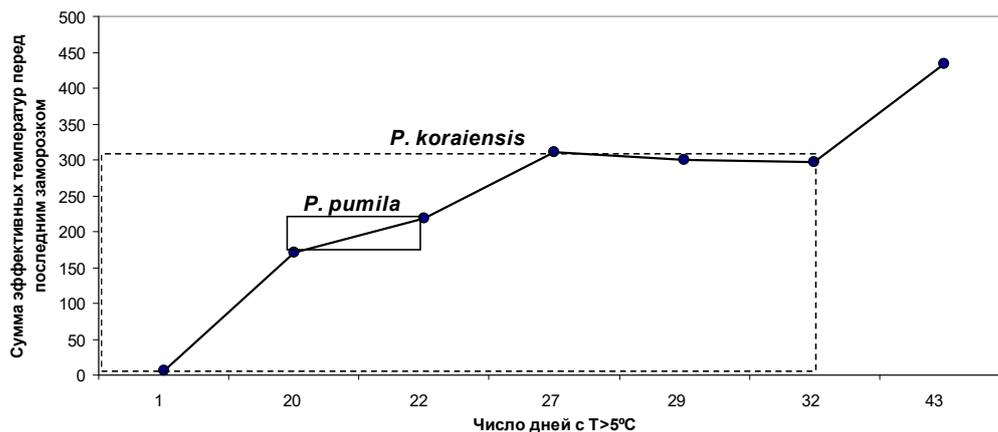


Рис. 5. Диапазон устойчивости к весенним заморозкам мужских и женских шишек первого года у *P. koraiensis* в сравнении с *P. pumila*

Fig. 5. Spring frost resistance range of one-year-old male and female cones in *P. koraiensis* compared with *P. pumila*

P. cembra – вид, который по вегетативной фенологии практически не отличался от местного вида *P. sibirica* [14, 22], поэтому и сроки прохождения генеративных фаз развития были схожи с местным пятихвойным видом. Так, сроки пика пыления мужских шишек и рецептивные фазы женских шишек проходили в начале второй декады июня (20–22 июня) (рис. 2) при средней сумме эффективных температур 667,5 °C (lim: 649,4–685,5). Развитие генеративных органов на привоях начиналось, как и у вышеперечисленных видов, с девятилетнего возраста и, в основном, было представлено мужскими шишками от единичного до среднего количества (табл. 3). Заложение единичных женских шишек было редким и нестабильным. Но вид оказался полностью устойчив к заморозкам в исследованном районе интродукции, поэтому является перспективным для дальнейшего изучения.

P. strobus – самый поздний по срокам генеративной фенологии вид (30 июня–3 июля), требующий по сравнению с другими использованными в работе видами наибольшее количество накопленной суммы эффективных температур для развития шишек, так как обитает в самых тёплых условиях. Так, на момент пика пыления средняя сумма температур составляла 759,1 °C (lim: 734,8–783,4). На привоях *P. strobus* развивались исклю-

чительно мужские побеги (рис. 2, табл. 3) от среднего до обильного количества. Их появление начиналось позже, чем у остальных видов – с одиннадцатилетнего возраста привоев, и было нестабильным, так как наблюдалось только в двух вегетационных сезонах по причине низкой морозостойкости вегетативной сферы [15]. Тем не менее, шишки весенними заморозками не повреждались, поэтому данный вид, условно и с некоторыми допущениями, всё-таки можно отнести к перспективным для дальнейшего интродукционного испытания.

Выводы

Виды по срокам пика пыления и рецептивных фаз шишек расположились в порядке накопления необходимой суммы температур в зависимости от условий их естественного происхождения: субарктическо-субальпийский *P. pumila* (529,4 °C), горнотаёжный *P. cembra* (667,5 °C), неморальный *P. koraiensis* (704,7 °C), муссонные области умеренного и субтропического пояса *P. strobus* (759,1 °C).

Анализ дат последнего заморозка в год наблюдения и температурных показателей района интродукции позволил сделать следующее заключение: чем раньше в мае происходил последний весенний заморозок в сочетании с низкой накопленной суммой эффективных температур,

а также относительно небольшим числом дней с $T > 5$ °C перед последним заморозком, тем выше вероятность сохранения и устойчивость репродуктивных органов у пятихвойных экзотов сосен. Исключение составлял *P. pumila* с его ранними сроками активации развития генеративных структур, которые очень чувствительны даже к небольшим заморозкам, происходящим даже в начале мая, тем не менее, его западный континентальный и неморальный экотипы наиболее устойчивы к их негативным влияниям. У *P. koraiensis* диапазон устойчивости генеративных структур шире, чем у *P. pumila*. Лучшими по продуктивности и устойчивости в условиях юга лесной зоны Западной Сибири оказались экотипы из более суровой для данного вида северной части естественного ареала. Виды

P. cembra и *P. strobus* продемонстрировали наилучшую устойчивость к заморозкам, но при меньшей стабильности развития генеративных органов в течение всего периода исследования. Основная причина описанных закономерностей связана со сроками развития шишек.

Для более полного изучения адаптационных возможностей и улучшения видовой устойчивости к местному климату предлагается продолжить интродукционную работу на растениях, полученных из семян исследованного вегетативного потомства, то есть провести вторичное интродукционное испытание. А все четыре пятихвойных экзотических вида на юге лесной зоны Западной Сибири необходимо рекомендовать для создания разноцелевых лесных культур и использовать в садово-парковом строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лапин П. И., Сиднева С. В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: ГБС АН СССР, 1973. С. 7–68.
2. Третьякова И. Н. Эмбриология хвойных: монография. Новосибирск: Наука, 1990. 157 с.
3. Волкова Е. С., Мельник М. А. Заморозки в южной тайге Западной Сибири как фактор риска для сферы растениеводства // География и природные ресурсы. 2023. № 1. С. 67–75. DOI: 10.15372/GIPR20230108; EDN: LKNEJM
4. Влияние поздних весенних заморозков на плодоношение кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в изменяющемся климате / С. Н. Велисевич, А. В. Попов, М. А. Мельник и др. // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 5. С. 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152; EDN: EPIGAP
5. Результаты 30-летнего мониторинга половой репродукции кедра сибирского в связи с динамикой климата / С. Н. Велисевич, О. В. Хуторной, А. В. Попов и др. // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции, Томск, 15–19 октября 2019 г. Томск: Агаф-Пресс, 2019. С. 160–161. EDN: RZWFIN
6. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation / S. Goroshkevich, S. Velisevich, A. Popov et al. // Plant Ecology and Evolution. 2021. Vol. 154, iss. 3. Pp. 321–331. DOI: 10.5091/PLECEVO.2021.1793; EDN: LIQMIQ
7. Лазарева С. М. Краткие итоги интродукции хвойных в Ботаническом саду МарГТУ // Лесной журнал. 2004. № 5. С. 25–32. EDN: ICGSMN
8. Трофимук Л. П., Пузанский Р. К., Карамышева А. В. Итоги интродукции *Pinus pumila* (*Pinaceae*) в условиях Карельского перешейка (Ленинградская область) // Растительные ресурсы. 2021. Т. 57, № 3. С. 245–259. DOI: 10.31857/S0033994621030092; EDN: VYLJHM
9. Иволина Г. В., Жук Е. А. Опыт выращивания кедрового стланика разного географического происхождения в условиях Западной Сибири // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 6. С. 18–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-18-27; EDN: GLWESG
10. Лазарева С. М. Использование методик обработки данных фенологических наблюдений (на примере представителей семейства *Pinaceae* Lindl.) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Науки о земле. 2011. Т. 4, № 2. С. 56–65. EDN: NXQRXH
11. Левин С. В. Семеношение кедра корейского (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) при его интродукции в условиях лесостепи Воронежской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 3. С. 36–47. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-36-47; EDN: CAVORF
12. Лазарева С. М., Котов М. М., Котова Л. И. Хвойные интродуценты Республики Марий Эл. СПб.: Реноме, 2002. 136 с.
13. Тутов Е. В. История выращивания и перспективы плантационного ореховодства кедровых сосен в Восточной Европе // Хвойные boreальной

зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 404–409. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-404-409; EDN: UCFYLT

14. Попов А. Г. Первичная интродукция некоторых видов 5-хвойных сосен на юг лесной зоны Западной Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27, № 1–2. С. 169–174. DOI: 10.53374/1993-0135; EDN: NEJQLB

15. Попов А. Г. Состояние экзотов 5-хвойных сосен в условиях юга лесной зоны Западной Сибири // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции, Томск, 15–19 октября 2019 2019. С. 218–219. EDN: YHPIJHC

16. Попов А. Г. Интродуценты ценных 5-хвойных видов сосен в дендроархивах питомника «Кедр» ИМКЭС СО РАН // Мониторинг и оценка состояния растительного мира: материалы VI Международной научной конференции, Минск–Лясковичи, Беларусь, 9–13 октября 2023 г. Издательство: ИВЦ Мінфіна, 2023. С. 83–84. EDN: JTPFEM

17. Widespread genealogical nonmonophyly in species of *Pinus subgenus Strobus* / J. Syring, K. Farrell, R. Businsky et al. // Systematic Biology. 2007. Vol. 56, iss. 2. Pp. 163–181. DOI: 10.1080/10635150701258787

18. Климат Томска / Л. И. Трифонова, И. А. Знаиурская, Л. И. Курыгина и др. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 176 с.

19. Титов Е. В. Развитие мегастробиллов у кедров сибирского // Лесная геоботаника древесных растений. 1982. № 18. С. 136–140. EDN: UZRFJN

20. Забелин И. А. Методика фено-экологических наблюдений над хвойными и опыт применения ее

к кедром и соснам // Бюллетень Никитского ботанического сада. 1934. № 13. 55 с.

21. Гроссет Г. Э. Кедровый стланик. Материалы к изучению и хозяйственному использованию: монография. М.: МОИП, 1959. 143 с.

22. Попов А. Г. Исследование вегетативной совместимости кедровых сосен (кедра европейского, кедрового корейского и кедрового стланика) с местным экотипом кедров сибирского; анализ роста и развития привоев в новых условиях // Рациональное использование природных ресурсов и комплексный экологический мониторинг окружающей среды: материалы Международной школы-семинара, Томск, 14–16 декабря 2006 г. / Под ред. С. Н. Кирпотина. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. С. 127–130. EDN: SMRZEX

23. From phenology to forest management: ecotypes selection can avoid early or late frosts, but not both / R. Silvestro, S. Rossi, S. Zhang et al. // Forest Ecology and Management. 2019. Vol. 436. Pp. 21–26. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.01.005; EDN: WWVRPF

24. Common-garden experiment reveals clinal trends of bud phenology in black spruce populations from a latitudinal gradient in the boreal forest / X. Guo, M. Klisz, R. Puchałka et al. // Journal of Ecology. 2022. Vol. 110, iss. 5. Pp. 1043–1053. DOI: 10.1111/1365-2745.13582; EDN: OSZQIZ

25. The early bud gets the cold: Diverging spring phenology drives exposure to late frost in a *Picea mariana* [(Mill.) BSP] common garden / C. Mura, V. Butto, R. Silvestro et al. // Physiologia Plantarum. 2022. Vol. 174, iss. 6. Art. e13798. DOI: 10.1111/ppl.13798; EDN: WQPEAC

Статья поступила в редакцию 15.01.2025; одобрена после рецензирования 24.02.2025; принята к публикации 03.03.2025

Информация об авторе

ПОПОВ Александр Геннадьевич – младший научный сотрудник лаборатории дендро-экологии, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук. Область научных интересов – межвидовая и внутри-видовая дифференциация по морфологии побегов и структуре кроны, а также интродукция пятихвойных видов сосен. Автор 16 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4343-4557>; SPIN-код: 9774-2965

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 582.475: 581.522.4: 581.6

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.46>

EDN: LEBDJG

The Influence of Late Spring Frosts on the Reproduction of Four 5-Needle Pine Species during their Cultivation in the South of the Forest Zone of Western Siberia

A. G. Popov

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation
popovaleksa@yandex.ru

Abstract. *Introduction.* As is known from the introduction theory, the two necessary conditions for complete acclimatization of a species in its new habitat are the species' resistance and reproducibility. Late spring frosts are the most important factor that causes losses of crops of forest woody species in the south of the forest zone of Western Siberia. In particular, for the valuable local species of Siberian pine *P. sibirica*, the crop production periodicity is directly dependent on the impact of late spring frosts on its generative organs. To date, no similar research has been conducted on the introduction objects of exotic 5-needle pines in this region. Therefore, the present study aims to assess the influence of late spring frosts on the reproductive organs of four 5-needle exotic pine species during their introduction through the vegetative method in subtaiga and the forest zone of south taiga of Western Siberia. *Methods.* Grafting was performed on four-year-old *P. sibirica* rootstocks, with the 3×6 m placement of trees, in nine replications. The study was carried out during seven years after the transition of grafts to the generative stage of ontogenesis. The assessment of spring frost damage to cones was conducted using the following indicators: the average daily sum of effective temperatures, the last frost date, the sum of effective temperatures before the last frost date, the last frost date temperature, and the number of days with temperatures above +5 °C before the last frost date. *Results.* Based on the timing of peak pollen shedding and cone receptivity phases, the species were placed in the order of accumulation of the necessary sum of temperatures depending on their natural habitat conditions: subarctic-subalpine *P. pumila*, mountain-taiga *P. cembra*, nemoral *P. koraiensis*, and *P. strobus* distributed in monsoonal areas of the temperate and subtropical zones. The survivability and resistance of the reproductive organs in 5-needle exotic pine species were found to be higher in the case the final spring frost occurred earlier in May and was combined with a low accumulated sum of effective temperatures along with a relatively small number of days with temperatures above +5 °C before the last frost date. *Conclusion.* The species *P. cembra* and *P. strobus* were resistant to frosts, while *P. pumila* and *P. koraiensis* were less frost resistant, the latter exhibiting a wider range of resistance of its generative structures. The primary reason is related to the cone development timing. For *P. pumila*, the least adversely affected by spring frosts were the western continental and nemoral ecotypes, while for *P. koraiensis* those were ecotypes from the northern part of its native habitat. It is these ecotypes that are recommended to be used in this introduction area while conducting works on their complete acclimatization and further introduction into forestry and landscaping.

Keywords: introduction; vegetative progeny; peak of pollen shedding; receptivity phases; resistance and damageability of generative organs; potential of species and ecotypes

Funding: this study was carried out under the state task of IMCES SB RAS.

For citation: Popov A. G. The Influence of Late Spring Frosts on the Reproduction of Four 5-Needle Pine Species during their Cultivation in the South of the Forest Zone of Western Siberia. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):46–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.46>; EDN: LEBDJG

REFERENCES

1. Lapin P. I., Sidneva S. V. Assessment of the prospects for the introduction of woody plants based on visual observation data. In: *Experience in the introduction of woody plants*. Moscow, MBG AS USSR Publ., 1973:7–68. (In Russ.).
2. Tretyakova I. N. Coniferous embryology. *Monograph*. Novosibirsk, Nauka; 1990. 157 p. (In Russ.).
3. Volkova E. S., Mel'nik M. A. Frosts in southern taiga of Western Siberia as a risk factor for plant production. *Geography and Natural Resources*.

- 2023;(1):67–75. DOI: 10.15372/GIPR20230108; EDN: LKNEJM (In Russ.).
4. Velisevich S. N., Popov A. V., Mel'nik M. A. et al. Influence of late spring light frosts on Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) seed production in changing climate. *Forestry Bulletin*. 2024;28(5): 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152; EDN: EPIGAP (In Russ.).
5. Velisevich S. N., Khutornoy O. V., Popov A. V. The results of 30-year-old monitoring of Siberian stone pine sexual reproduction in relation to climate dynamics. In: *XIII Siberian conference and a school of young scientists on climatic-ecological monitoring*. Abstracts of reports of the Russian conference (Tomsk, October 15–19, 2019). Tomsk, Agaf-Press; 2019:160–161. EDN: RZWFIN (In Russ.).
6. Goroshkevich S. N., Velisevich S. N., Popov A. V. et al. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation. *Plant Ecology and Evolution*. 2021;154(3):321–331. DOI: 10.5091/PLECEVO.2021.1793; EDN: LIQMIQ
7. Lazareva S. M. Brief results of coniferous plants introduction in the Botanic Garden of Mari State Technical University. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2004;(5):25–32. EDN: ICGSMN (In Russ.).
8. Trofimuk L. P., Puzansky R. K., Karamysheva A. V. Results *Pinus pumila* (*Pinaceae*) introduction in the Karelian Isthmus. *Rastitelnye Resursy*. 2021; 57(3):245–259. DOI: 10.31857/S0033994621030092; EDN: VYLJHM (In Russ.).
9. Ivolina G. V., Zhuk E. A. Siberian dwarf pine cultivation of different geographical provenance in Western Siberia. *Forestry Bulletin*. 2024;28(6):18–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-18-27; EDN: GLWESG (In Russ.).
10. Lazareva S. M. Use of techniques of data processing in phenological observations (on the example of *Pinaceae* Lindl.). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Biology. Ecology"* 2011;4(2): 56–65. EDN: NXQRXH (In Russ.).
11. Levin S. V. Korean cedar (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) seed production during its introduction in Voronezh Region forest-steppe. *Forestry Bulletin*. 2023;27(3):36–47. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-36-47; EDN: CAVORF (In Russ.).
12. Lazareva S. M., Kotov M. M., Kotova L. I. Coniferous introducents of the Republic of Mari El. Saint Petersburg, Renome; 2002. 136 p. (In Russ.).
13. Titov E. V. History of cultivation and prospects of pine pine nuts in Eastern Europe. *Conifers of the Boreal Area*. 2022; 40(5):404–409. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-404-409; EDN: UCFYLT (In Russ.).
14. Popov A. G. The initial introduction of some 5-needle pine species on the south forest part of Western Siberia. *Conifers of the Boreal Area*. 2010;27(1-2): 169–174. DOI: 10.53374/1993-0135; EDN: NEJQLB (In Russ.).
15. Popov A. G. State of 5-needle exotic pines in the south forest zone of Western Siberia condition. *XIII Siberian conference and a school on climatic-ecological monitoring for young scientists*. Abstracts of reports of the Russian conference (Tomsk, October 15–19, 2019). Tomsk: Agaf-Press; 2019:218–219. EDN: YHPJHC (In Russ.).
16. Popov A. G. Valuable introduced plants of 5-needle exotic pine species in the dendrological archives of “Cedar” nursery IMCES SB RAS. In: *Monitoring and assessment of the state of the plant world*. Materials of VI International scientific conference (Minsk–Lyaskovichi, Belarus, October 9–13, 2023). Minsk: IVTS Minfina Publ.; 2023:83–84. EDN: JTPFEM (In Russ.).
17. Syring J., Farrell K., Businsky R. et al. Widespread genealogical nonmonophyly in species of *Pinus* subgenus *Strobus*. *Systematic Biology*. 2007; 56(2):163–181. DOI: 10.1080/10635150701258787
18. Trifonova L. I., Iznairskaya I. A., Kurygina L. I. et al. Climate of Tomsk. Leningrad, Gidrometeoizdat; 1982. 176 p. (In Russ.).
19. Titov E. V. Megastrobiles development in Siberian stone pine. *Forest Geobotany of Woody Plants*. 1982;(18):136–140. EDN: UZRFJN (In Russ.).
20. Zabelin I. A. Method of phenological and ecological observations over a conifers and experience of its application to cedar and pine trees. *Nikitsky Botanical Garden Bulletin*. 1934;(13):55. (In Russ.).
21. Grosset H. E. *Pinus pumila* (Pall.) Rgl. Materials on its biological study and economical utilization. *Monograph*. Moscow, Moscow Society of Naturalists; 1959. 143 p. (In Russ.).
22. Popov A. G. Investigation of the vegetation compatibility of stone pines (Cembra pine, Korean stone pine and Japanese stone pine) with the local Siberian stone pine ecotype; the analysis of growth and development of grafts in the new environment. In: *Rational use of natural resources and comprehensive ecological monitoring of environment*. Materials of the International school-seminar (Tomsk, December 14–16, 2006). Kirpotin S.N. (Ed.). Tomsk, TPU Publ.; 2006:127–130. EDN: SMRZEX (In Russ.).
23. Silvestro R., Rossi S., Zhang S. et al. From phenology to forest management: ecotypes selection can avoid early or late frosts, but not both. *Forest Ecology and Management*. 2019;436:21–26. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.01.005; EDN: WWVRPF
24. Guo X., Klisz M., Puchałka R. et al. Common-garden experiment reveals clinal trends of bud phenology in black spruce populations from a latitudinal gradient in the boreal forest. *Journal of Ecology*. 2022; 110(5):1043–1053. DOI: 10.1111/1365-2745.13582; EDN: OSZQIZ
25. Mura C., Buttò V., Silvestro R. et al. The early bud gets the cold: Diverging spring phenology drives

exposure to late frost in a *Picea mariana* [(Mill.) 2022;174(6):e13798. DOI: 10.1111/pp1.13798; EDN: BSP] common garden. *Physiologia Plantarum*. WQPEAC

The article was submitted 15.01.2025; approved after reviewing 24.02.2025;
accepted for publication 03.03.2025

Information about the author

Alexander G. Popov – Research Assistant at the Laboratory of Dendroecology, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests – inter- and intra-specific differentiation by shoots morphology and crone structure, introduction of 5-needle pine species. Author of 16 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4343-4557>; SPIN: 9774-2965

Conflict of interests: the author declare no conflict of interest.
The author has read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Научная статья

УДК 630*36

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>

EDN: NAFMUI

Моделирование динамической нагруженности анкерного каната при работе харвестера на крутом склоне

А. В. Лагерев, А. В. Макулина ✉

Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского,

Российская Федерация, 241036, Брянск, ул. Бежицкая, 14

inno-bgu@yandex.ru ✉

Аннотация. *Введение.* Расширение сферы безопасной механизированной лесозаготовки требует адаптации лесохозяйственной техники к эксплуатации лесосек с большими углами наклона на основе разработки новых конструктивных систем, машин и механизмов для решения указанной проблемы. Однако вопросы проектирования и моделирования рабочих процессов машин для лесозаготовки в условиях сильно пересечённой холмистой местности с крутыми склонами в настоящее время исследованы недостаточно. Известные исследования носят, в основном, экспериментальный характер. *Целью* исследования является разработка динамической математической модели канатной анкерной системы как структурного компонента безопасности колёсного харвестера. *Объекты и методы* исследования. Объект – канатная анкерная система. Для построения системы дифференциальных уравнений движения центров масс основных конструктивных компонентов харвестера и анкерной системы использовался метод Лагранжа II рода. *Результаты.* Применительно к трёхосному харвестеру с колёсной формулой 6К6 выполнены расчёты колебательных процессов динамических параметров, определяющих нагруженность анкерной системы и безопасность эксплуатации харвестера в процессе манипулирования сортиментом. *Выводы.* Динамическая модель позволяет учесть и провести системный анализ большого числа количественных конструктивных и режимных параметров харвестера и физико-механических свойств грунтов, которые характеризуют динамическое поведение и нагруженность как структурных элементов анкерной системы, так и самого харвестера. Перспективным направлением её дальнейшего использования является разработка практических рекомендаций по проектированию эффективных и надёжных канатных анкерных систем.

Ключевые слова: лесозаготовка на склоне; колёсный харвестер; динамическая модель; динамические параметры

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Лагерев А. В., Макулина А. В. Моделирование динамической нагруженности анкерного каната при работе харвестера на крутом склоне // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 61–72. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>; EDN: NAFMUI

Введение

В современных условиях в связи с истощением традиционных источников отмечается повышение сложности добычи природных ресурсов. Это относится не

только к добыче энергоносителей (газ, нефть, уголь), но и к заготовке леса [1]. В настоящее время значительные территории лесозаготовки расположены в горной и холмистой местности, характеризующейся

сложным природным рельефом с наличием склонов повышенной крутизны [2, 3]. Такая ситуация характерна как для проведения лесозаготовительных работ на территории Российской Федерации [4], так и стран ближнего и дальнего зарубежья [5].

Механизированная заготовка древесины на склонах имеет свои очевидные технические и технологические сложности, обусловленные необходимостью комплексного решения двуединой задачи – эффективного проведения лесозаготовительных работ наряду с эффективной защитой экологически уязвимых лесных экосистем и обеспечением безопасности работы персонала лесохозяйственных предприятий [2]. Однако механизированная лесозаготовка на территориях с крутыми склонами в настоящее время имеет достаточно широкое распространение [1, 6]. Для заготовки древесины на таких территориях со сложным рельефом используются харвестеры и форвардеры, оснащённые канатными элементами для закрепления на склонах, позиционирования рабочего органа и вывоза древесины [3, 7].

По данным исследования [8], в котором был дан сравнительный анализ природных условий, характерных для приоритетного использования механизированной и ручной лесозаготовки на горных территориях, даже при наличии достаточно крутых склонов и необходимости применения специальных анкерных устройств и систем для удержания лесных машин от самопроизвольного перемещения под действием собственного веса, механизированная лесозаготовка оказывается более предпочтительной. Тем не менее, она, как правило, ограничивается участками с умеренным уклоном, при котором либо полностью отсутствует необходимость в дополнительной анкерровке работающей лесозаготовительной машины, либо уклон незначительно превышает допустимое значение и требуется анкерровка со сравнительно небольшой нагрузочной способностью [9]. По имеющимся опытным данным [10, 11],

допустимое значение уклона опорной поверхности зависит от ряда факторов, таких как категория грунта, степень его влажности и уплотнения, наличие и состав почвенной растительности, технические характеристики шасси и вес машины. Ручная лесозаготовка оказывается экономически оправданной либо при весьма больших углах наклона опорной поверхности, которые пока превышают технические возможности современных машин для лесозаготовки, либо при выраженном скалистом рельефе местности.

По мнению ряда исследователей [12], перспективным направлением дальнейшего развития механизированной лесозаготовки в горных районах является её расширение на территории со склонами большей крутизны, так это оказывается целесообразным мероприятием как с точки зрения снижения экономических затрат на добычу древесины и её транспортирование до конечного потребителя, так и с точки зрения снижения уровня травматизма среди рабочих-лесорубов [13]. Указанная задача предусматривает модернизацию современных конструкций лесохозяйственной техники с целью их адаптации к более тяжёлым условиям эксплуатации. Условием её реализации является проведение широкого комплекса эмпирических и теоретических исследований, результаты которых формируют научный фундамент для последующей разработки новых специализированных машин и систем [5].

С целью удержания харвестеров при работе на крутых склонах, величина уклона которых превышает допустимое значение по условию самопроизвольного перемещения машины, в настоящее время используются канатные анкерные системы – статические (естественный анкер – дерево или пень с требуемыми характеристиками прочности и сопротивлением выкорчёвыванию [14]) и динамические (искусственный анкер – мобильная техника, например, трактор [15]).

Актуальность исследования обусловлена тем, что вопросы проектирования и мо-

делирования рабочих процессов машин, снабжённых канатными анкерными системами для лесозаготовки в условиях сильно пересечённой холмистой местности с крутыми склонами, в настоящее время исследованы недостаточно. Известные исследования основаны преимущественно на экспериментальном подходе путём регистрации статического или динамического поведения параметров анкерной системы в процессе работы харвестера в натуральных условиях эксплуатации [16, 17]. Однако для создания адекватных методов проектирования анкерных систем одних экспериментальных данных оказывается недостаточно, так как они по своей природе носят ограниченный, частный характер и не дают необходимой всесторонней информации о направленности и степени индивидуально-го или коллективного влияния тех конструктивных и режимных параметров, которые формируют нагруженность анкерной системы работающего харвестера и, в конечном итоге, определяют безопасность проведения лесозаготовки на крутых склонах. Указанная методическая ограниченность экспериментальных исследований может быть преодолена только на основе использования современных методов математического моделирования в сочетании с высокопроизводительными компьютерами, что позволяет создавать сложные динамические модели рабочих процессов с учётом большого числа значимых количественных параметров.

Целью исследования является разработка динамической математической модели канатной анкерной системы как структурного компонента безопасности колёсного харвестера.

Объект и методы исследования

Объект – канатная анкерная система, включающая следующие основные структурные элементы: установленную на несущей раме харвестера анкерную лебёдку, анкерный канат переменной длины и анкерное дерево.

Для построения системы дифференциальных уравнений движения центров масс основных конструктивных компонентов харвестера и анкерной системы использовался метод Лагранжа II рода. Для интегрирования системы из 70-ти дифференциальных уравнений I порядка с учётом начальных условий использовался метод Рунге–Кутты IV порядка.

Математическая модель анкерного каната

При работе анкерной системы харвестера наблюдается естественное провисание осевой линии анкерного каната (рис. 1) в пролёте длиной L_r между точкой K его крепления к анкерной лебёдке и точкой L крепления к анкерному дереву. С учётом исследований [18, 19] применительно к ситуации расположения харвестера на крутом склоне, в зависимости от перепада высот расположения точек K и L и осевого усилия предварительного натяжения анкерного каната $S_{r,0}$, может реализовываться одна из двух форм естественного провисания:

форма I – максимальное провисание каната наблюдается в сечении, расположенном в пролёте между опорными точками K и L на расстоянии a и b этих точек (рис. 1, а);

форма II – максимальное провисание каната находится за пределами пролёта (рис. 1, б).

Расстояния a и b выражаются зависимостями:

$$a = \frac{1}{2} \left(L_r \cos \alpha_s - \frac{S_{r,0}}{g_r} \cdot \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right); \quad (1)$$

$$b = \frac{1}{2} \left(L_r \cos \alpha_s + \frac{S_{r,0}}{g_r} \cdot \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right); \quad (2)$$

где $S_{r,0}$ – продольное усилие натяжения анкерного каната [12], Н.

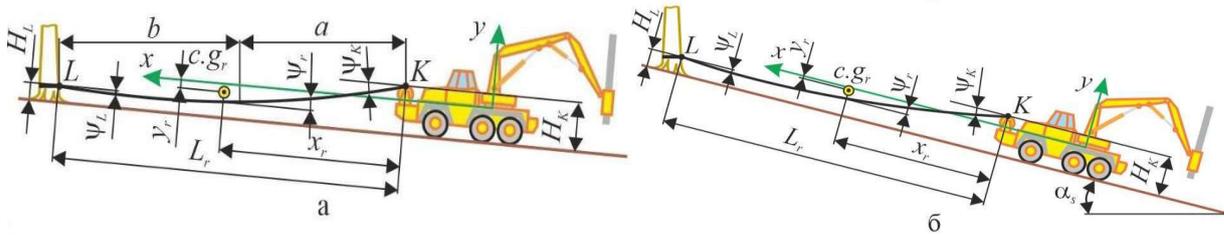


Рис. 1. Возможные формы естественного провисания анкерного каната: а – форма I; б – форма II
 Fig. 1. Possible forms of natural sagging of the anchor rope: a – form I; b – form II

Между осевым усилием предварительного натяжения анкерного каната S_{r0} и продольным усилием $S_{r,l0}$ существует однозначное соответствие [20]. При известном значении S_{r0} , которое может быть определено динамометром вблизи точки сбегания каната с обечайки анкерной лебёдки (точки K), значение $S_{r,l0}$ находится решением нелинейного уравнения:

– при форме I провисания каната

$$S_{r0} \cos \left[\arctg \left(\frac{g_r a}{S_{r,l0}} \right) \right] - S_{r,l0} = 0; \quad (3)$$

– при форме II провисания каната

$$S_{r0} \cos \left[\arctg \left(\operatorname{tg} \alpha_s - \frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{S_{r,l0}} \right) \right] - S_{r,l0} = 0. \quad (4)$$

Так как форма провисания каната заранее неизвестна, требуется использование обоих указанных нелинейных уравнений с дальнейшим определением реализуемой для вычисленных $S_{r,l0}$ формы провисания. Граничный угол наклона поверхности грунта, определяющий реализующуюся форму провисания анкерного каната, с учётом [21] выражается зависимостью:

$$[\alpha_s]_t = \arctg \left(\frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{S_{r,l0}} \right). \quad (5)$$

При $[\alpha_s]_t > \alpha_s$ реализуется форма I, при $[\alpha_s]_t < \alpha_s$ – форма II.

Форма I характеризуется большим провисанием анкерного каната, чем форма II, поэтому она определяет минимально возможное усилие предварительного натяжения анкерного каната, которое необходимо создать с помощью анкерной лебёдки, чтобы обеспечить гарантированное расположение каната над опорной поверхностью грунта по всей длине пролёта длиной L_r без их соприкосновения.

Расчётная схема, предназначенная для определения минимального продольного усилия натяжения анкерного каната $[S_{r,l}]_{\min}$, которое обеспечивает его естественное провисание в статическом состоянии (т. е. без учёта вертикальных колебаний анкерного каната в процессе работы харвестера), приведена на рис. 2.

Искомое усилие $[S_{r,l}]_{\min}$ находится из условия

$$H_K - \frac{g_r a^2}{[S_{r,l}]_{\min}} = a \operatorname{tg} \alpha_s + [H_r] \quad (6)$$

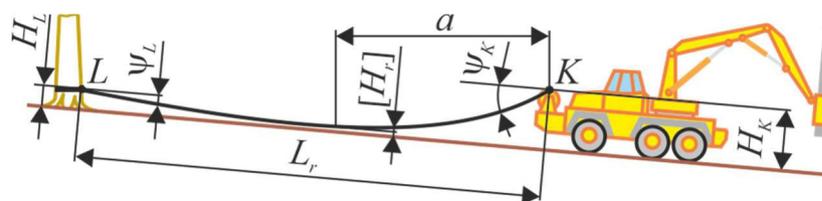


Рис. 2. Расчётная схема для определения минимального усилия натяжения анкерного каната
 Fig. 2. Calculation scheme for determining the minimum tension force of the anchor rope

путём решения нелинейного уравнения

$$4(H_K - [H_r]) - \left(L_r \cos \alpha_s \frac{[S_{r,l}]_{\min} L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{g_r L_r \cos \alpha_s} \right) \times \left[\frac{g_r}{[S_{r,l}]_{\min}} \left(L_r \cos \alpha_s \frac{[S_{r,l}]_{\min} L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{g_r L_r \cos \alpha_s} \right) + 2tg \alpha_s \right] = 0, \quad (7)$$

где $[H_r]$ – минимально допустимое приближение анкерного каната к поверхности грунта, м.

Тогда минимальное осевое усилие натяжения анкерного каната $[S_r]_{\min}$ в точке K будет составлять

$$[S_r]_{\min} = [S_{r,l}]_{\min} \cos^{-1} \left[\arctg \left(\frac{g_r a}{[S_{r,l}]_{\min}} \right) \right]. \quad (8)$$

Принимаемые при работе харвестера осевое и продольное усилия натяжения анкерного каната должны удовлетворять условиям

$$S_{r,0} > [S_r]_{\min}; \quad (9)$$

$$S_{r,l,0} > [S_{r,l}]_{\min}. \quad (10)$$

Если при работе харвестера реализуется форма I естественного провисания анкерного каната, то углы наклона его осевой линии в характерных точках составляют:

– в точке K крепления к анкерной лебёдке

$$\psi_K = \arctg \left[\frac{g_r}{2S_{r,l,0}} \left(L_r \cos \alpha_s - \frac{S_{r,l,0} L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{g_r L_r \cos \alpha_s} \right) \right] - \alpha_s; \quad (11)$$

– в точке L крепления к анкерному дереву

$$\psi_L = \arctg \left[\frac{g_r}{2S_{r,l,0}} \left(L_r \cos \alpha_s + \frac{S_{r,l,0} L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{g_r L_r \cos \alpha_s} \right) \right] - \alpha_s. \quad (12)$$

Если при работе харвестера реализуется форма II естественного провисания анкерного каната, то углы наклона его осевой линии в характерных точках составляют:

– в точке K крепления к анкерной лебёдке

$$\psi_K = \arctg \left(\frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} - \frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{2S_{r,l,0}} \right) - \alpha_s; \quad (13)$$

– в точке L крепления к анкерному дереву

$$\psi_L = \arctg \left(\frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} + \frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{2S_{r,l,0}} \right) - \alpha_s. \quad (14)$$

Коэффициент естественного провисания анкерного каната, характеризующий увеличение его длины в пролёте, определяется зависимостями:

– при форме I провисания каната

$$k_r = a \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{g_r a}{2S_{r,l,0}} \right)^2 \right] + b \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{g_r b}{2S_{r,l,0}} \right)^2 \right]; \quad (15)$$

– при форме II провисания каната

$$k_r = 1 + \frac{1}{6} \left(\frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{2S_{r,l,0}} \right)^2. \quad (16)$$

В произвольный момент времени τ осевое усилие натяжения анкерного каната $S_r(\tau)$ определяется соотношением

$$S_r(\tau) = S_{r,0} + c_r \left[\frac{q_{35}(\tau)}{\cos \psi_L} - \frac{q_{32}(\tau)}{\cos \psi_K} \right]. \quad (17)$$

Для определения пространственного положения центра масс анкерного каната используется расчётная схема, показанная на рис. 3. По аналогии с алгоритмом определения центра тяжести однородной нити постоянного поперечного сечения и погонного веса [22] анкерный канат по всей длине разобьём на I последовательно расположенных участков.

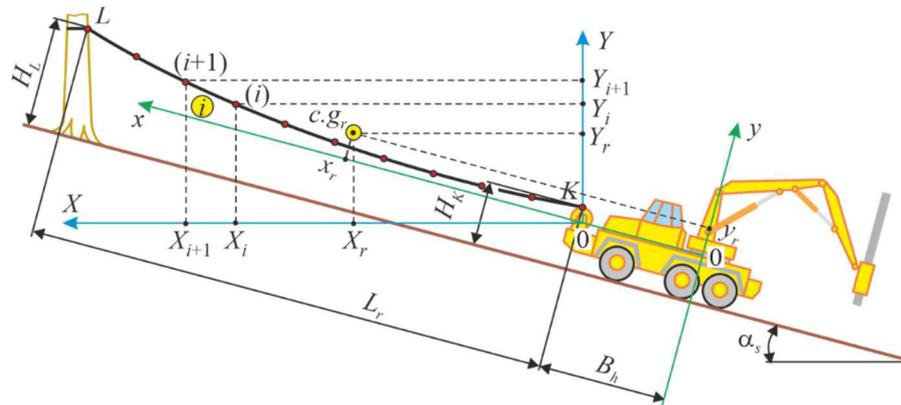


Рис. 3. Расчётная схема для определения пространственного положения центра масс анкерного каната
 Fig. 3. Calculation scheme for determining the spatial position of the mass center of the anchor rope

Положение произвольного i -го характеризуется координатами в системе координат XOY : левая граница в точке (i) – $(X_i; Y_i)$, правая граница в точке $(i+1)$ – $(X_{i+1}; Y_{i+1})$. Координаты указанных граничных точек определяются с учётом естественного провисания анкерного каната, испытывающего растяжение усилием натяжения каната S_r :

$$X_i = (i - 1)\Delta X; \quad (18)$$

$$X_{i+1} = i\Delta X = X_i + \Delta X; \quad (19)$$

– при форме I естественного провисания анкерного каната

$$Y_i = \frac{H_K}{\cos \alpha_s} - \frac{g_r X_i^2}{S_r}, \text{ если } X_i \leq a; \quad (20)$$

$$Y_i = \frac{H_K}{\cos \alpha_s} + \frac{g_r X_i (X_i - 2a)}{S_r}, \text{ если } X_i > a; \quad (21)$$

– при форме II естественного провисания анкерного каната

$$Y_i = \frac{H_K}{\cos \alpha_s} + \left[\operatorname{tg} \alpha_s - \frac{g_r}{2S_r} (L_r \cos \alpha_s - X_i) \right] X_i, \quad (22)$$

где ΔX – шаг разбиения анкерного каната на отдельные участки по координатной оси X , м.

Координаты центра масс анкерного каната в системе координат XOY определяются зависимостями:

$$X_r = \frac{\sum_{i=1}^{i=l} (X_i + 0,5\Delta X) \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{\sum_{i=1}^{i=l} \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}; \quad (23)$$

$$Y_r = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{i=l} (Y_i + Y_{i+1}) \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{\sum_{i=1}^{i=l} \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}, \quad (24)$$

а в системе координат харвестера $x0y$ – зависимостями:

$$x_r = (Y_r - X_r \operatorname{tg} \alpha_s - H_K) \sin \alpha_s + \frac{X_r}{\cos \alpha_s} + B_h; \quad (25)$$

$$y_r = (Y_r - X_r \operatorname{tg} \alpha_s) \cos \alpha_s. \quad (26)$$

Результаты и их обсуждение

Представленная выше математическая модель анкерного каната была включена в качестве самостоятельного компонента в общую структуру комплексной динамической 12-ти массовой модели шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» с 35-ю степенями свободы [23]. Применительно к трёхосному колёсному харвестеру с колёсной формулой 6К6 и неразрезной несущей рамой была реализована в компьютерной программе «Динамика харвестера с анкерным канатом при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне» [24].

Результатом выполнения компьютерной программы является нахождение с постоянным шагом $\Delta \tau$ законов изменения во

времени динамических параметров указанной шестикомпонентной системы на протяжении временного интервала технологической операции манипулирования сортиментом. В число определяемых в дискретные моменты времени динамических параметров входят: пространственное положение, скорость и ускорение 35-ти перемещений и углов поворота характерных точек конструкции харвестера, манипулятора, харвестерной головки и анкерной системы, усилие натяжения и напряжение растяжения анкерного каната, коэффициенты запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию и запаса работоспособности харвестера по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево и др.

С целью анализа направленности и степени влияния основных технических характеристик харвестера и анкерной системы на ключевые динамические параметры моделируемой шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» в качестве базового варианта был принят вариант харвестера с колёсной формулой 6К6, в качестве прототипа которого использовался колёсный харвестер Амкодор 2562 [25].

Было принято, что харвестер эксплуатируется на склоне крутизной 40° , грунт которого соответствует коэффициенту сопротивления скольжению заторможенных колёс харвестера, равному 0,4. В этом слу-

чае допустимое значение уклона, при котором не требуется анкеровка, составляет не более $28,6^\circ$ (теоретически), а с учётом 20 %-го запаса безопасности – не более $22,1^\circ$. Таким образом, анкерная система имеет существенный уровень динамической нагруженности: осевое усилие предварительного натяжения анкерного каната типа ЛК-Р ГОСТ 2688-80 маркировочной группы 1960 МПа с разрывным усилием 137 кН и диаметром 15 мм составляет 50,2 кН. Рассматривался один цикл работы четырёхзвенного манипулятора по перемещению сортиmenta весом 3 кН от места спиливания дерева на продольной оси харвестера до места складирования перпендикулярно продольной оси. Продолжительность цикла составляла 8 с, в перемещении сортиmenta участвовали все звенья манипулятора. На рис. 4 показаны графики изменения во времени модуля и проекций эксплуатационных сил, действующих на харвестерную головку во время перемещения сортиmenta.

На рис. 5 показана динамика ряда параметров, которые характеризуют динамическую нагруженность канатной анкерной системы в течение интервала времени с максимальным уровнем действующей эксплуатационной нагрузки на харвестерную головку (рис. 4). В связи с малым временным шагом при интегрировании системы дифференциальных уравнений на этом рисунке приведены результаты расчёта временного интервала длительностью 0,05 с.

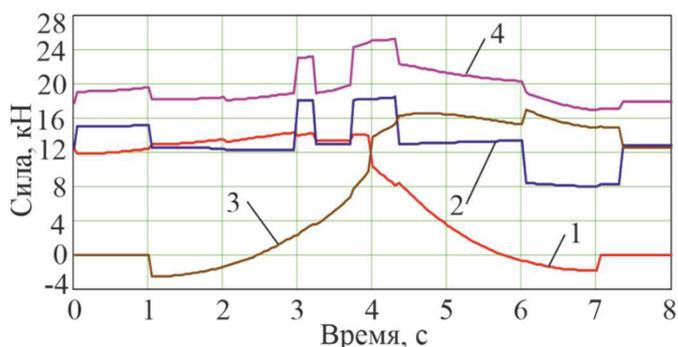


Рис. 4. Графики изменения во времени модуля и проекций сил, действующих на харвестерную головку:

1 – проекция на ось x; 2 – проекция на ось y; 3 – проекция на ось z; 4 – модуль сил

Fig. 4. Graphs of time variation of the module and projections of forces acting on the harvester head:

1 – projection on the x-axis; 2 – projection on the y-axis; 3 – projection on the z-axis; 4 – modulus of forces

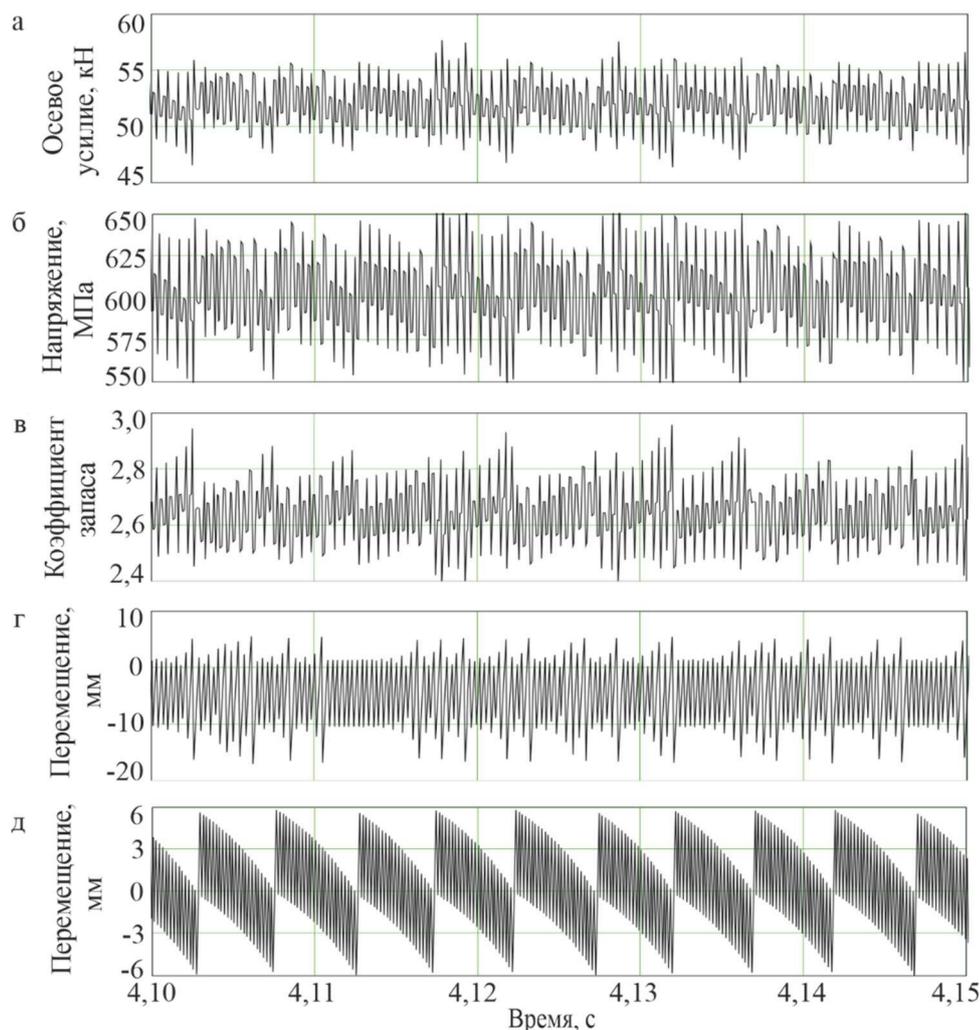


Рис. 5. Динамика параметров нагруженности канатной анкерной системы: а – осевое усилие натяжения анкерного каната; б – напряжение растяжения анкерного каната; в – коэффициент запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию; г – перемещение центра масс анкерной лебёдки; д – перемещение центра масс анкерного дерева

Fig. 5. Dynamics of loading parameters of the rope anchor system: a – axial tension force of the anchor rope; b – tension stress of the anchor rope; c – safety margin of the anchor rope by breaking force; d – displacement of the mass center of the anchor winch; e – displacement of the mass center of the anchor tree

Практически анкеровку работающего харвестера необходимо проводить при углах наклона более $16...25^\circ$, что обеспечивает коэффициент безопасности по допустимому углу на уровне $1,2...1,5$. Увеличение угла наклона опорной поверхности требует увеличения предварительного натяжения анкерного каната, определяемого коэффициентом сопротивления скольжению колёс по грунту и весом харвестера. С ростом угла и усилия натяжения изначально регулярный вид колебательного процесса количественных параметров динамической системы становится всё более

нерегулярным с появлением дополнительных промежуточных амплитуд колебаний с меньшими размахами. Диаметр анкерного каната оказывает влияние на динамические параметры самого каната (нагруженность, коэффициенты запаса прочности по разрывному усилию и работоспособности харвестера по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево) и не влияет на другие параметры анкерной системы и харвестера.

Выводы

Динамическая математическая модель анкерного каната, включённая в общую

структуру комплексной динамической 12-тикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт», позволяет учесть и провести системный анализ большого числа количественных конструктивных и режимных параметров харвестера при его работе на крутом склоне и физико-механических свойств грунтов, которые характеризуют динамическое поведение и нагруженность как структурных элементов анкерной системы, так и самого харвестера. Таким образом, на стадиях проектирования и эксплуатации канатных анкерных систем харвестеров возможно количественно оценивать их ключевые

технические характеристики при работе на склонах повышенной крутизны, для которых в обязательном порядке требуется использование специальных систем безопасности. Сформулированные на основе научно обоснованных результатов моделирования динамической шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» рекомендации дают возможность рационального выбора основных технических характеристик анкерной системы, включая выбор типоразмеров анкерных канатов и рациональной величины их натяжения, выбор безопасных размеров анкерных деревьев на этапе эксплуатации харвестера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Can nature conservation and wood production be reconciled in managed forests? A review of driving factors for integrated forest management in Europe / F. Aggestam, A. Konczal, M. Sotirov et al. // *Journal of Environment Management*. 2020. Vol. 268, iss. 9. Art. 110670. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110670
2. *Naillon T., Rappin C.* Best management and operating practices for steep slope machine logging. Technical Report No.: 98-02-2019. Safety and Health Assessment and Research for Prevention Program. WA: Washington state department of labor & industries, 2019. 46 p.
3. Лесозаготовительные машины для работы на склонах / И. Григорьев, О. Куницкая, С. Рудов и др. // *Бюллетень ассоциации Лестех*. 2020. № 2 (2). С. 4–9. EDN: ORQYUO
4. Машинная заготовка древесины на горных лесосеках / В. А. Каляшов, Д. Т. Ань, О. И. Григорьева и др. // *ЛесПромИнформ*. 2022. № 5. С. 82–83.
5. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology / A. McEwan, E. Marchi, R. Spinelli et al. // *Journal of Forest Research*. 2020. Vol. 31, iss. 2. Pp. 339–351. DOI: 10.1007/s11676-019-01019-3
6. *Bont L., Heinemann H. R.* Optimum geometric layout of a single cable road // *European Journal of Forest Research*. 2012. Vol. 131, iss. 5. Pp. 1439–1448. DOI: 10.1007/s10342-012-0612-y
7. *Visser R., Stampfer K.* Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2015. Vol. 36, iss. 2. Pp. 321–331.
8. Assessment of timber faller working conditions in mixed hand and tethered-machine cut harvest units on steep slopes – A case study in western Oregon / M. Pokharel, F. Belart, W. Chung et al. // *International Journal of Forest Engineering*. 2023. Vol. 34, iss. 3. Pp. 408–416. DOI: 10.1080/14942119.2023.2170149
9. Development and benefits of winch-assist harvesting / T. Holzfeind, R. Visser, W. Chung et al. // *Current Forestry Reports*. 2020. Vol. 6, iss. 3-4. Pp. 201–209. DOI: 10.1007/s40725-020-00121-8
10. *Kováč J., Remper M., Krilek J.* Analysis of the frictional coefficient at the pulling load on the tilted plane // *Acta Facultatis Technicae*. 2011. Vol. 16, iss. 1. Pp. 65–72.
11. *Berkett H., Visser R.* Measuring slope of forestry machines on steep terrain. Harvesting Technical Note HTN05-02. Rotorua, NZ: Future Forests Research Ltd, 2012. 8 p.
12. Benchmarking operational conditions, productivity, and costs of harvesting from industrial plantations in different global regions / F. Di Fulvio, M. Acuna, P. Ackerman et al. // *International Journal of Forest Engineering*. 2024. Vol. 35, iss. 2. Pp. 225–250. DOI: 10.1080/14942119.2023.2296789
13. *Green P.* Insight into the productivity, cost and soil impacts of a cable-assisted harvester forwarder thinning in western Oregon. Corvallis: Oregon State University, 2019. 125 p.
14. *Lundbäck M., Häggström C., Nordfjell T.* Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood // *International Journal of Forest Engineering*. 2021. Vol. 32, iss. 3. Pp. 202–215. DOI: 10.1080/14942119.2021.1906617
15. The analysis of the new conception transportation cableway system based on the tractor equipment / P. Beňo, J. Krilek, J. Kováč et al. // *FME Transactions*. 2018. Vol. 46, iss. 1. Pp. 17–22. DOI: 10.5937/fmet1801017B

16. Monitoring cable tensile forces of winch-assist harvester and forwarder operations in steep terrain / F. Holzleitner, M. Kastner, K. Stampfer et al. // *Forests*. 2018. Vol. 9, iss. 2. Art. 53. DOI: 10.3390/f9020053
17. Field and laboratory research of the rut development process on forest roads / O. Machuga, A. Shchupak, O. Styranivskiy et al. // *Forests*. 2024. Vol. 15, iss. 1. Art. 74. DOI: 10.3390/f15010074
18. *Лагерев А. В., Лагерев И. А., Таричко В. И.* Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов: монография. Брянск: Брянский государственный университет, 2022. 207 с.
19. *Lagerev A. V., Lagerev I. A.* Design of passenger aerial ropeway for urban environment // *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5, iss. 1. Pp. 17–28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z; EDN: WUVCOS
20. *Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Шнейдерович Р. М.* Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 616 с.
21. *Лагерев А. В., Лагерев И. А., Таричко В. И.* Определение усилий натяжения канатов при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 3. С. 194–210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210; EDN: EVLPWZ
22. *Яблонский А. А.* Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика. М.: Высшая школа, 1977. 430 с.
23. *Лагерев А. В., Лагерев И. А., Макулина А. В.* Динамическая модель харвестера, оснащенного канатной анкерной системой, при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2024. № 3. С. 188–206. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-188-206; EDN: HPDZDV
24. Динамика харвестера с анкерным канатом при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне: свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Лагерев И. А., Лагерев А. В., Макулина А. В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 2024668708; заявл. 22.07.24; опубл. 09.08.24. Бюл. 8. EDN: LNQHBT
25. *Федоренчик А. С., Герман А. А., Протас П. А.* Лесные машины «Амкодор». Минск: БГТУ, 2013. 240 с.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 03.03.2025

Информация об авторах

ЛАГЕРЕВ Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры профессионально-технологического образования и безопасности жизнедеятельности, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского. Область научных интересов – оптимальное проектирование, моделирование рабочих процессов, анализ динамики и прочности транспортно-технологических машин различного назначения и мобильных канатных систем. Автор 480 научных публикаций, в том числе 27 монографий, 100 патентов и свидетельств РФ на результаты интеллектуальной деятельности. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>; SPIN-код: 6518-8902

МАКУЛИНА Анна Васильевна – ассистент кафедры информатики и прикладной математики, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского. Область научных интересов – моделирование рабочих процессов при эксплуатации лесохозяйственных машин на крутых склонах. Автор 50 научных публикаций, в том числе пяти свидетельств РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>; SPIN-код: 7546-0990

Вклад авторов:

Лагерев А.В. – научное руководство исследованием, разработка динамической математической модели, интерпретация и анализ результатов расчётов.

Макулина А.В. – компьютерная реализация динамической математической модели, проведение расчётов, интерпретация и анализ результатов расчётов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*36

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>

EDN: NAFMUI

Simulation of Dynamic Loading of an Anchor Rope during Harvester Operation on a Steep Slope*A. V. Lagerev, A. V. Makulina* ✉Bryansk State Academician I.G. Petrovski University,
14, Bezhitskaya St., Bryansk, 241036, Russian Federation
inno-bgu@yandex.ru ✉

Abstract. *Introduction.* The expansion of the scope of safe mechanized logging requires adaptation of forestry equipment to operations in cutting areas with large inclination angles, which, in turn, necessitates the development of new design systems, machines, and mechanisms for solving this problem. However, there is a lack of research on designing and modeling work processes for logging machines in rugged hilly terrain with steep slopes. Known studies are mainly of experimental nature. *The purpose of the study* is to create a dynamic mathematical model of a rope anchor system, which is a crucial structural component for the safety of wheeled harvesters. *Objects and methods.* The object of this study is a rope anchor system. The Lagrange method of the second kind was used to construct a system of differential equations for the motion of the mass centers of the main structural components of the harvester and the anchor system. *Results.* In relation to a three-axle harvester with a 6K6 wheel formula, calculations have been performed to determine the oscillatory processes and dynamic parameters that affect the load on the anchor system and the safety of the harvester's operation during sorting. *Conclusion.* The dynamic model makes it possible to take into account and systematically analyze a large number of quantitative design and operational parameters of the harvester, as well as the physical and mechanical properties of the soil, which characterize the dynamic behavior and loading on both the structural elements of the anchor system and the harvester itself. One promising direction for further use of this model is the development of practical recommendations for designing efficient and reliable rope anchor systems.

Keywords: logging on the slope; wheel harvester; dynamic model; dynamic parameters

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Lagerev A. V., Makulina A. V. Simulation of Dynamic Loading of an Anchor Rope during Harvester Operation on a Steep Slope. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):61–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>; EDN: NAFMUI

REFERENCES

1. Aggestam F., Konczal A., Sotirov M. et al. Can nature conservation and wood production be reconciled in managed forests? A review of driving factors for integrated forest management in Europe. *Journal of Environment Management.* 2020;268(9):110670. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110670
2. Naillon T., Rappin C. Best management and operating practices for steep slope machine logging. Technical Report No.: 98-02-2019. Olympia, Safety and Health Assessment and Research for Prevention Program, Washington State Department of Labor & Industries; 2019. 46 p.
3. Grigoriev I., Kunitskaya O., Rudov S. et al. Logging machines for working on slopes. *Bulletin of the LESTECH Association.* 2020;(2(2)):4–9. EDN: ORQYUO (In Russ.).
4. Kalyashov V. A., An D. T., Grigorieva O. I. Machine harvesting of wood in mountain logging areas. *LesPromInform.* 2022;(5):82–83. (In Russ.).
5. McEwan A., Marchi E., Spinelli R. et al. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *Journal of Forest Research.* 2020;31(2):339–351. DOI: 10.1007/s11676-019-01019-3
6. Bont L., Heinimann H. R. Optimum geometric layout of a single cable road. *European Journal of Forest Research.* 2012;131(5):1439–1448. DOI: 10.1007/s10342-012-0612-y
7. Visser R., Stampfer K. Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. *Croatian Journal of Forest Engineering.* 2015;36(2):321–331.
8. Pokharel M., Belart F., Chung W. et al. Assessment of timber faller working conditions in mixed hand and tethered-machine cut harvest units on steep slopes – A case study in western Oregon. *International Journal of Forest Engineering.* 2023;34(3):408–416. DOI: 10.1080/14942119.2023.2170149
9. Holzfeind T., Visser R., Chung W. et al. Development and benefits of winch-assist harvesting. *Current Forestry Reports.* 2020;6(3-4):201–209. DOI: 10.1007/s40725-020-00121-8
10. Kováč J., Remper M., Krilek J. Analysis of the frictional coefficient at the pulling load on the tilted plane. *Acta Facultatis Technicae.* 2011;16 (1):65–72.

11. Berkett H., Visser R. Measuring slope of forestry machines on steep terrain. Measuring slope of forestry machines on steep terrain. Harvesting Technical Note HTN05-02. Rotorua, NZ: Future Forests Research Ltd, 2012. 8 p.
12. Di Fulvio F., Acuna M., Ackerman P. et al. Benchmarking operational conditions, productivity, and costs of harvesting from industrial plantations in different global regions. *International Journal of Forest Engineering*. 2024;35(2):225–250. DOI: 10.1080/14942119.2023.2296789
13. Green P. Insight into the productivity, cost and soil impacts of a cable-assisted harvester forwarder thinning in western Oregon. Corvallis, Oregon State University; 2019. 125 p.
14. Lundbäck M., Häggström C., Nordfjell T. Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering*. 2021;32(3):202–215. DOI: 10.1080/14942119.2021.1906617
15. Beňo P., Krilek J., Kováč J. et al. The analysis of the new conception transportation cableway system based on the tractor equipment. *FME Transactions*. 2018;46(1):17–22. DOI: 10.5937/fmet1801017B
16. Holzleitner F., Kastner M., Stampfer K. et al. Monitoring cable tensile forces of winch-assist harvester and forwarder operations in steep terrain. *Forests*. 2018;9(2):53. DOI: 10.3390/f9020053
17. Machuga O., Shchupak A., Styranivskiy O. et al. Field and laboratory research of the rut development process on forest roads. *Forests*. 2024;15(1):74. DOI: 10.3390/f15010074
18. Lagerev A. V., Lagerev I. A., Tarichko V. I. Reliability and safety of operation of mobile transport and overloading rope complexes. *Monograph*. Bryansk, Bryansk State University; 2022. 207 p. (In Russ.).
19. Lagerev A. V., Lagerev I. A. Design of passenger aerial ropeway for urban environment. *Urban Rail Transit*. 2019;5(1):17–28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z; EDN: WUVCOS
20. Birger I. A., Shorr B. F., Shneyjdorovich R. M. Calculation of the strength of machine parts. Moscow, Mashinostroenie; 1966. 616 p. (In Russ.).
21. Lagerev A. V., Lagerev I. A., Tarichko V. I. Determination of tension forces of ropes during the operation of mobile transport and reloading rope complexes. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta (Scientific and Technical Journal of Bryansk State University)*. 2022;(3): 194–210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210; EDN: EVLPWZ (In Russ.).
22. Yablonskiy A. A. Course of theoretical mechanics. Part 2. Dynamics. Moscow, Vysshaya shkola; 1977. 430 p. (In Russ.).
23. Lagerev I. A., Lagerev A. V., Makulina A. V. Dynamic model of a harvester equipped with a rope anchor system during logging operations on a steep slope. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta (Scientific and Technical Journal of Bryansk State University)*. 2024;(3): 188–206. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-188-206; EDN: HPDZFFV (In Russ.).
24. Lagerev I. A., Lagerev A. V., Makulina A. V. Optimization of geometric characteristics of the harvester hydraulic manipulator kinematic scheme. The Certificate on official registration of the computer program. 2024. No. 2024668708. EDN: LNQHBT (In Russ.).
25. Fedorenchik A. S., German A. A., Protas P. A. Amkodor forestry machines. Minsk, Belarusian State Technological University; 2013. 240 p. (In Russ.).

The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 25.02.2025; accepted for publication 03.03.2025

Information about the authors

Alexander V. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Vocational and Technological Education and Life Safety, Bryansk State Academician I.G. Petrovski University. Research interests – optimal design, modeling of work processes, analysis of the dynamics and strength of transport and technological machines for various purposes and mobile rope systems. Author of 480 scientific publications, including 27 monographs, 100 patents and certificates of the Russian Federation for the results of intellectual activity. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>; SPIN: 6518-8902

Anna V. Makulina – Assistant of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, Bryansk State Academician I.G. Petrovski University. Research interests – modeling of work processes during the operation of forestry machines on steep slopes. Author of 50 scientific publications, including five certificates of the Russian Federation on the state registration of computer programs. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>; SPIN: 7546-0990

Contribution of authors:

Lagerev A. V. – supervision of the research execution, development of a dynamic mathematical model, interpretation and analysis of the calculation results.

Makulina A. V. – computer implementation of the dynamic mathematical model, performing calculations, interpretation and analysis of the calculation results.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630.90

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>

EDN: NTNPIR

Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог

И. Н. Кручинин¹, О. Н. Бурмистрова², В. Ю. Задворнов³, К. С. Отев^{2✉}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет,

Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

² Ухтинский государственный технический университет,

Российская Федерация, 169300, Ухта, ул. Первомайская, 13

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Российская Федерация, 614000, Пермь, Комсомольский просп., 29

otev.kirill@mail.ru ✉

Аннотация. *Введение.* Рассмотрена проблема совершенствования методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог с использованием обобщённого показателя эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги. Использование снега или снегольда в качестве дорожно-строительного материала вызывает значительные трудности при эксплуатации зимних лесных дорог. Решить эту проблему позволяет впервые разработанная методика оценки по обобщённому показателю эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия, что и определило цель настоящей работы. *Целью* исследований была разработка методики оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог. *Объекты и методы.* Объектами исследования являются зимние дорожные покрытия лесных дорог, обработанные каменными фрикционными материалами. Для исследования их работы были применены методы теории нечёткой логики и нечётких множеств. *Результаты.* В результате проведённых исследований были разработаны варианты обработки фрикционными материалами зимних дорожных покрытий. Рациональными значениями при обработке зимних дорожных покрытий фрикционными каменными материалами следует считать: для фр. 5–10 мм при плотности распределения – не менее 6,5 кг/м²; для фр. 10–15 мм плотностью распределения – не менее 6,0 кг/м²; для фр. 10–20 плотностью распределения каменных материалов – не менее 9,0 кг/м², при значении обобщённого показателя транспортно-эксплуатационного состояния – не менее 0,605. *Выводы.* Разработанная методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог по обобщённому показателю может быть рекомендована для повышения эффективности эксплуатации зимних лесных дорог, а также для разработки регламентов по зимнему содержанию лесотранспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: коэффициент сцепления; динамический модуль прогиба; фрикционные материалы; показатель эффективности; метод оценки; нечёткая логика; нечёткие множества; строительство дорог

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог / И. Н. Кручинин, О. Н. Бурмистрова, В. Ю. Задворнов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 73–85. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>; EDN: NTNPIR

Введение

Транспортное освоение лесосырьевых баз в летний период года чаще всего осуществляется по лесотранспортным сетям

круглогодичного действия с дорожными покрытиями капитального типа. Почти все работы посвящены либо процессам строительства, либо процессам эксплуатации

лесных дорог только для летнего периода года. Однако особенности строительства зимних лесных дорог и их эксплуатация чаще всего не рассматриваются [1, 2].

Основные способы строительства зимних дорог из снега были сформулированы и апробированы ещё в начале прошлого века. Исследования таких учёных, как А. Ф. Вуори, Н. Н. Галахова, П. П. Кузмина, Г. Д. Рихтера стали основой по строительству и эксплуатации автозимников. Что же касается лесных дорог, то следует отметить исследования В. И. Алябьева, М. М. Корунова, С. И. Морозова. В то же время, начиная с 1990-х годов наблюдалось снижение интереса к исследованиям снежных покрытий и автозимников. Это привело к тому, что основные методы изучения физико-механических свойств снежных дорожных покрытий не получили дальнейшего развития.

Что касается современных исследований, то они в основном направлены только на зимнее содержание автомобильных дорог. Чаще всего, зимняя эксплуатация сводится либо к полной ликвидации снежного дорожного покрытия, либо только к очистке его от снега или борьбе с зимней скользкостью [3]. Отсутствуют основные критерии оценки транспортно-эксплуатационных показателей как снежных, так и снежно-ледяных дорожных покрытий зимних лесных дорог. Практически не рассматривается влияние лесовозных автопоездов на зимние покрытия. Для зимних лесных дорог характерно исполнение покрытия из снега, уплотнённого снежного покрова, снегольда или льда [3–6]¹.

Необходимо учитывать, что лесовозный автотранспорт, эксплуатируемый в условиях лесотранспортной инфраструктуры, имеет существенные отличия от традиционного грузового автотранспорта,

эксплуатируемого на дорогах общего пользования [2].

Именно при использовании каменного фрикционного материала существует возможность регулировать коэффициент сцепления и прочность зимних дорожных покрытий. На это же указывают и исследования некоторых учёных, предположивших, что изменения технологий содержания лесных дорог позволяют продлить сроки их действия и продлить эксплуатацию весной [3, 7].

Очевидно, что традиционные методы повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог и их оценки не способны обеспечить экономически целесообразных решений. В этой связи создание новых методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог, обработанных каменными фрикционными материалами, с использованием методов теории нечёткой логики и нечётких множеств, является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований была разработка метода оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог на основе обобщённого комплексного показателя с использованием элементов теории нечёткой логики и нечётких множеств.

В работе решались следующие **задачи**: 1) оценка транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог; 2) обоснование критериев обобщённого показателя зимних дорожных покрытий; 3) формирование обучающих выборок для настройки нейронечёткой сети по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог для различных критериев.

Материалы и методы

В нормативно-технической документации используется термин «автозимники». Особенности их строительства и содержания посвящено значительное количе-

¹ ГОСТ Р 58948-2020. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания. Введ. 2020-01-01. М.: Стандартинформ, 2020. 56 с.

ство работ [3, 4]. В этих работах значительное место отводится не только особенностям местности расположения автомобильных дорог, характеристикам дорожно-климатических условий, но и технологиям строительства и содержания зимних дорожных покрытий.

Итогом многолетних наблюдений за климатическими условиями лесосырьевых баз [1, 3, 8–10] стало подробное описание условий и закономерностей формирования на их территориях снежного покрова.

Известно, что в зимний период года снег послойно накапливается и формирует снежный покров.

Особо следует отметить, что в условиях лесосырьевых баз Северо-Западного региона снежный покров формируется несколько по иным принципам, чем в условиях, где отсутствует лесная древесная растительность [1]. Происходит интенсивное перераспределение снежных осадков за счёт лесной растительности. Существенно уменьшено ветровое воздействие на снежный покров.

Таким образом, в процессе строительства и содержания зимних дорожных покрытий лесных дорог приходится учитывать значительное количество факторов как природно-климатических, технологических, так и физико-механических.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что в качестве выходных параметров оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог достаточно иметь значения коэффициента сцепления колёс лесовозного транспорта с зимними дорожными покрытиями и модуля их динамического прогиба [11, 12].

В общем виде коэффициент сцепления колёс лесовозного автотранспорта с зимними дорожными покрытиями лесных дорог $F_{сц}$ однозначно может быть описан функцией:

$$F_{сц} = f(P_{сн}, \Phi_p, N_p), \quad (1)$$

где $P_{сн}$ – плотность зимнего дорожного покрытия, г/см³; Φ_p – размер частиц каменного фрикционного материала, мм; N_p – плотность распределения каменных

фрикционных материалов по дорожному покрытию, кг/м².

В результате инструментального измерения коэффициента сцепления колёс лесовозного автотранспорта с зимними дорожными покрытиями лесных дорог установлено, что их величины варьируются в значительном диапазоне [4, 13]. На коэффициент сцепления оказывает своё влияние плотность зимнего дорожного покрытия, его жёсткость, тип каменного фрикционного материала, его плотность распределения по покрытию, размер зёрен каменного фрикционного материала, способ распределения каменного фрикционного материала по зимнему дорожному покрытию, расположение фрикционного материала на проезжей части лесной дороги, погодно-климатические условия [14, 15].

То же можно сказать и о показателях жёсткости зимних дорожных покрытий. Наши исследования [16] позволили сделать вывод, что в качестве дополнительного выходного параметра при оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних покрытий следует выбирать динамический прогиб дорожной поверхности. При анализе результатов измерения модулей динамических прогибов зимних покрытий было выявлено, что они тоже существенно варьируются. На динамический прогиб зимнего покрытия оказывают влияние: степень уплотнения дорожного покрытия; тип зимней дорожной одежды; толщина дорожного покрытия; способ уплотнения дорожного покрытия; природно-климатические факторы [17, 18].

Оценка прочности зимнего дорожного покрытия D_n из уплотнённого снега или снегольда может быть описана при помощи функции:

$$D_n = f(H_{сн}, N_p, P_{сн}), \quad (2)$$

где $H_{сн}$ – толщина зимнего дорожного покрытия, см; N_p – плотность распределения каменных фрикционных материалов по дорожному покрытию, кг/м²; $P_{сн}$ – плотность зимнего дорожного покрытия, г/см³.

Таким образом, выбрав в качестве основных критериев эффективности коэффициент сцепления колёс лесовозного автотранспорта автомобилей с зимним дорожным покрытием лесных дорог и прочность покрытия, пришлось столкнуться с тем, что задача по оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог является многопараметрической и характеризуется неопределённостью в данных. То есть решение задачи в обычной формулировке оценки транспортно-эксплуатационного состояния невозможно, поэтому воспользуемся методом формирования обобщённого комплексного показателя эффективности.

В нашем случае оценка транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог будет заключаться в определении следующих параметров: значения коэффициента сцепления с дорожным покрытием через коэффициент сцепления; значения прочности дорожного покрытия через динамический модуль прогиба.

Будем считать, что за обобщённый показатель эффективности принята сумма частных показателей. Ввиду того, что частные показатели имеют не только различную физическую сущность, но и разные размерности и методы их отображения, их необходимо привести к обобщённому, безразмерному виду.

Для анализа доли вклада каждого частного показателя необходимо восполь-

зоваться оценкой с помощью коэффициентов весов. Все коэффициенты выбираются таким образом, чтобы общая сумма сформированных коэффициентов была равна единице. В нашем случае для назначения приоритетности частных показателей назначим им отдельные весовые коэффициенты. Наши коэффициенты k_1 и k_2 при каждом частном показателе будут определяться на основании опытных данных.

В общем виде разработанный обобщённый показатель эффективности C транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги может быть описан функцией:

$$C = \frac{k_1(F_{C\text{Ц}i} - F_{C\text{Ц}i}^{\min})}{F_{C\text{Ц}i}^{\max} - F_{C\text{Ц}i}^{\min}} + \frac{k_2(D_{\text{П}i} - D_{\text{П}i}^{\min})}{D_{\text{П}i}^{\max} - D_{\text{П}i}^{\min}}, \quad (3)$$

где k_i – весовые коэффициенты частных критериев; $F_{C\text{Ц}i}^{\min}$, $F_{C\text{Ц}i}^{\max}$ – минимальные и максимальные значения показателей коэффициента сцепления с зимней дорожной поверхностью; $D_{\text{П}i}^{\min}$, $D_{\text{П}i}^{\max}$ – минимальные и максимальные значения динамического модуля прогиба зимнего дорожного покрытия, МПа.

Перед проведением оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог была разработана общая программа исследований. Фрагмент общей программы исследований по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог представлен в табл. 1.

Таблица 1. Фрагмент программы исследования по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог

Table 1. Fragment of the research program for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads

№ серии	Условия испытаний	№ серии	Условия испытаний
	Зимнее дорожное покрытие, необработанное щебнем		Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фр. 15–20 мм
1.2 С	СДП – плотность 0,45 г/см ³	5.2. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 3,0 кг/м ²
1.4 С	СДП – плотность 0,55 г/см ³	5.3. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 7,0 кг/м ²
1.6 С	СДП – плотность 0,65 г/см ³	5.4. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 3,0 кг/м ²

Окончание таблицы 1

№ серии	Условия испытаний	№ серии	Условия испытаний
1.9 Л	СЛДП – плотность 0,76 г/см ³	5.9. ЭЩ	ЭСЛДП – плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²
Зимнее дорожное покрытие, обработанное песком фр. 0–5 мм		Зимнее дорожное покрытие, обработанное песчано-щебёночной смесью С 2 (фр. 0–20)	
2.1. ЭП	ЭСДП – плотность 0,55 г/см ³ , плотность распределения – 0,1 кг/м ²	6.3. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 5,0 кг/м ²
2.3. ЭП	ЭСДП – плотность 0,55 г/см ³ , плотность распределения – 0,2 кг/м ²	6.4. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 3,0 кг/м ²
2.5. ЭП	ЭСЛДП – плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки – 0,3 кг/ м ²	6.5. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,50 г/см ³ , плотность распределения – 8,0 кг/м ²
2.8. ЭП	ЭСЛДП – плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 0,2 кг/м ²	6.9. ЭЩ	ЭСЛДП – плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²
Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фр. 10–15 мм		Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фр. 5–20 мм	
4.3. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 5,0 кг/м ²	7.4. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 8,0 кг/м ²
4.4. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 1,0 кг/м ²	7.5. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,50 г/см ³ , плотность распределения – 4,0 кг/ м ²
4.5. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,50 г/см ³ , плотность распределения – 4,0 кг/м ²	7.6. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 12,0 кг/м ²
4.9. ЭЩ	ЭСЛДП плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²	7.9. ЭЩ	ЭСЛДП плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²

Примечание: СДП – зимнее дорожное покрытие, необработанное щебнем; СЛДП – зимнее снежно-ледяное дорожное покрытие; ЭСДП – эксплуатируемое, обработанное каменными материалами зимнее дорожное покрытие; ЭСЛДП – эксплуатируемое, обработанное каменными материалами снежно-ледяное зимнее дорожное покрытие.

При обработке полученных опытно-экспериментальных данных были использованы классические методы обработки статистических данных.

Основные транспортно-эксплуатационные показатели зимних дорожных покрытий были получены в процессе эксплуатации участков лесных дорог на полигоне,

расположенном на территории лесосырьевой базы Пермского края в период с февраля по март 2024 года. Для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей были использованы каменные фрикционные материалы. В табл. 2 представлены их основные физико-механические и зерновые показатели.

Таблица 2. Характеристика каменных фрикционных материалов, применяемых для повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог

Table 2. Characteristics of stone friction materials used to improve the transport and operational performance of winter road surfaces of forest roads

Каменные материалы	Физико-механические показатели			
	Фр., мм	Размер зёрен материала, фр., мм	Прочность	Норма распределения, кг/м ²
Песок	0 – 5	0,16 – 5	–	0,2 – 0,5
Посыпка антигололёдная	0 – 2,5	0,16 – 2,5	600	0,2 – 0,5
Щебень	5 – 10	5 – 10	800	2,0 – 7,0
Щебень	5 – 15	5 – 15	800	2,0 – 5,0
Щебень	10 – 15	10 – 15	1000	3,0 – 7,0
Щебень	15 – 20	15 – 20	1000	5,0 – 8,0
Песчано-щебёночная смесь	С2	0,16 – 20	1200	0,5 – 3,0

Результаты

В результате исследований получены значения прочностных показателей и коэффициентов сцепления зимних лесных дорог в зависимости от вида снежных покрытий и способов их содержания.

В качестве эксплуатационных показателей был использован коэффициент сцепления, полученный с помощью прибора ППКА – МАДИ, а оценка прочностных показателей производилась с применением электронного динамического плотномера типа ZFG-3000-10 GPS.

Методика измерения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием предполагает подготовку самого покрытия. Норма распределения каменного фрикционного материала проводилась методом взвешивания контрольного лотка. Прибор ППКА – МАДИ устанавливался на подготовленную горизонтальную поверхность в полосе наката на зимнем дорожном покрытии.

Динамический плотномер типа ZFG-3000-10 GPS производит измерение прогиба дорожного покрытия при падении груза на круглый штамп. Результатом измерения служит динамический прогиб зимнего дорожного покрытия, измеряемый в МПа. На рис. 1 представлены рабочие моменты проведения испытаний по оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий.

При решении задачи оценки коэффициента сцепления по выражению (1) в качестве выходного параметра принималось значение сцепления колёс лесовозного автотранспорта с зимним покрытием. Диапазон измерения составил от 0,1 до 0,71. В качестве входных параметров были применены: плотность зимнего дорожного покрытия, при этом плотность покрытия оценивалась от свежеснежного до снежно-ледяных отложений, г/см^3 ; размер зёрен каменного фрикционного материала, используемого для обработки дорожных покрытий лесных дорог, мм; плотность распределения фрикционных каменных материалов по дорожному покрытию, кг/м^2 .

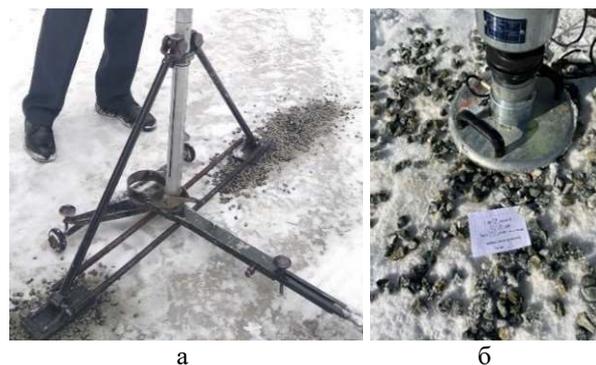


Рис. 1. Опытно-экспериментальные исследования снежного дорожного покрытия (фото авторов)
 а – измерение коэффициента сцепления;
 б – измерение динамического модуля прогиба с использованием ZFG-3000-10 GPS

Fig. 1. Experimental research of snow road surfaces (photo by the author)
 a – measurement of the adhesion coefficient;
 b – measurement of the dynamic deflection modulus using ZFG-3000-10 GPS

Так как задача оценки коэффициента сцепления с зимними дорожными покрытиями лесных дорог характеризуется неопределённостью в полученных данных, то при разработке системы оценки эффективности использована адаптивная нейронечёткая продукционная сеть типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Эта сеть имеет свойства продукционных нечётких систем на основе базы правил и свойства простых нейронных сетей. Продукционная сеть разрабатывалась в среде MATLAB.

В табл. 3 приведены параметры обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог по критерию коэффициента сцепления.

При этом, можно наблюдать участки снежного покрытия с одинаковыми показателями коэффициента сцепления, но отличающимися количеством распределения каменного фрикционного материала.

Решение задачи оценки прочности зимних дорожных покрытий проводилось с помощью выражения (2). В качестве выходного параметра принимали динамический прогиб дорожного покрытия. Прогиб оценивали динамическим модулем прогиба дорожного покрытия в МПа.

Таблица 3. Обучающие выборки для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию коэффициента сцепления

Table 3. Training samples for assessing the transport and operational performance of winter road surfaces of forest roads based on the adhesion coefficient criterion

Вид зимнего дорожного покрытия	Плотность зимнего дорожного покрытия, г/см ³	Фр., мм	Размер зёрен каменного материала фр., мм	Плотность распределения фрикционных каменных материалов, кг/м ²	Коэффициент сцепления с покрытием
Снежное уплотнённое	0,65	нет	нет	нет	0,22
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	2,0	0,31
Снежное уплотнённое	0,65	15–20	15–20	6,0	0,43
Снежное не уплотнённое	0,35	15–20	15–20	5,0	0,39
Снежно-ледяное	0,76	0–20	0,16–20	3,0	0,32
Снежное уплотнённое	0,65	0–5	0,16–5	0,2	0,28
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	5,0	0,40
Снежное уплотнённое	0,65	8–16	8–16	4,0	0,36
Снежное не уплотнённое	0,35	5–20	5–20	5,0	0,33
Снежное уплотнённое	0,65	5–20	5–20	10,0	0,48
Снежно-ледяное	0,76	10–15	10–15	3,0	0,31
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	5,0	0,32
Ледяное	0,78	0–5	0,16–5	0,2	0,28
Снежное уплотнённое	0,65	5–10	5–10	5,0	0,42
Ледяное	0,78	5–10	5–10	5,0	0,32
Снежное уплотнённое	0,65	C2	0,16–20	5,0	0,35
Снежное не уплотнённое	0,35	C2	0,16–20	3,0	0,28
Снежное уплотнённое	0,50	5–10	5–10	7,0	0,40
Снежно-ледяное	0,76	8–16	8–16	5,0	0,38
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	3,0	0,31
Ледяное	0,80	0–20	0,16–20	1,0	0,28

В результате измерений был зафиксирован диапазон от 89,2 до 277,3 МПа. В качестве входных параметров были использованы: плотность зимнего дорожного покрытия, при этом плотность покрытия оценивалась от свежесвыпавшего снега до снежно-ледяных отложений (г/см³); плотность распределения фрикционных каменных материалов по дорожному покрытию (кг/м²); толщина зимнего дорожного покрытия (см).

В табл. 4 приведены параметры обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию динамического модуля прогиба.

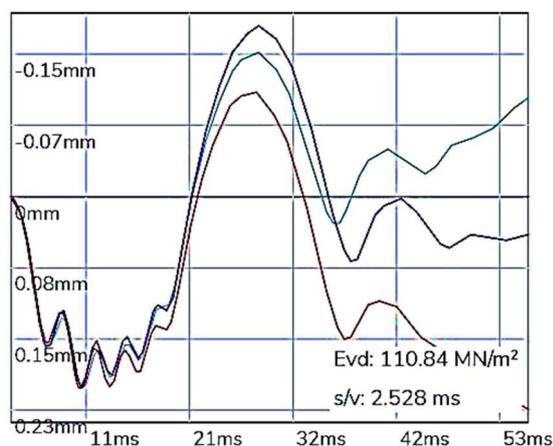
Динамический плотномер ZFG-3000-10 GPS имеет встроенную функцию построения графических зависимостей динамических прогибов в зависимости от времени приложения нагрузки. Анализ графиков динамических прогибов зимних дорожных покрытий показал, что на величину прогибов оказывает влияние как плотность дорожного покрытия, так и плотность обработки каменными фрикционными материалами.

На рис. 2 и 3 представлены графические зависимости динамических прогибов зимних дорожных покрытий, обработанных и не обработанных каменными материалами.

Таблица 4. Обучающие выборки для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию динамического модуля прогиба

Table 4. Training samples for assessing the transport and operational performance of winter road surfaces of forest roads based on the dynamic deflection modulus criterion

Вид зимнего дорожного покрытия	Плотность зимнего дорожного покрытия, г/см ³	Фр., мм	Размер зёрен каменного материала фр., мм	Плотность распределения фрикционных каменных материалов, кг/м ²	Динамический модуль прогиба, МПа
Снежное уплотнённое	0,65	нет	нет	нет	110,8
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	2,0	36,4
Снежное уплотнённое	0,65	15–20	15–20	6,0	225,2
Снежное не уплотнённое	0,35	15–20	15–20	5,0	46,8
Снежно-ледяное	0,76	0–20	0,16–20	3,0	284,6
Снежное уплотнённое	0,65	0–5	0,16–5	0,2	116,8
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	5,0	267,8
Снежное уплотнённое	0,65	8–16	8–16	4,0	172,5
Снежное не уплотнённое	0,35	5–20	5–20	5,0	46,5
Снежное уплотнённое	0,65	5–20	5–20	10,0	212,2
Снежно-ледяное	0,76	10–15	10–15	3,0	210,2
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	5,0	46,8
Ледяное	0,78	0–5	0,16–5	0,2	292,1
Снежное уплотнённое	0,65	5–10	5–10	5,0	192,2
Ледяное	0,78	5–10	5–10	5,0	277,8
Снежное уплотнённое	0,65	C2	0,16–20	5,0	208,1
Снежное не уплотнённое	0,35	C2	0,16–20	3,0	58,6
Снежное уплотнённое	0,50	5–10	5–10	7,0	254,3
Снежно-ледяное	0,76	8–16	8–16	5,0	185,4
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	3,0	212,2
Ледяное	0,80	0–20	0,16–20	1,0	268,7

Рис. 2. Динамический прогиб необработанного зимнего дорожного покрытия толщиной 15 см, плотность 0,65 г/см³Fig. 2. Dynamic deflection of untreated winter road surface 15 cm thick, density 0.65 g/cm³

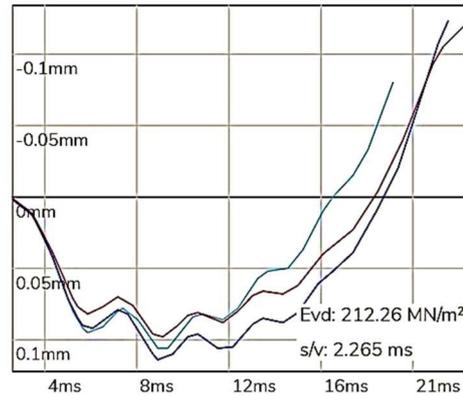


Рис. 3. Динамический прогиб зимнего дорожного покрытия толщиной 18 см, обработанного щебнем фр. 5–20 мм, плотность распределения 10 кг/м²

Fig. 3. Dynamic deflection of a winter road surface 18 cm thick treated with crushed stone of fraction 5–20 mm, distribution density 10 kg/m²

Для необработанных зимних покрытий характерны незначительные деформации и быстрое изменение амплитуд динамических прогибов. Каменные фрикционные материалы, распределённые на дорожном покрытии, существенно изменяют их прочностные показатели. С возрастанием нормы распределения изменяются и динамические параметры покрытий.

Выбрав в качестве критерия обобщённый показатель, пришлось столкнуться с тем, что задача оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог характеризуется взаимозависимыми параметрами. Поэтому для решения именно такого класса задач следует использовать методы теории оптимизации по весовым коэффициентам.

Таблица 5. Результаты расчётов обобщённого показателя эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги

Table 5. Results of calculations of the generalized indicator of the efficiency of the transport and operational condition of the winter road surface of a forest road

Наименование параметра	Варианты обработки зимнего дорожного покрытия каменными фрикционными материалами				
	А	Б	В	Г	Д
Плотность зимнего дорожного покрытия $P_{сн}$, г/см ³	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Размер зёрен каменного материала Φ_p , мм	0 -5	5-10	10-15	5-20	0 - 20
Плотность распределения фрикционных каменных материалов N_p по покрытию, кг/м ²	0,2	6,5	4,0	7,0	5,0
Толщина зимнего дорожного покрытия $H_{сн}$, см	9	17	23	18	19
Коэффициент сцепления с зимним дорожным покрытием $F_{сц}$	0,28	0,49	0,36	0,48	0,37
Динамический модуль прогиба зимнего дорожного покрытия $D_{п}$, МПа	116,8	192,2	172,5	212,2	208,1
Обобщённый показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния, C	0,215	0,605	0,440	0,461	0,550

Постановка задачи в содержательном виде выполнялась на основе выражения (3).

Введём ограничения по показателям. Величина коэффициента сцепления с уплотнённым снежным дорожным покрытием:

$$\begin{cases} F_{сц}^{\min} = 0,10 \\ F_{сц}^{\max} = 0,71 \end{cases} \quad (4)$$

Величина динамического модуля прогиба зимнего дорожного покрытия лесной дороги, МПа:

$$\begin{cases} D_{п}^{\min} = 89,2 \text{ МПа} \\ D_{п}^{\max} = 277,3 \text{ МПа} \end{cases} \quad (5)$$

Результаты исследований и расчётов по полученным уравнениям параметров сведены в табл. 5.

Заключение

Разработка методов оценки основных транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог является сложной задачей со многими взаимозависимыми параметрами и характеризуется неопределённостью данных. Проведена оценка влияния типов зимних дорожных покрытий на их транспортно-эксплуатационные показатели, выполнены измерения коэффициентов сцепления с покрытиями в зависимости от их толщины, плотности, вида каменного фрикционного материала и плотности его распределения. Подобрана технология измерения коэффициента сцепления. Впервые получены данные о прочности зимних дорожных покрытий с использованием динамических методов измерения. Определены динамические прогибы покрытий и измерены динамические модули этих прогибов. Разработан обобщённый показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги. На основании проведённых исследований были разработаны варианты обработки фрикционными материалами зимних дорожных покрытий.

Рациональными значениями при обработке зимних дорожных покрытий фрик-

ционными каменными материалами следует считать: для фр. 5–10 мм при плотности распределения не менее 6,5 кг/м²; для фракций 10–15 мм с плотностью распределения не менее 6,0 кг/м²; для фракций 10–20 мм с плотностью распределения каменных материалов не менее 9,0 кг/м², при значении обобщённого показателя транспортно-эксплуатационного состояния не менее 0,605. При этих параметрах были зафиксированы значения коэффициента сцепления с зимней дорожной поверхностью не менее 0,49 и модуля динамического прогиба не менее 192,2 МПа. По мере снижения размеров зёрен каменного материала изменяется и обобщённый показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния. Так, использование песка фракции 0–5 мм имеет показатель эффективности $C = 0,215$, что неприемлемо для зимних дорожных покрытий.

Разработанная методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог по обобщённому показателю может быть рекомендована для повышения эффективности эксплуатации зимних лесных дорог, а также для разработки регламентов по зимнему содержанию лесотранспортной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галахов Н. Н. Снежный покров в лесу // Метеорология и гидрология. 1940. № 3. С. 15–16.
2. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев, Б. А. Ильин, Б. И. Кувалдин и др. М.: Лесная промышленность, 1990. 416 с.
3. Зимние дороги в лесной промышленности / С. И. Морозов, Ф. А. Павлов, Л. Н. Плакса и др. М.: Лесная промышленность, 1969. 168 с.
4. Афанасьев И. А., Кручинин И. Н. Зимнее содержание лесовозных автомобильных дорог Уральского региона: монография. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 135 с.
5. Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction // SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2011. Vol. 4, iss. 1. Pp. 278–288. DOI: 10.4271/2011-01-0188
6. Thompson M. P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives. Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing. 2009. 284 p
7. Корунов М. М. Ускоренный способ постройки зимних дорог. М.: Гослестехиздат, 1946. 34 с.
8. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1957. 179 с.
9. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
10. Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных / А. П. Мохирев, Е. В. Горяева, М. П. Мохирев и др. // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 2 (30). С. 176–185. DOI: 10.12737/article_5b2406175e7765.44768086; EDN: XRUBWP
11. Уравнения связи параметров состояния снега и зависимости их от деформации снежного покрова / А. Н. Кожевников, В. В. Беляков, В. А. Малыгин и др. // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники: сборник научных трудов к 60-летию кафедры «Ав-

томобили и тракторы». Н. Новгород: НГТУ, 1997. С. 121–129.

12. Патент на полезную модель № 219114. Устройство для формирования уплотнённого снежного покрытия / И. Н. Кручинин, А. А. Лабыкин, Д. В. Овсейчик, В. В. Побединский, О. Н. Бурмистрова, В. С. Авдеева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГЛТУ. № 2023112508; заявл. 16.05.2023; опубл. 28.06.2023. EDN: НКIWOM

13. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications. Report 97-3. / L. H. Shapiro, J. B. Johnson, M. Sturm et al. // US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997. 36 p.

14. Вуори А. Ф. Механические свойства снега как строительного материала // Физические методы исследования льда и снега: сборник трудов. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 118 с.

15. Войтковский К. Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 126 с.

16. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния уплотнённого снежного покрова зимних лесных дорог с использованием нейронных сетей / А. А. Лабыкин, И. Н. Кручинин, В. В. Побединский и др. // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 3. С. 3–10. EDN: НТЕНWN

17. Совершенствование методов технологического контроля уплотнённого снежного покрова при строительстве и эксплуатации зимней транспортной инфраструктуры лесов / А. А. Лабыкин, И. Н. Кручинин, Э. Р. Ахтямов и др. // Системы Методы Технологии. 2023. № 4 (60). С. 147–154. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-147-154; EDN: WQOILY

18. Richmond P. W., Blaisdell G. L., Green C. E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model. Report 90-13. // US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990. 40 p.

Статья поступила в редакцию 16.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 28.01.2025

Информация об авторах

КРУЧИНИН Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – разработка и исследования устойчивости функционирования транспортно-производственных систем, повышение структурной прочности дорожных конструкций из малопрочных каменных материалов, совершенствование инструментального контроля при строительстве и содержании автомобильных дорог. Автор 250 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2027-9742>; SPIN-код: 6484-3424

БУРМИСТРОВА Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, метрологии и лесопромышленных технологий, Ухтинский государственный технический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. Автор 309 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>; SPIN-код: 1301-0911

ЗАДВОРНОВ Виталий Юрьевич – инженер кафедры автомобильных дорог и мостов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9501-9884>

ОТЕВ Кирилл Сергеевич – старший преподаватель кафедры электроэнергетики, метрологии и лесопромышленных технологий, Ухтинский государственный технический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. Автор 58 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3073-5090>; SPIN-код: 5214-2883

Вклад авторов:

Кручинин И. Н. – разработка программы, методики.

Бурмистрова О. Н. – концепция, постановка цели и задач, подготовка и редактирование статьи.

Задворнов В. Ю. – программное обеспечение, проведение эксперимента.

Отёв К. С. – проверка данных, подготовка и редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630.90

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>

EDN: NTNPIR

Development of Methods for Assessing Winter Road Surfaces of Forest Roads**I. N. Kruchinin¹, O. N. Burmistrova², V. Yu. Zadornov³, K. S. Otev²**¹Ural State Forest Engineering University,

37, Sibirsky Tr., Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Ukhta State Technical University,

13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolsky Prosp., Perm, 614000, Russian Federation

otev.kirill@mail.ru

Abstract. *Introduction.* The article considers the problem of improving the methods for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads using a generalized indicator of the efficiency of the transport and operational condition of the winter road surface of a forest road. The use of snow or snow-ice as a roadbuilding material causes significant difficulties in the operation of winter forest roads. This problem can be solved by the first developed assessment methodology based on a generalized indicator of the efficiency of the transport and operational condition of the winter road surface, which has determined the purpose of this work. *The purpose* of the research was to develop a methodology for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads. *Objects and methods.* The objects of the study are winter road surfaces of forest roads treated with stone friction materials. To investigate their performance, the methods of the theory of fuzzy logic and fuzzy sets were applied. *Results.* As a result of the conducted research, options of the treatment of winter road surfaces with friction materials have been developed. The following should be considered as the rational values for the treatment of winter road surfaces with stone friction materials: for fraction 5–10 mm with a distribution density of at least 6.5 kg/m²; for fraction 10–15 mm with a distribution density of at least 6.0 kg/m²; for fraction 10–20 mm with a distribution density of stone materials at least 9.0 kg/m², with a value of the generalized indicator of the transport and operational condition of at least 0.605. *Conclusion.* The developed methodology for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads according to a generalized indicator can be recommended to improve the efficiency of the operation of winter forest roads, as well as to develop regulations for the winter maintenance of forest transportation infrastructure.

Keywords: adhesion coefficient; dynamic modulus of deflection; friction materials; efficiency indicator; assessment method; fuzzy logic; fuzzy sets; road construction

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Kruchinin I. N., Burmistrova O. N., Zadornov V. Yu. et al. Development of Methods for Assessing Winter Road Surfaces of Forest Roads. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>; EDN: NTNPIR

REFERENCES

1. Galakhov N. N. Snow cover in the forest. *Meteorology and Hydrology.* 1940;(3):15–16. (In Russ.).
2. Alyabyev V. I., Ilyin B. A., Kuvaldin B. I. et al. Land transport of timber. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1990. 416 p. (In Russ.).
3. Morozov S. I., Pavlov F. A., Plaksa L. N. et al. Winter roads in the forestry industry. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1969. 168 p. (In Russ.).
4. Afanasyev I. A., Kruchinin I. N. Winter maintenance of timber-hauling roads in the Ural region. *Monograph.* Perm: Perm State Technical University Publishing House; 2006. 135 p. (In Russ.).
5. Lee J. An Improved slip-based tire-snow interaction model for tire-snow interaction. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing.* 2011;4(1):278–288. DOI: 10.4271/2011-01-0188
6. Thompson M. P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives. Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing; 2009. 284 p.
7. Korunov M. M. Accelerated method of building winter roads. Moscow, Goslestekhzdat, 1946. 34 p. (In Russ.).

8. Kuzmin P. P. Physical properties of snow cover. Leningrad, Gidrometeoizdat; 1957. 179 p. (In Russ.).
9. Richter G. D. Snow cover, its formation and properties. Moscow, Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1945. 120 p. (In Russ.).
10. Mokhired A. P., Goryaeva E. V., Mokhired M. P. et al. Planning of operations of winter logging roads on the basis of analysis of climate data statistics. *Forestry Engineering Journal*. 2018;8(2(30)):176–185. DOI: 10.12737/article_5b2406175e7765.44768086; EDN: XRUBWP (In Russ.).
11. Kozhevnikov A. N., Belyakov V. V., Malygin V. A. et al. Equations for the relationship between snow condition parameters and their dependence on snow cover deformation. In: *Design, testing, operation and marketing of automotive and tractor equipment*. Collection of scientific papers dedicated to the 60th anniversary of the Department of Automobiles and Tractors. N. Novgorod: NNSTU, 1997:121–129. (In Russ.).
12. Kruchinin I. N., Labykin A. A., Oseichik D. V. et al. Device for forming a compacted snow cover. Patent for utility model, no. 219114; 2023. EDN: HKIWOM (In Russ.).
13. Shapiro L. H., Johnson J. B., Sturm M. et al. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications. Report 97-3. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997. 36 p.
14. Vuori A. F. Mechanical properties of snow as a building material. In: *Physical methods for studying ice and snow*. Collection of works. Leningrad, Gidrometeoizdat; 1975. 118 p. (In Russ.).
15. Voitkovsky K. F. Mechanical properties of snow. Moscow, Nauka; 1977. 158 p. (In Russ.).
16. Labykin A. A., Kruchinin I. N., Pobedinsky V. V. et al. Assessment of the transport and operational condition of compacted snow cover of winter forest roads using neural networks. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost' (Woodworking Industry)*. 2023;(3): 3–10. EDN: HTENWN (In Russ.).
17. Labykin A. A., Kruchinin I. N., Akhtyamov E. R. et al. Improving methods of technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter forest transport infrastructure. *Systems, Methods, Technologies*. 2023;(4(60)):147–154. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-147-154; EDN: WQOILY (In Russ.).
18. Richmond P. V., Blaisdell G. L., Green K. E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model. Report 90-13. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory; 1990. 40 p.

The article was submitted 16.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 28.01.2025

Information about the authors

Igor N. Kruchinin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Highways, Bridges and Tunnels; Ural State Forest Engineering University. Research interests – research and development of the sustainability of the functioning of transport and production systems; increasing the structural strength of road structures made of low-strength stone materials; improving the instrumental control in highway construction and maintenance. Author of 250 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2027-9742>; SPIN: 6484-3424

Olga N. Burmistrova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering, Metrology and Forestry Technologies; Ukhta State Technical University. Research interests – improving the reliability and efficiency of logging roads. Author of 309 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>; SPIN: 1301-0911

Vitaly Yu. Zadornov – Engineer of the Department of Highways and Bridges; Perm National Research Polytechnic University. Research interests – improving the reliability and efficiency of logging roads. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9501-9884>

Kirill S. Otev – Senior Lecturer of the Department of Electric Power Engineering, Metrology and Forestry Technologies; Ukhta State Technical University. Author of 58 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3073-5090>; SPIN: 5214-2883

Contribution of the authors:

Kruchinin I. N. – development of the research program and methodology.

Burmistrova O. N. – research concept, setting the goal and objectives, preparing and editing the article.

Zadornov V. Y. – software, conducting the experiment.

Otev K. S. – data verification, preparing and editing the article.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ.
БИОТЕХНОЛОГИИ
PROBLEMS IN ECOLOGY AND RATIONAL NATURE
MANAGEMENT. BIOTECHNOLOGIES**

Научная статья
УДК 911.9:502
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.86>
EDN: OASHES

**Геоэкологическая оценка перспектив применения отходов
угледобывающих предприятий в качестве почвенного субстрата
в условиях Арктики**

В. В. Мазур

Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,
Российская Федерация, 167001, Сыктывкар, Октябрьский просп., 55
vvmazur@list.ru

Аннотация. *Введение.* Техногенная трансформация и природный потенциал отходов угольной промышленности позволяет использовать их при рекультивации нарушенных земель. Техногенные грунты являются источниками химических веществ, которые включаются в естественные процессы и создают особый вид природно-технических систем. При этом, наиболее чувствительным индикатором стрессового воздействия антропогенных факторов в городской среде являются древесные растения. *Цель* исследования – изучить экологическое состояние техногенных грунтов и перспектив применения отходов углеобогащения в целях рекультивации земель в условиях Арктики. В *задачи* исследования входило установление валовых концентраций тяжёлых металлов в техногенных грунтах г. Воркуты, образованных угольным шламом, и оценка их влияния на рост и развитие древесной растительности. *Объект и методы.* В качестве объекта исследования были взяты техногенные почвы с клумб центральной части г. Воркуты. Для исследования валового содержания тяжёлых металлов в пробах использовали микронзондовый рентгеноспектральный анализ. Для оценки состояния саженцев деревьев проводили внешний визуальный осмотр состояния хвои (пожелтение и опадение) и измеряли размер молодых побегов. *Результаты.* Все исследуемые почвы характеризуются высоким содержанием валового железа. Содержание цинка в пробах грунта из клумб по ул. Гагарина и возле администрации города превышает ОДК (110 мг/кг). В грунте клумбы возле мэрии обнаружено повышенное содержание меди и кадмия по сравнению с ОДК, которое составляет 66 и 1,0 мг/кг соответственно. Содержание свинца в исследуемых почвенных пробах не превышает ОДК (65 мг/кг). Исследование состояния саженцев крупномеров показало, что наиболее хорошее состояние саженцев крупномеров ели обыкновенной без побурения и опадения хвои наблюдается на клумбе по ул. Гагарина и возле администрации. Значительные повреждения хвои обнаружены на участках напротив «Олимпа» и перед зданием АО «Воркутауголь». *Выводы.* В результате исследования выявлена возможность применения отходов угледобычи в качестве почвенного субстрата для клумб города. Изучены валовые концентрации тяжёлых металлов в техногенных почвах клумб, расположенных в центральной части г. Воркуты. Исследование воздействия техногенных грунтов, сформированных отходами угледобычи, на состояние хвойных крупномеров ели обыкновенной не выявило однозначных закономерностей.

Ключевые слова: техногенный грунт; тяжёлые металлы; ель обыкновенная; г. Воркута; коэффициент корреляции

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Мазур В. В. Геоэкологическая оценка перспектив применения отходов угледобывающих предприятий в качестве почвенного субстрата в условиях Арктики // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1(65). С. 86–94. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.86>; EDN: OASHES

Введение

На территориях, где проводится добыча угля, формируются природно-технические системы, для которых характерны значительные техногенные преобразования природной среды. Особенности техногенных трансформаций определяются свойствами образующихся отходов, их объёмом, а также ландшафтами и климатическими особенностями местности. Включаясь в естественные процессы, отходы угледобычи становятся источниками токсичных химических веществ, в том числе тяжёлых металлов, и могут создавать опасность как для человека, так и в целом для функционирования экосистем [1].

В настоящее время активно проводятся работы, связанные с восстановлением нарушенных земель на Урале, Кузбассе и Дальнем Востоке. Выбор метода рекультивации зависит от цели дальнейшего использования восстановленных территорий, вида отходов, а также учитывает региональные климатические условия. Для восстановления нарушенных земель из материалов углеобогащения создаются насыпные почвенные горизонты, на которых со временем формируется устойчивый растительный покров и в дальнейшем происходит полное восстановление плодородия почв [2]. Также известно, что техногенные грунты обладают некоторыми функциями обычных почв [3].

Известно, что эффективность депонирования углерода на рекультивированных территориях повышается при использовании для фитомелиорации древесных видов растений [4]. При этом, древесные растения являются наиболее чувствительными биоиндикаторами стрессового воздействия антропогенных факторов. В городской среде у древесных растений

наблюдается заметное изменение водного режима из-за переуплотнения почв, загрязнения и высокой плотности коммунальных сооружений, расположенных в корнеобитаемом слое [5].

Однако исследование восстановления нарушенных земель и растительного покрова на промышленных территориях изучалось в основном в условиях средней полосы. При том, что в условиях Крайнего Севера также формируются техногенные зоны и процесс рекультивации в суровых климатических условиях идёт значительно медленнее из-за низких среднегодовых температур и короткого вегетационного периода.

Основные методы рекультивации почв прописаны в ГОСТ 17.5.3.04-83, ГОСТ 17.5.3.05-84, ГОСТ 17.5.3.06-85 и др., однако, в перечисленных стандартах не учитывается способность почв к самовосстановлению. Это обуславливает актуальность изучения особенностей трансформации техногенных грунтов при их использовании на городских территориях в условиях Крайнего Севера.

Цель работы – исследовать экологическое состояние техногенных грунтов и перспектив применения отходов углеобогащения в целях рекультивации земель в условиях Арктики.

Решаемые задачи:

1) изучить местные техногенные грунты г. Воркуты, образованные угольным шламом и оценить их влияние на рост и развитие древесной растительности;

2) исследовать валовые концентрации тяжёлых металлов в техногенных почвах из клумб, расположенных в центральной части г. Воркуты;

3) сопоставить результаты исследования техногенных почв с результатами

оценки состояния крупномеров ели обыкновенной (2,0–3,0 м), высаженных в 2023 году на исследуемых участках.

Объекты и методы

Исследования проводились в центральной части г. Воркуты, расположенного в восточной части Большеземельской тундры, характеризующейся распространением массивно-островной многолетней мерзлоты. Прилегающая к городу территория представлена пологоувалистой равниной, покрытой чехлом покровных пылеватых суглинков. Геологическое расположение г. Воркуты совпадает с центром мульды. Для данного района типичны обширные зоны тектонических нарушений и напряжений. Недра в окрестностях г. Воркуты богаты содержанием таких элементов, как никель, кобальт, ванадий, молибден, цинк, хром, стронций, барий, марганец, радон, что ведёт к их миграции в почву и воду.

В качестве объекта исследования выбраны техногенные грунты с клумб центральной части г. Воркуты. Уникальной особенностью городских почв Воркуты является то, что именно здесь для создания клумб и зелёных зон используется угольный шлак, который специально привозят из мест добычи и переработки угля [6]. Помимо угольного шлама на клумбах используется торфоподобный субстрат, который добывается в окрестностях г. Воркуты на значительной глубине над залежами угля. Городские почвы не только являются техногенными, но ещё и создаются искусственно уже на протяжении нескольких десятилетий.

Места отбора проб выбраны на основании предварительных обследований территорий. В августе 2023 года на исследуемых участках были высажены крупномеры ели обыкновенной высотой 2,0–3,0 м. Посадочный материал был доставлен из подзоны северной тайги Пермского края. Использованы саженцы с закрытой корневой системой, которые упакованы в жёсткую тару, кроны растений при перевозке были связаны и укрыты от высушивания.

Кроме того, после посадки деревья были закреплены растяжками для сохранения вертикального положения.

В 2023 году в результате полевых исследований были отобраны почвенные образцы с глубин 0–5 см на клумбах центральной части г. Воркуты, образованных техногенными почвогрунтами. Глубина отбора проб определялась тем, что плодородный почвенный слой в условиях вечномёрзлотных почв минимален. Кроме того, отбирать пробы на глубину залегания корневой системы исследуемых крупномеров не было необходимости, поскольку почвенные горизонты в клумбах были представлены насыпными техногенными отвалами на всю глубину посадочной ямы крупномеров. С каждой точки отобрано не менее пяти образцов.

После отбора пробы помещали в предварительно подготовленные полиэтиленовые контейнеры и доставляли в лабораторию. В связи с тем, что исследование почвенных проб в используемой методике проводилось в вакууме, объекты исследования готовились способом, исключающим содержание влаги. Образцы сушили, измельчали путём перетирания в керамической ступке и далее досушивали уже гомогенизированную смесь до постоянной массы. Сушка проводилась при комнатной температуре. Для исследования валовых концентраций тяжёлых металлов в пробах грунта использовался микронзондовый рентгеноспектральный анализ с применением электронного комплекса TESCAN СГУ им. Питирима Сорокина. Относительная ошибка анализов лежит в пределах 0,1–3,0 %. Достижимые пределы обнаружения для количественного анализа – 0,00001 вес.%. Исследования каждой пробы проводились не менее чем в пяти повторностях. Каждая повторность представляла собой среднее значение в результате наложения не менее пяти спектров.

Оценку состояния саженцев ели обыкновенной проводили спустя один год после пересадки (в июле 2024 года) на основании внешнего визуального осмотра

состояния хвои (пожелтение и опадение) и прироста (измеряли размер побегов). Всего исследовано 100 деревьев.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программ SPSS и Statistica.



Рис. 1. Расположение мест отбора проб в центральной части г. Воркуты: 1 – клумба по ул. Гагарина; 2 – клумба возле Администрации; 3 – клумбы напротив «Олимпа»; 4 – клумба перед зданием АО «Воркутауголь»

Fig. 1. Location of sampling sites in the central part of Vorkuta: 1 – flowerbed on Gagarina St.; 2 – flowerbed near the City Administration building; 3 – flowerbeds opposite the 'Olympus'; 4 – flowerbed in front of the 'Vorkutaugol' JSC building

Результаты и их обсуждение

Обломки пород в отвалах шахт г. Воркуты представлены аргиллитами, алевро-

литами, песчаником, углём и углисто-глинистой мелочью. В минеральном составе преобладают каолиниты, монтмориллонит (минералы-примеси: кварц, кальцит, пирит, полевые шпаты). В пробах отвала шахты «Воргашорская», которая расположена вблизи г. Воркуты, отмечается аномальное содержание комплекса элементов [7] (табл. 1).

Таблица 1. Содержание некоторых элементов в породах отвала шахты Воргашорская (г/т) [7]
Table 1. Content of some elements in the rocks of the Vorgashorskaya mine dump (g/t) [7]

Характеристика породы	Медь	Цинк	Свинец
Не горелая порода	70	300	30
Горелая порода	1500	1000	70
Прослой	7000	15000	500

Описание грунтов в точках отбора проб приведено в табл. 2. На всех исследуемых участках отмечены разные виды грунтов. Так, в клумбе напротив «Олимпа» использовался свежий угольный шлам, получаемый после обжига отработанной породы. В точках 2 и 4 использован торфоподобный субстрат, который в отличие от угольного шлама не подвергался высокотемпературному обжигу.

Сравнение содержания тяжёлых металлов в исследуемых участках приведено на рис. 2.

Таблица 2. Характеристика грунтов в местах отбора проб и характера местности
Table 2. Characteristics of soils in the sampling locations and the terrain features

Наименование места исследования грунта	Описание грунта	Описание характера местности
Клумба по ул. Гагарина	Подзол с примесью остатков угольного шлама	Открытая со всех сторон площадка, в зимний период снег убирают по краю клумбы (деревья растут далеко от края), при этом деревья засыпают снегом
Клумба возле Администрации	Подзол с торфоподобным субстратом	Открытая со всех сторон площадка, в зимний период снег убирают по краю клумбы, при этом деревья засыпают снегом
Клумбы напротив «Олимпа»	Свежий угольный шлам	Площадка открыта с северо-восточной стороны, в зимний период снег убирают по краю клумбы, ёлки украшают гирляндами, по краю клумбы проходит пешеходная тропинка
Клумба перед зданием АО «Воркутауголь»	Отлежавшийся торфоподобный субстрат	Открытая со всех сторон площадка, в зимний период снег убирают по периметру клумбы, ёлки украшают гирляндами

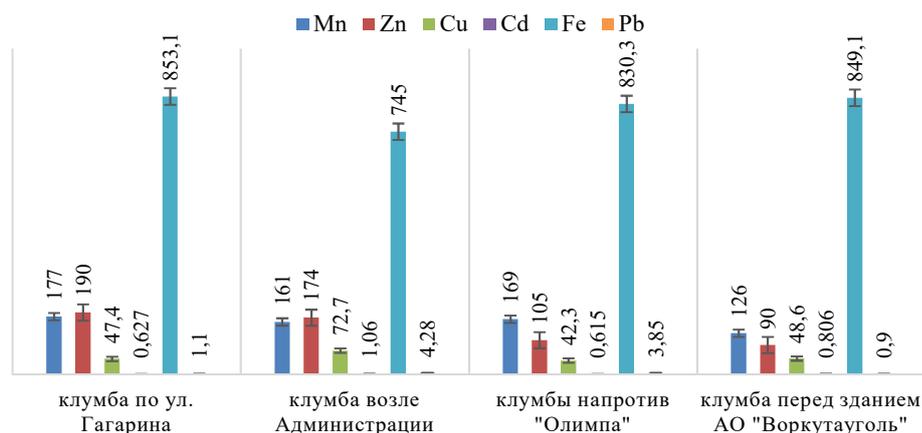


Рис. 2. Содержание тяжёлых металлов в техногенных почвах клумб, расположенных в центральной части г. Воркуты (мг/кг)

Fig. 2. Heavy metal content in the technogenic soils from the flowerbeds located in the central part of Vorkuta (mg/kg)

Все исследуемые почвы характеризуются высоким содержанием валового железа, содержание которого не превышает кларковые значения (38 000 мг/кг). Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) для железа в почве не установлены¹.

При этом, содержание марганца в образцах не превышает ОДК (1500 мг/кг).

Использование в качестве почвообразующего субстрата угольного шлама приводит к тому, что содержание цинка в пробах грунта из клумб по ул. Гагарина и возле администрации города превышает ОДК (110 мг/кг) в 1,7 и 1,6 раза соответственно. Кроме того, в грунте клумбы возле мэрии обнаружено превышение ОДК (1,0 мг/кг) в 1,1 раза по содержанию кадмия. Поскольку грунт клумбы возле городской администрации сформирован подзолом с местным торфом, можно сделать вывод, что используемый торфоподобный субстрат по содержанию некоторых металлов «хуже» угольного шлама.

Известно, что под влиянием факторов почвообразования происходит не только регенерация растительного покрова, но и идёт генерация новых почвенных горизонтов, естественное зарастание участков

и зарождение биоты. Перечисленные процессы указывают на начало естественного восстановления биосистемы нарушенных территорий, причём полная рекультивация почв фиксируется на протяжении 45 и более лет [8].

Клумбы напротив «Олимпа» сформированы полностью из угольного шлама, однако, содержание тяжёлых металлов в указанном грунте соответствует установленным нормам ОДК.

Следует отметить, что содержание в исследуемых пробах свинца не превышает ОДК (65 мг/кг), несмотря на то, что в шламе угольных отвалов содержание свинца может достигать 500 г/т.

Результаты исследования состояния саженцев крупномеров показаны в табл. 3. Наиболее хорошее состояние саженцев крупномеров ели обыкновенной без побурения и опадения хвои наблюдается на клумбе по ул. Гагарина и возле администрации. Значительные повреждения хвои обнаружены на участках напротив «Олимпа» и перед зданием АО «Воркутауголь». Можно предположить, что на состояние хвои влияет украшение деревьев гирляндами, а также уборка снега вблизи посадок в зимний период. Известно, что в Воркуте суровый климат с затяжной зимой, аномально низкими температурами и буранами, поэтому слой снега служит защитой для неокрепших саженцев.

¹ Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.

Таблица 3. Результаты визуального осмотра состояния хвои и прироста

Table 3. Results of the visual inspection of the condition of needles and shoots

Наименование	Количество саженцев, имеющих указанные признаки, %			Итоговое количество нарушений
	побурение хвои	опавшая хвоя	прирост новых побегов менее 0,5 см	
Клумба по ул. Гагарина	7,1±1,1	35,7±3,4	92,9±8,9	142,9±10,9
Клумба возле Администрации	36,4±3,9	18,2±2,2	90,9±8,7	145,5±12,8
Клумбы напротив «Олимпиа»	26,7±3,0	46,7±4,4	86,7±8,2	160,1±15,5
Клумба перед зданием АО «Воркутауголь»	16,7±2,1	100,0±9,8	83,3±7,9	200,0±17,2

Для сопоставления результатов исследования тяжёлых металлов в грунте и состояния саженцев, произрастающих на этих же участках, был проведён расчёт коэффициента корреляции.

Предварительно проведена оценка суммарного коэффициента превышения ОДК тяжёлых металлов для исследуемых почвенных образцов по формуле: $\sum \text{Кодк} = \sum C_i / \text{ОДК}$, где C – концентрация тяжёлого металла в пробе грунта, ОДК – ориентировочно допустимая концентрация соответствующего металла¹. Расчёт Кодк не производился для железа, поскольку для данного металла не установлены нормативы ОДК. Результаты расчёта коэффициента превышения ОДК представлены в табл. 4.

Согласно расчёту коэффициента превышения ОДК (3,2), можно сделать вывод, что на клумбах по ул. Гагарина и возле

администрации наблюдается наибольшее превышение ОДК.

Далее был произведён расчёт коэффициента корреляции итогового количества нарушений саженцев (табл. 3) и $\sum \text{Кодк}$ (табл. 4). Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,724, а коэффициент ранговой корреляции Спирмена – 0,738, что доказывает сильную обратную корреляцию. Следовательно, чем больше концентрация тяжёлых металлов в грунте превышает установленные нормативы ОДК, тем лучше состояние саженцев. Однако коэффициент корреляции Пирсона прироста хвои (столбец 4, табл. 3) от $\sum \text{Кодк}$ составляет 0,893, что доказывает влияние повышенных валовых концентраций тяжёлых металлов на рост молодых побегов.

Таким образом, нельзя сделать однозначных выводов о влиянии тяжёлых металлов на состояние саженцев.

Таблица 4. Результаты расчёта коэффициента превышения ОДК

Table 4. Results of the calculation of the APC exceedance coefficient

Наименование	Кодк Mn	Кодк Zn	Кодк Cu	Кодк Cd	Кодк Pb	$\sum \text{Кодк}$
Клумба по ул. Гагарина	0,1	1,7	0,7	0,6	0,0	3,2
Клумба возле Администрации	0,1	1,6	0,4	1,1	0,1	3,2
Клумбы напротив «Олимпиа»	0,1	1,0	0,6	0,6	0,1	2,4
Клумба перед зданием АО «Воркутауголь»	0,1	0,8	0,7	0,8	0,0	2,5

Выводы

Исследование техногенных грунтов г. Воркуты показало, что почвы в клумбах города представлены преимущественно подзолом с примесью угольного шлама или торфоподобным субстратом.

Изучение валовых концентраций тяжёлых металлов в техногенных почвах клумб, расположенных в центральной части г. Воркуты, выявило следующие особенности: исследуемые грунты характеризуются наличием железа, марганца, меди и свинца, концентрации которых не превышают установленные нормативы ОДК; содержание цинка в пробах грунта

из клумб по ул. Гагарина и возле администрации города превышает ОДК в 1,7 и 1,6 раза соответственно; в грунте клумбы возле администрации также обнаружено повышенное содержание кадмия (в 1,1 раза по сравнению с ОДК).

Сопоставление результатов исследования техногенных почв с результатами оценки состояния крупномеров ели обыкновенной на основании расчёта корреляционной зависимости итогового количества нарушений саженцев от суммарного коэффициента превышения ОДК тяжёлых металлов в исследуемых пробах не выявило однозначных закономерностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности грунтов и потенциал восстановления природно-технической системы «Хвостохранилище ЕВРАЗ КГОК» / Е. А. Меньшикова, Т. И. Караваева, Е. А. Хайрулина и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 9. С. 54–66. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3353; EDN: SAQOFD
2. Семина И. С., Андроханов В. А., Куляпина Е. Д. Опыт использования отходов углеобогащения для рекультивации нарушенных участков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 9. С. 159–175. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-159-175; EDN: LDHZUB
3. Брагина П. С., Герасимова М. И. Почвообразовательные процессы на отвалах горнодобывающих предприятий (на примере юга Кемеровской области) // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 45–51. EDN: RXNVKZ
4. Кречетов П. П., Шарпова А. В., Касимова Д. А. Рекультивированные отвалы как депонирующая среда актуального и отложенного углеродного следа // Почвы и окружающая среда: Всероссийская научная конференция с международным участием, посвящённая 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 02–06 октября 2023 года. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. С. 543–548. EDN: YZFUPM
5. Клевцова М. А., Михеев А. А. Оценка влияния стрессовых факторов урбанизированной среды на древесные растения // Проблемы и мониторинг природных экосистем: Сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 19–20 октября 2020 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2020. С. 73–76. EDN: TQTVZL
6. Антропогенные и постантропогенные изменения почв Севера России / А. А. Дымов, Р. В. Десяткин, А. Р. Десяткин и др. // Почвы – стратегический ресурс России: Материалы пленарных докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв, Сыктывкар, 10–14 августа 2022 года. Часть 1 (расширенная и дополненная). Москва–Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2022. С. 26–31. EDN: RBYUFQ
7. Шувалов Ю. В., Нифонтова Т. И., Эжгардт В. И. Переработка твёрдых отходов добычи и обогащения угля Печорского бассейна как мера защиты природной среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 7. С. 95–98. EDN: KXFGSR
8. Первичные процессы почвообразования в условиях естественного зарастания техногенно-нарушенных ландшафтов / Ф. Е. Козыбаева, Г. Б. Бейсеева, С. Утугельбаев и др. // Почвоведение и агрохимия. 2010. № 3. С. 13–25. EDN: KWKMMW

Статья поступила в редакцию 23.11.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 03.03.2025

Информация об авторе

МАЗУР Виктория Васильевна – кандидат географических наук, младший научный сотрудник Института естественных наук, СГУ им. Питирима Сорокина. Область научных интересов – геоэкология, мониторинг экосистем. Автор 49 научных публикаций. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2648-4878>; SPIN-код: 7239-1035; Researcher ID: E-4706-2014

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 911.9:502

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.86>

EDN: OASHES

Geo-Ecological Assessment of the Prospects of Using Coal Mining Waste as a Soil Substrate in the Arctic Conditions

V. V. Mazur

Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,
55, Oktyabrsky Prosp., Syktyvkar, 167001, Russian Federation
vvmazur@list.ru

Abstract. *Introduction.* The technogenic transformation and the natural potential of coal industry waste allow the latter to be used in the reclamation of disturbed lands. Technogenic soils are sources of chemical substances, which are included in natural processes and create a special kind of natural and technical systems. At the same time, the most sensitive indicator of the stress impact of anthropogenic factors in an urban environment are woody plants. *The aim* of the study was to investigate the ecological state of technogenic soils and the prospects of using coal washery rejects in land reclamation in the Arctic conditions. *The objectives* of the study were to determine the gross concentrations of heavy metals in Vorkuta technogenic soils formed by coal sludge, as well as to assess their impact on the growth and development of woody vegetation. *Object and methods.* The object of the study was technogenic soils from flowerbeds installed in the central part of the city of Vorkuta. Microprobe X-ray spectral analysis was used to determine the gross concentrations of heavy metals in the samples. To assess the condition of tree seedlings, a visual inspection of the needle foliage (yellowing and defoliation) was performed, and the young shoot lengths were measured. *Results.* All of the studied soils are characterized by high total iron content. The zinc content in the soil samples taken from the flowerbeds located along Gagarina St. and near the City Administration building exceeds the approximate permissible concentration, APC (110 mg/kg). The soil from flowerbeds near the City Administration building contains increased copper and cadmium contents as compared to APCs (66 and 1.0 mg/kg, respectively). The concentration of lead in the soil samples does not exceed APC (65 mg/kg). The study of large-sized seedling showed that the best condition of large-sized seedlings of Norway spruce (*Picea abies*) with no signs of browning or defoliation was observed in the flowerbeds on Gagarina St. and near the City Administration building. Significant damage to needles was found in the sites opposite the 'Olympus' and in front of the 'Vorkutaugol' JSC building. *Conclusion.* The study revealed the possibility of using coal mining waste as a soil substrate for flowerbeds of the city. The gross concentrations of heavy metals in the technogenic soils of the flowerbeds located in the central part of Vorkuta were studied. The research of the impact of technogenic soils formed by coal mining waste on the condition of large-sized Norway spruce seedlings did not reveal any unambiguous patterns.

Keywords: technogenic soil; heavy metals; Norway spruce (*Picea abies*); Vorkuta; correlation coefficient

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Mazur V. V. Geo-Ecological Assessment of the Prospects of Using Coal Mining Waste as a Soil Substrate in the Arctic Conditions. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):86–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.86>; EDN: OASHES

REFERENCES

1. Menshikova E. A., Karavaeva T. I., Khairulina E. A. et al. Specific features of soils and ecological state of natural technical system "EVRAZ KGOK Tailing Dump". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering Engineering.* 2021; 332(9):54–66. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3353; EDN: SAQOFD (In Russ.).
2. Semina I. S., Androkhanov V. A., Kulyapina E. D. The experience of using coal washing rejects in reclamation of disturbed lands. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal).* 2020;(9):159–175. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-159-175; EDN: LDHZUB (In Russ.).
3. Bragina P. S., Gerasimova M. I. Pedogenic processes on mining dumps (a case study of Southern Kemerovo Oblast). *Geography and Natural Resources.* 2014;(1):45–51. EDN: RXNVKZ (In Russ.).
4. Krechetov P. P., Sharapova A. V., Kasimova D. A. et al. Recultivated dumps as the depositing medium of the actual and deposited carbon footprint. In: *Soils and*

environment. Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the RAS; Novosibirsk, October 02–06, 2023. Novosibirsk, ISSA SB RAS Publ.; 2023: 543–548. EDN: YZFUPL (In Russ.).

5. Klevtsova M. A., Mikheev A. A. Assessment of the impact of urban environment stress factors on woody plants. In: *Problems and monitoring of natural ecosystems*. Collection of articles of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference (Penza, October 19–20, 2020). Penza, Penza State Agrarian University; 2020: 73–76. EDN: TQTVZL (In Russ.).

6. Dymov A. A., Desyatkin R. V., Desyatkin A. R. et al. Anthropogenic and post-anthropogenic changes in soils of the North of Russia. In: *Soils – a strategic*

resource of Russia. Proceedings of the plenary reports of the 8th Congress of the V. V. Dokuchaev Society of Soil Scientists and the School of Young Scientists on Morphology and Classification of Soils (Syktyvkar, August 10–14, 2022). Part 1. Moskva-Syktyvkar: IB Komi SC UB RAS Publ., 2022: 26–31. EDN: RBYUFQ (In Russ.).

7. Shuvalov Yu. V., Nifontova T. I., Ekgardt V. I. Processing solid wastes of coal mining and enrichment in Pechora basin as a step to protect environment. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2003;(7): 95–98. EDN: KXFGSR (In Russ.).

8. Kozybaeva F. E., Beiseeva G. B., Utugelbaev S. et al. Primary processes of soil formation under the conditions of natural overgrowth of technogenically disturbed terrains. *Soil Science and Agrochemistry*. 2010; (3):13–25. EDN: KWKMMW (In Russ.).

The article was submitted 23.11.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 03.03.2025

Information about the author

Victoria V. Mazur – Candidate of Geographical Sciences, Junior Researcher, Institute of Natural Sciences, Pitirim Sorokin Syktyvkar State University. Research interests – geoecology, monitoring of ecosystems. Author of 49 scientific publications. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2648-4878>; SPIN: 7239-1035, Researcher ID: E-4706-2014

Conflict of interests: the author declare no conflict of interest.
The author has read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Доводим до сведения авторов и читателей нашего журнала, что в соответствии с Приказом Минобрнауки России от 24.02.2021 № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются учёные степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утверждённое приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093» (зарегистрировано в Минюсте России 06.04.2021 № 62998) изменились научные специальности и их паспорта.

С декабря 2022 года журнал «Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование» печатает статьи по обновлённым научным специальностям и соответствующим им отраслям науки в следующих рубриках:

Лесное хозяйство:

4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство:

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные и биологические).

4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация (сельскохозяйственные, биологические и технические).

Технологии и машины лесного дела:

4.3. Агроинженерия и пищевые технологии:

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (технические, биологические, химические).

Проблемы экологии и рационального природопользования:

1.6. Науки о Земле и окружающей среде:

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (географические).

1.6.21. Геоэкология (географические).

Даты, события, комментарии. По-прежнему будут размещаться материалы о знаменательных датах, конференциях и форумах с их резолюциями, о других событиях, а также рецензии на статьи и монографии.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершённых исследований авторов, объёмом 8–15 страниц, включая рисунки.

К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В «Вестнике...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Требования к оригиналам предоставляемых работ

Структура научной статьи

1. Аннотация (3–4 предложения).
2. Ключевые слова или словосочетания (не более 10) отделяются друг от друга точкой с запятой.
3. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
4. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1–2 предложения).
5. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
6. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
7. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
8. Интерпретация результатов или их анализ.
9. Выводы, отражающие новизну полученных результатов, показывающих, что цель, поставленная в работе, достигнута.

Подробнее – на сайте журнала: <https://vestnik-forest.ru/>

Подписка на журнал осуществляется по интернет-каталогу «Пресса России» (подписной индекс **42920**, тематический указатель Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов).