

ISSN 1993-0135

ХВОЙНЫЕ



БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

2025

Том XLIII
Номер 2

<http://www.sibsau.ru>

Красноярск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLIII
№ 2

Красноярск
2025

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLIII, № 2

Журнал основан в 1962 г.
(до 2002 г. носил название «Лиственница»).

Выходит 6 раз в год

Главный редактор

Братилова Наталья Петровна, д.с.-х.н. профессор

Ответственный секретарь

Коротков Александр Анатольевич, к.с.-х.н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Авдеева Елена Владимировна, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Алашкевич Юрий Давыдович, д.т.н., профессор, академик Российской академии образования (РАО)
(СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Бабич Николай Алексеевич, д.с.-х.н., профессор (САФУ, Архангельск)
Бессчетнов Владимир Петрович, д.б.н., профессор (НГСХА, Нижний Новгород)
Вараксин Геннадий Сергеевич, д.с.-х.н., профессор (Институт леса СО РАН, Красноярск)
Верховец Сергей Владимирович, к.с.-х.н., доцент (проректор по перспективным проектам СФУ, Красноярск)
Выводцев Николай Васильевич, д.с.-х.н., профессор (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)
Ермолин Владимир Николаевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Залесов Сергей Вениаминович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Иванов Валерий Александрович, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Кобаяси Рёсукэ, к.с.-х.н. (Центр полевых биосферных исследований Севера, Университет Хоккайдо)
Казаков Яков Владимирович, д.т.н. (САФУ, Архангельск)
Крутовский Константин Валерьевич, профессор (Техасский агрономический университет, США)
Кузнецов Борис Николаевич, д.х.н., профессор (ИХХТ СО РАН, Красноярск)
Матвеева Римма Никитична, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Мельник Пётр Григорьевич, к.с.-х.н., доцент (МГТУ им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); старший научный сотрудник (Институт лесоведения Российской академии наук)
Муратова Елена Николаевна, д.б.н., профессор (Институт леса СО РАН, Красноярск)
Нагимов Зуфар Ягфарович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Нимц Петер, профессор (Институт строительных материалов и физики древесины (IfB)
Высшей швейцарской технической школы (ETH), Цюрих, Швейцария)
Огурцов Виктор Владимирович, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Онучин Александр Александрович, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Пен Роберт Зусьевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Плотников Сергей Михайлович, д.т.н., профессор (ИрГУПС, Красноярск)
Прохоров Валерий Николаевич, д.б.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси
(Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, Минск, Беларусь)
Рязанова Татьяна Васильевна, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Сафин Руслан Рушанович, д.т.н., профессор (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань)
Селиховкин Андрей Витимович, д.б.н., профессор (СПбЛТА им. Кирова, Санкт-Петербург)
Стороженко Владимир Григорьевич, д.б.н. (Институт лесоведения РАН, Москва)
Субоч Георгий Анатольевич, д.х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Суховольский Владислав Григорьевич, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Шевелев Сергей Леонидович, д.с.-х.н. профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Якубов Харис Галиулович, д.б.н., профессор (МГУ, Москва)

CONIFERS of the BOREAL AREA

Theoretical and Applied Research Journal

Volume XLIII, No. 2

The journal was founded in 1962
(Prior to 2002 it had the title «Larch»).

Issued 6 times a year

Editor-In-Chief

Dr. Natalia P. Bratilova, Professor

Executive secretary

PhD. Aleksandr A. Korotkov, Associate Professor

EDITORIAL BOARD:

Avdeeva Elena V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Alashkevich Yuri D., Dr. Sc. in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Education (RAO) (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Babich Nikolay A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Besschetnov Vladimir P., Dr. Sc. in Biology, Professor (Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod)
Ermolin Vladimir N., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Ivanov Valery A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Kobayashi Ryosuke, Cand. Sc. in Agriculture (North Field Biosphere Research Center (Hokkaido University)
Kazakov Yakov V., Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Krutovsky Konstantin V., Professor (Texas A&M University, College Station, USA)
Kuznetsov Boris N., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Institute of Chemistry and Chemical Technology, Krasnoyarsk)
Matveeva Rimma N., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Melnik Pyotr G., Cand. Sc. in Agriculture, Associate Professor (Bauman Moscow State Technical University (National Research University); Senior Researcher (Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences)
Muratova Elena N. Dr. Sc. in Biology (Professor Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Nagimov Zufar Ya., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Niemz Peter, Professor (Institute for Building Materials and Wood Physics (IfB) at Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland)
Onurtsov Victor V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Onuchin Alexandr A., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Pen Robert Z., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Plotnikov Sergey. M., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk)
Prokhorov Valery V., Dr. Sc. in Biology, Professor, Associate Member of the National Academy of Sciences of Belarus (Institute of experimental botany of NAS of Belarus, Minsk, Belarus)
Ryazanova Tatyana V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Safin Ruslan R., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Kazan National Research Technological University, Kazan)
Selikhovkin Andrey V., Dr. Sc. in Biology, Professor (Saint-Petersburg State Forest-Technical Academy)
Shevelev Sergei L., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Storochenko Vladimir G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Institute of Forest Sciences, Moscow)
Suboch Georgii A., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Soukhovolsky Vladislav G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Varaksin Gennady S., Dr. Sc. in Agricultural (Professor Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Vykhovets Sergei V., Cand. Sc. in Agriculture, Docent (Vice-Rector for Advanced Projects of SFU, Krasnoyarsk)
Vyvodtsev Nikolay V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Pacific National University, Khabarovsk)
Usoltsev Vladimir A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Zalesov Sergey V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Yakubov Haris H. Dr. Sc. in Biology, Professor (Moscow State University, Moscow)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-70531 от 25 июля 2017 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Certificate of Registration as a Mass Media Resource.
Certificate: PI No. FC77-70531, dated 25 July 2017,
given by The Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media

Статьи в журнале публикуются бесплатно после обязательного рецензирования
и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.hbz.sibsau.ru).

Журнал выходит 6 раз в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки
(<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (<https://hbz.sibsau.ru/>)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала
«Хвойные бореальной зоны» ссылка обязательна

Номер подписного индекса в каталоге «Книга-Сервис» Е63087, «Пресса России» 63087

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

Адрес учредителя и издателя

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660037, Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31

Адрес редакции

Российская Федерация, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82, каб. ц-01а
Редакция журнала «Хвойные бореальной зоны»
Тел. (391) 266-03-96, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Address: Editorial office of the journal “Conifers of the Boreal Area”
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation.
Department of Forest Plantation
Phone: (391) 266-03-96, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Ответственный редактор А. А. Коротков.
Корректор П. С. Бороздов. Оригинал-макет и верстка Л. В. Звонаревой.

Подписано в печать 27.05.2025. Дата выхода в свет 05.06.2025. Формат 70×108/8.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 13,8. Тираж 700 экз.
Заказ 3583. С 1098/25. Цена свободная.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, Красноярский край, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rio@mail.sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.

Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660049, Красноярский край, г. Красноярск, просп. Мира, 82. Тел. (391) 222-73-28.

Содержание

БИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ, ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Раздымахо А. А., Слипец А. А., Арёфьева М. А., Савченкова В. А. Методические подходы по формированию банка генетических данных деревьев основных лесообразующих пород на территории Российской Федерации	7
Байс А. А., Мамедова С. К., Андропова А. А., Мотырев Н. О. Шкала оценки процесса лесовосстановления и интенсивности роста молодняка сосны на залежных землях Красноярской лесостепи	14
Сомов Е. В., Шевелев С. Л. Расчетная оценка линейного разрешения на местности цифровой беспилотной аэрофотосъемочной системы для задач таксационного дешифрирования (состояние вопроса, проблематика, модели)	20
Преденна И. В., Залесов С. В., Итешина Н. М., Попов А. С., Семенова М. Е. Снижение возраста спелости как способ повышения продуктивности лесов и минимизации рисков при выращивании еловых насаждений	27
Матвеева Р. Н., Комаров И. В., Гришлова М. В. Отселектированные 20-летние деревья сосны кедровой сибирской по интенсивности роста и раннему репродуктивному развитию	35
Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Шенмайер Н. А., Коростелев А. С. Репродуктивное развитие полусибов 38-летнего возраста сосны кедровой сибирской в дендрарии СибГУ им. М. Ф. Решетнева	40
Усольцев В. А., Терехов Г. Г. Аллометрические модели биомассы и морфологии деревьев кедра сибирского на Урале и проблема мультиколлинеарности факторов	46
Безруких В. А., Авдеева Е. В., Коротков А. А., Лигаева Н. А., Кузнецова О. А. Роль лесостепной и подтаежной (травяных лесов) растительности в формировании ландшафтов бореальной зоны Приенисейской Сибири	55
Пахарькова Н. В., Субботин М. А., Шикалова Е. А., Гетте И. Г., Калабина А. А., Куппер И. И., Максимова К. М., Масенцова И. В. Кластеризация местообитаний сосны сибирской кедровой на склонах хребта Борус Западного Саяна	63

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Огурцов В. В., Орлов А. А., Дук Д. В. Идентификация проблемы синхронизации процессов раскря брёвен и сушки пиломатериалов	70
Шапиро В. Я., Новиков М. С., Григорьев И. В., Перфильев П. Н., Тихонов Е. А., Друзьянова В. П. Оценка работоспособности трасс движения лесных машин на склоне оттаивающего почвогрунта с учетом маневрирования движителя	77

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Мирошникова К. А., Литовка Ю. А., Джалолов И. И., Павлов И. Н. Бактериальный микробиом филлосферы лиственницы сибирской (<i>larix sibirica</i> ledeb.) в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района.....	85
--	----

Авторская ссылка	92
------------------------	----

Contents

BIOLOGY AND ECOLOGY, FORESTRY

Razdymaho A. A., Slipets A. A., Arefeva M. A., Savchenkova V. A. Methodological approaches to the formation of a bank of genetic data of trees of the main forest-forming species in the territory of the Russian Federation	7
Vais A. A., Mamedova S. K., Andronova A. A., Motyrev N. O. Assessment scale of reforestation process and growth intensity of young pine trees on fallow lands of the Krasnoyarsk forest-steppe	14
Somov E. V., Shevelyov S. L. Calculated estimation of the linear resolution on the ground of a digital unmanned aerial photography system for taxation decryption tasks (issue status, problematics, models)	20
Predeina I. V., Zalesov S. V., Iteshina N. M., Popov A. S., Semenova M. E. Reducing the age of maturity as a way to increase forest productivity and minimize risks in growing spruce stands	27
Matveeva R. N., Komarov I. V., Grishlova M. V. 20-year-old <i>pinus sibirica</i> trees selected by growth intensity and early reproductive development	35
Matveeva R. N., Butorova O. F., Shenmayer N. A., Korostelev A. S. Reproductive development of 38-year-old siberian cedar pine semis in the arboretum of Reshetnev University	40
Usoltsev V. A., Terekhov G. G. Allometric models of biomass and morphology of <i>pinus sibirica</i> Du Tour trees in the Urals and the problem of multicollinearity of factors	46
Bezrukikh V. A., Avdeeva E. V., Korotkov A. A., Ligaeva N. A., Kuznetsova O. A. The role of forest-steppe and sub-taiga (grass forests) vegetation in the formation of landscapes of the boreal zone of Yenisei Siberia	55
Pakharkova N. V., Subbotin M. A., Shikalova E. A., Gette I. G., Kalabina A. A., Cupper I. I., Maksimova K. M., Masentsova I. V. Clustering of siberian cedar pine habitats on the slopes of the borus ridge of the Western Sayan	63

TECHNOLOGY OF HARVESTING AND MECHANICAL PROCESSING OF WOOD

Ogurtsov V. V., Orlov A. A., Duk D. V. Identification of the problem of synchronization of log cutting and sawn timber drying processes	70
Shapiro V. Ya., Novikov M. S., Grigorev I. V., Perfiliev P. N., Tikhonov E. A., Druzyanova V. P. Assessment of forest machine tracks operability on the slope of thawing soil taking into account manoeuvring of the vehicle	77

CHEMICAL PROCESSING TECHNOGY

Miroshnikova K. A., Litovka Yu. A., Jalolov I. I., Pavlov I. N. Bacterial microbiome of the phyllosphere of siberian larch (<i>larix sibirica</i> ledeb.) in the zone of influence of industrial emissions from the Norilsk industrial region	85
---	----

Author's link	92
----------------------------	----

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПО ФОРМИРОВАНИЮ БАНКА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЕРЕВЬЕВ ОСНОВНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. А. Раздымахо^{1*}, А. А. Слипец², М. А. Арефьева^{2**}, В. А. Савченкова^{1***}

¹Отдел лесной пирологии и охраны лесов от пожаров –

Центр развития приоритетных беспилотных технологий в лесной отрасли ФБУ ВНИИЛМ
Российская Федерация, 141200, г. Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 15

²Российский центр защиты леса

Российская Федерация, 141207, Московская область, г. Пушкино, ул. Надсоновская, 13
E-mail: *razdymakho00@mail.ru, **arefevama@rcfh.rosleshoz.gov.ru, ***9651658826@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросу методологии генетической паспортизации основных лесобразующих пород, который в настоящее время приобрел особую актуальность и требует регулирования в правовом поле. Единственный регламентированный подход к материально-техническому оснащению лабораторий и методикам выполнения работ по применению молекулярно-генетических методов диагностики в лесной отрасли – это залог формирования надежного фундамента для объективной и научно-обоснованной оценки единого массива достоверных данных по генетической устойчивости или внутривидовой изменчивости той или иной лесной популяции.

В связи с социально-политической обстановкой в стране совершенствование подходов при формировании базы данных особо актуально, из-за возможного изолирования Российской Федерации от мировых баз данных. Обеспечение суверенитета страны в вопросах комплексного решения задач ускоренного развития генетических технологий, в частности в лесной отрасли, является необходимым шагом, в том числе для обеспечения национальной экологической и экономической безопасности.

Анализ 9-ти существующих баз данных генетических ресурсов растений, размещенных на общедоступных платформах в сети «интернет», а также отраслевой автоматизированной аналитической системы – ААС «Лесная генетика», созданной в ФБУ «Рослесозащита» в рамках реализации Комплексной программы развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной Правительством РФ 24.04.2012 № 1853н-П, позволил сформулировать ряд предложений по совершенствованию подходов к организации референсной базы генетических данных основных лесобразующих пород. Для повышения эффективности работы с системой «Лесная генетика», планируется расширить географическую сеть сбора образцов, внедрить лесосеменное районирование и растровый слой карт, реализовать функцию визуализации проводимых обследований и получаемых результатов, расширить базу болезней и вредителей леса (включая микроорганизмы). При этом в целом концептуальный подход к формированию данной аналитической системы близок к существующему международному.

Ключевые слова: лесная генетика, база данных, ДНК, генетические технологии.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 7–13

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE FORMATION OF A BANK OF GENETIC DATA OF TREES OF THE MAIN FOREST-FORMING SPECIES IN THE TERRITORY OF THE RUSSIAN FEDERATION

A. A. Razdymaho^{1*}, A. A. Slipets², M. A. Arefeva^{2**}, V. A. Savchenkova^{1***}

¹Department of Forest Pyrology and Forest Protection from Fires –

Center for the Development of Priority Unmanned Technologies in the Forestry Industry FBI ARRISMF
15, Institutskaya str., Pushkino, Moscow region, 141200, Russian Federation

²Russian Centre of Forest Health

13, Nadsonovskaya str., Pushkino, Moscow region, 141207, Russian Federation
E-mail: *razdymakho00@mail.ru, **arefevama@rcfh.rosleshoz.gov.ru, ***9651658826@yandex.ru

Annotation. *The article is devoted to the issue of the methodology of genetic certification of the main forest-forming species, which has now acquired particular relevance and requires regulation in the legal field. A uniform regulated approach to the logistical equipment of laboratories and methods of performing work on the use of molecular genetic diagnostic methods in the forest industry is the key to forming a reliable foundation for an objective and scientifically sound assessment of a single set of reliable data on the genetic stability or intraspecific variability of a particular forest population. Due to the socio-political situation in the country, improving approaches to database formation is particularly important, as the Russian Federation may be isolated from the world databases. Ensuring the sovereignty of the country in the complex solution of the tasks of accelerated development of genetic technologies, in particular in the forest industry, is a necessary step, including the ensuring of national environmental and economic security. Analysis of nine existing databases of plant genetic resources hosted on publicly available platforms on the Internet, as well as the industry – specific automated analytical system AAS “Forest Genetics”, created at the Federal State Budgetary Institution Roslesozashchita as part of the implementation of the Integrated Biotechnology Development Program in the Russian Federation for the period up to 2020, approved by the Government of the Russian Federation on 04.24.2012 No. 1853p-P, allowed us to formulate a number of proposals for improving approaches to organizing a reference database of genetic data on the main forest-forming species. To improve the efficiency of working with the Forest Genetics system, it is planned to expand the geographical network of sample collection, introduce forest-seed zoning and a raster layer of maps, implement the function of visualizing surveys and results, expand the database of forest diseases and pests (including microorganisms). At the same time, in general, the conceptual approach to the formation of this analytical system is close to the existing international one.*

Keywords: *forest genetics, database, DNA, genetic technologies.*

В лесном хозяйстве в настоящее время особенно востребованы технологии, которые позволяют проводить генетический контроль круглого леса и посадочного материала, а также определять болезни и вредителей на ранних стадиях.

Стратегия развития лесной отрасли России предусматривает приоритетность применения генетических технологий. Это решение соответствует положениям государственной политики по обеспечению научно-технологического развития Российской Федерации [15–19].

Генетические методы по сравнению с традиционными методами исследования, гораздо более информативны и сокращают сроки получения результатов, что позволяет принять своевременные меры наиболее эффективно [11; 12; 14].

Сведения о генетической структуре популяций основных лесобразующих пород позволяет уточнить границы их ареалов, подвидов, форм, экотипов, что позволяет обеспечить устойчивость лесных экосистем за счет разделения подходов к ведению лесного хозяйства, а также поможет сохранить лесные генетические ресурсы, что обеспечит биоразнообразие лесов Российской Федерации [1; 2; 7; 13; 21–23].

Обширная, систематизированная генетическая база данных, содержащая сведения о паспортизации насаждений лесобразующих пород, объектов лесного семеноводства и репродуктивного материала, а также информацию о фитосанитарном состоянии посадочного материала и насаждений, в лесной отрасли по всей стране стимулирует рациональное управление лесами, ускорение социально-экономического развития регионов Российской Федерации.

Кроме того, содержащаяся в ней информация может стать эффективным инструментом контроля за незаконным оборотом древесины, а также контроля за оборотом репродуктивного материала лесных растений в соответствии с лесосеменным районированием при воспроизводстве лесов [5; 9; 20; 24].

Цифровые технологии продолжают развиваться и проникать во все сферы жизни, включая лесное хозяй-

ство [3; 6; 8]. Формируемая в Российском центре защиты леса (ФБУ «Рослесозащита») генетическая база данных по основным лесобразующим породам, территории лесного фонда – автоматизированная аналитическая система (ААС) «Лесная генетика», – на сегодняшний день является единственной в своем роде генетической базой данных по основным лесобразующим породам, произрастающим на территории лесного фонда Российской Федерации. В настоящее время разработчиками ФБУ «Рослесозащита» подготовлена документация для передачи ее в Роспатент.

В ходе настоящего исследования установлено, что продолжается систематическая работа отраслевых учреждений Рослесхоза по лесной генетике, результаты которых в настоящее время используются только для служебного пользования и могут лечь в основу, в том числе при формировании референсной генетической базы данных популяций, для оценки места происхождения древесины, и/или при кластеризации основных лесобразующих пород.

В связи с социально-политической обстановкой в стране совершенствование существующей базы данных особо актуально, из-за возможного изолирования Российской Федерации от мировых информационных систем.

Актуальность ее создания заключилась в необходимости многократного обращения к тем или иным сведениям для решения множества рабочих задач, что нельзя было сделать быстро в разрозненных напечатанных и оцифрованных документах, оценить общую картину по географическому распределению аллельной изменчивости видов лесобразующих пород на их ареалах в масштабах Российской Федерации, выявить устойчивые к вредителям и болезням виды и формы, подтвердить достоверность происхождения семян, сеянцев, саженцев и древесины и т. д.

Проекты по созданию банков генетической информации реализуют все страны-лидеры мировой экономики, вкладывая в эту работу огромные средства.

Проект «3 миллиона геномов» (3-Million Genomes Project), Кумай. О запуске проекта объявлено в 2015

году. Его задача – собрать и расшифровать геномы одного миллиона человек, одного миллиона растений и животных и одного миллиона бактерий, необходимых для жизнедеятельности человеческого организма (микробиоты).

В 2016 году в США на исследование геномов выделено 215 млн долларов.

В конце 2015 года президент США Барак Обама заявил о беспрецедентных инвестициях в исследования генома человека. Поставлена задача – расшифровка геномов миллиона человек. 130 млн долларов уйдет на фундаментальные исследования: ученые будут искать связи между генетическими особенностями, влиянием среды, образа жизни с различными показателями здоровья.

Проект GNC (German National Cohort), запустила Германия, UK Biobank, Великобритания, 200 биобанков Нидерландов

Россия – белое пятно на «генетической карте мира» генетических банков данных.

Однако создание подобного международным примерам банков данных – это необходимый шаг, в том числе для обеспечения национальной экологической и экономической безопасности. При этом, по мнению ряда экспертов, в этой области огромное число задач для IT-индустрии, которая традиционно сильна в России. Мало собрать данные, нужно обеспечить условия, чтобы эти данные активно использовались, чтобы их можно было легко и быстро обрабатывать, чтобы к ним был доступ у всех заинтересованных ученых.

В рамках настоящего исследования проанализировано 9 существующих баз данных генетических ресурсов растений, размещенных на общедоступных платформах в сети «интернет», а также отраслевой автоматизированной аналитической системы – ААС «Лесная генетика», созданной в ФБУ «Рослесозащита», созданной в рамках реализации Комплексной программы развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной Правительством РФ 24.04.2012 № 1853п-П.

База данных по внутривидовой изменчивости хвойных растений Сибири [10]. Данная база данных была создана в Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск. Основной задачей базы данных является сбор и систематизация огромного количества информации о внутривидовых таксонах, полиморфизме и изменчивости видов хвойных растений Сибири, которая получена как методами морфологического анализа, так и методами биохимической генетики и кариологического анализа.

NCBI (National Center for Biotechnology Information) [4; 28; 29]. NCBI организована в 1988 г. как отделение National Library of Medicine (NLM) в National Institutes of Health (NIH). В настоящее время это крупнейшая биологическая база данных (молекулярная биология, биохимия и генетика). NCBI имеет мощные системы обработки данных и представления этих данных.

NCBI предоставляет информацию о базах данных белковых доменов, ДНК (GenBank) и РНК, по своей сути NCBI является их основой, а также статей научной литературы (PubMed) и таксономичной информа-

ции (TaxBrowser), обеспечивает поиск сведений о конкретном биологическом виде (Taxonomy), содержит различные стандартные программы биоинформатики (BLAST). Доступ обеспечивается через поисковую систему Entrez.

Список «Genes» представляет собой ресурс для поиска последовательности генов и аннотаций, используемых в качестве справочных материалов для изучения структуры, экспрессии и эволюции ортологов (общих генов от одного предка).

Ресурс «BLAST» – алгоритм для сравнения первичной информации о биологических последовательностях, таких как аминокислотные последовательности белков или нуклеотидов ДНК и / или последовательностей РНК. BLAST позволяет сравнивать последовательности нуклеотидов или белков с базами данных последовательностей, и вычислять статистические показатели [25].

GenBank – база данных ДНК и РНК, а также последовательности закодированных в них белков [27]. Основная информация, представленная в GenBank, включает в себя:

1. Лocus: номер, длина, молекулярный тип, тип гена, тип топологии.
2. Краткое описание гена.
3. Ключевые слова: могут использоваться для поиска в базе данных.
4. Общее название вида, к которому принадлежит Исходная последовательность.
5. Организм – подробное знакомство с видами.
6. Ссылка – Источник научной литературы по видам.
7. Комментарии.
8. Экспорт последовательности генов и его краткого описания.

Структура записи базы «Nucleotide» выглядит следующим образом: наименование локуса, длина последовательности, ее тип, описание, организм, а также авторы и выходные авторы публикации, где впервые появилась данная последовательность. Далее следует перевод нуклеотидной последовательности в аминокислотную и сама последовательность кодирующей цепи ДНК. Нуклеотиды расположены в строку по 60 штук и сгруппированы 10 штук в блоке.

База данных UniProt – открытый ресурс, содержащий информацию о последовательности протеинов и данные по их функциям. База данных предназначена для сбора всех общедоступных данных о последовательностях белков, содержит все последовательности белков из основных общедоступных баз данных последовательностей белков: EMBL-Bank, Ensembl, European Patent Office, FlyBase, H-Invitational Database, Protein Data Bank (PDB), Protein Research Foundation (PRF) и др. [32].

Структура выходной информации в UniProt включает в себя аннотацию, взятую из научной литературы: название белков и генов;

их функции;

субклеточное расположение;

формы вариантов белка, полученные в результате естественной генетической изменчивости, редактирования РНК, альтернативного сплайсинга, протеолити-

ческого процессинга и посттрансляционной модификации и др.

База данных TreeGenes, создана в 1990-х годах, сопровождается организациями США: кафедра экологии и эволюционной биологии университета Коннектикута, факультет садоводства университета штата Вашингтон, факультет энтомологии и патологии растений университета Теннесси, отделение генетики и биохимии, университета Клемсона [30; 31].

Она представляет собой веб-хранилище, в котором содержатся сведения о 1790 видах деревьев. Для доступа к всему функционалу базы данных требуется авторизация пользователя. Геномная информация сочетается с обширной фенотипической характеристикой и данными об окружающей среде. Tree Genes имеет возможность взаимодействовать с базами данных партнеров: Hardwood Genomics Web, Genome Data base for Rosaceae и Citrus Genome Database. Это дает преимущество в развитии мировой генетики.

Успешно разрабатываются референсные библиотеки для многих таксонов отдельных регионов мира, такие как онлайн база данных открытого доступа BOLD [26] содержащая на данный момент информацию по более чем 72 тысячам видов растений с инструментарием для получения, хранения, анализа и публикации ДНК-штрихкодов.

BOLD предназначена для поддержки генерации и применения данных штрих-кодов ДНК. Штрихкодирование ДНК – это таксономический метод, который использует один или несколько стандартизированных коротких генетических маркеров в ДНК организма для идентификации его принадлежности к определенному виду. С помощью этого метода неизвестные образцы ДНК идентифицируются как зарегистрированные виды на основе сравнения со справочной библиотекой.

Сравнение баз генетических данных представлено в табл. 1.

Учитывая изложенное, а также тот факт, что работу по созданию отечественной базы данных основных лесобразующих пород ведет только одно отраслевое учреждение, можно сказать, что концептуальный подход к формированию этой базы близок к существующему международному подходу. В будущем, при наличии ресурсов, было бы целесообразно реализовать функцию, которая позволит исследователям, специализирующимся на генетике древесных растений, вносить данные в ААС «Лесная генетика» (после предварительной проверки полученных результатов), а также постепенно расширять географическую сеть сбора образцов для генетического анализа в естественных насаждениях Российской Федерации по сетке со стороны ее квадратных ячеек 50 км, непосредственно в узловых точках или вблизи них, предусмотреть возможность внесения новых локусов, внедрить лесосеменное районирование, добавить растровый слой спутниковых карт для удобства планирования работ по сбору образцов растительного материала, в подсистеме визуализации расширить набор инструментов для отображения геопривязанной информации.

В ходе исследования сформулирован следующий ряд предложений по улучшению работы ААС «Лесная генетика»:

1. Динамическое обновление таблиц отчетных форм с вновь поставленными задачами.

2. Возможность внесения новых локусов.

3. Корректировка типов исследования, согласно измененным ФТ.

4. Редактирование списка субъектов: добавление новых субъектов Российской Федерации.

5. Добавление лесосеменного районирования: полезно (несмотря на несовершенство лесосеменного районирования 2015 г. по сравнению с 1982 г.) при расширенном использовании ААС «Лесная генетика» (при внебюджетных работах по контролю за оборотом репродуктивного материала).

6. Добавление расширенных вариантов поиска: поиск точек сбора не только исходя из данных координат, местности, но и по данным размерности локусов.

7. Структурирование внутренней организации системы: выделить в отдельную подсистему с самостоятельным набором требований «Подсистему визуализации» (ареалы пород, видов микроорганизмов по зонам распространения, зон деятельности отделов по типу слоев).

Таблица 1

Сравнение формирования банка данных ААС «Лесная генетика» ФБУ «Рослесозащита» и других баз данных

ААС «Лесная генетика»	Другие базы данных
1. Порода.	1. Организм.
2. Кем и где собран образец биоматериала (координаты места сбора образцов в соответствии с географически привязанной сетью, 100 км x 100 км, тип материала (хвоя, древесина и т.д.).	2. Лocus и его характеристика.
3. Тип анализа, кем выполнен.	3. Белок, ген или нуклеотидная последовательность.
4. Лocus (наименование, мотив, молекулярный вес ампликона, молекулярный тип, и т. д.).	4. Функции и структура, а также описание.
5. Результаты анализа.	5. Литература (первое упоминание в публикациях и публикации, связанные с данной темой).
6. Электрофоретический спектр ампликонов (фореграммы полученных результатов).	6. Дополнительная информация (есть не во всех базах данных, это может быть карта сбора материала, гербарные образцы и т. п.).
7. Нуклеотидная последовательность микроорганизмов.	7. Выходная информация
8. Род/ вид выявленного патогена в пробе и его таксономическая принадлежность.	
9. Карта сбора образцов биоматериала.	
10. Выходные данные (отчет)	

8. Документирование программного обеспечения: разработка ПО обязательно включает в себя этап документирования как его внутреннего устройства, так и пользовательских возможностей.

9. В подсистеме визуализации реализовать управление видами: предусмотреть наличие предопределенных видов карты (настроек отображения карты), в которых редактором заранее заданы значения параметров. Например, сводный обзор фитопатогенов ЦФО должен включать масштаб и фрагмент карты на ЦФО и выводить отметки всех случаев выявления патогенов. При этом одной кнопкой должен включаться необходимый фрагмент карты в нужном масштабе с отображением на нем определенной выборки данных из подсистемы хранения (сохраненный запрос).

10. В подсистеме визуализации расширить набор инструментов для отображения геопривязанной информации: реализовать возможность отображения на карте областей по данным из базы подсистемы хранения или результатам работы подсистемы обчета и обработки данных (например, ареалов распространения видов патогенов, пород) с различными способами их выделения – оконтуривание, заливка цветом, текстурой.

11. В подсистеме визуализации реализовать использование динамических маркеров на основе информации из БД: предусмотреть нанесение точек на карте не только предопределенными маркерами, но и геопривязанными текстово-графическими метками из базы подсистемы хранения.

12. Добавить возможность перехода от карты к таблицам.

13. Возможность отображения зоны, закреплённой за филиалом.

14. При заполнении места сбора, а именно (регион, лесничество, уч. лесничество и т. д.), партия и анализы необходимо предусмотреть реализацию поиска внутри справочника по первым буквам.

15. Возможность отменить действие при составлении данных на партию.

16. Создание собственной базы микроорганизмов, выявленных на территориях обследования.

17. Автоматизация адресации партии: до учебного лесничества, в идеале до выдела.

18. Автоматизация и обработка многопараметрических табличных числовых данных математической обработки по заданным параметрам и их визуализация.

Повысится точность и актуальность информации о генетическом разнообразии главных лесобразующих видов, их способности адаптироваться к изменениям окружающей среды и резерве генетической изменчивости, также станет возможной количественная оценка параметров генетической структуры популяций отдельных видов и видовых сообществ. Кроме того, это может стать основой для научно-технологического развития биотехнологий в одном из сырьевых секторов экономики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Амяга Е. Н., Исаев С. П. Определение видовой принадлежности лиственницы в Еврейской автономной области и оценка ее фитосанитарного состояния // Региональные проблемы. 2021. Т. 24, № 1. С. 3–9.

2. Подбор ядерных микросателлитных локусов для видовой идентификации лиственницы даурской (Гмелина) и лиственницы сибирской, а также сравнение их генетических профилей для решения задач лесного хозяйства / Е. Н. Амяга, С. В. Нифонтов, А. Н. Гриднев, Н. М. Макрушин // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2019. № 132. С. 72–79.

3. Беспалова В. В., Полянская О. А. Внедрение цифровых технологий на предприятиях лесного комплекса // Журнал прикладных исследований, 2021. № 2–4. С. 66–70.

4. Бутвиловский А. В., Барковский Е. В., Бутвиловский В. Э. Сравнительная характеристика вариантов NCBI blast-анализа ряда митохондриальных ферментов различных животных // Медицинский журнал. 2006. № 3(17). С. 34–36.

5. Гагарин Ю. Н., Добровольский А. А., Смирнов А. П. Состояние и перспективы охраны лесов от незаконных рубок в Российской Федерации // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2, № 4. С. 22.

6. Необходимость внедрения цифровых технологий в лесное хозяйство России как главного механизма устойчивого лесопользования / С. А. Гальченко, О. Б. Бородин, А. А. Рассказова, И. В. Чуксин // Московский экономический журнал. 2021. № 2. С. 50–61.

7. Камалов Р. М. Генетическая изменчивость популяции внутри лесосеменных районов и семеноводство *Quercus Robur L.* // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2022. № 144. С. 19–24.

8. Карасева О. А., Малкова Т. В. Информационные технологии в лесном бизнесе // Леса России и хозяйство в них, 2020. № 1(72). С. 71–77.

9. Кнауэс О. А., Прудникова А. Ю., Никеров Д. М. Эффективность использования экспертиз при расследовании преступлений, связанных с незаконными рубками лесных насаждений // Криминалистика: вчера, сегодня, завтра. 2019. № 3. С. 57–65.

10. База данных по внутривидовой изменчивости хвойных растений Сибири / С. Г. Князева, Л. И. Милютин, Е. Н. Муратова [и др.] // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24. № 2–3. С. 201–206.

11. Развитие генетико-селекционных методов повышения продуктивности лесов / О. М. Корчагин, М. А. Семенов, И. Н. Вариводина [и др.] // Лесохозяйственная информация, 2020. № 4. С. 5–22.

12. Постгеномные технологии в практическом лесном хозяйстве: разработка полногеномных маркеров для идентификации происхождения древесины и других задач / К. В. Крутовский, Ю. А. Путинцева, Н. В. Орешкова [и др.] // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 9–16.

13. Мельчакова Е. В., Малеева Н. А. Генетическое разнообразие естественных популяций сосны обыкновенной в северной части Республики Карелии // Лесохозяйственная информация. 2023. № 1. С. 85–96.

14. Состояние и задачи совершенствования учета видового разнообразия древесных и кустарниковых растений в лесном хозяйстве / М. М. Паленова, В. Н. Коротков, А. А. Нотов [и др.] // Лесохозяйственная информация. 2022. № 4. С. 58–84.

15. О государственной информационной системе в области генетической информации «Национальная

база генетической информации» : Постановление Правительства Российской Федерации от 31.01.2024 № 87. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

16. Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года : Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р. URL: <https://www.consultant.ru/>.

17. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

18. О Национальном центре генетических ресурсов растений : Указ Президента Российской Федерации от 08.02.2022 № 44. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

19. О развитии генетических технологий в Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 28.11.2018 № 680. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

20. Фиськов И. А. Состояние и динамика преступлений, связанных с незаконным использованием лесов // *Аграрное и земельное право*. 2019. № 3. С. 121–127.

21. Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий / А. П. Царев, Н. В. Лаур, В. А. Царев, Р. П. Царева // *Известие вузов. Лесной журнал*. 2022. № 6. С. 38–55.

22. Шейкина О. В., Гладков Ю. Ф. Генетическое разнообразие и дифференциация ценопопуляций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сформированных на болотных и суходольных экотипах // *Вестник Томского государственного университета*. 2020. № 50. С. 101–118.

23. Шейкина О. В. Применение молекулярных маркеров в лесном селекционном семеноводстве в России: опыт и перспективы // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 2. С. 64–79.

24. Яценко А. М. Совершенствование систем оперативного мониторинга за состоянием лесов как один из перспективных способов борьбы с нелегальными лесозаготовками // *Вопросы Российской юстиции*. 2020. № 10. С. 281–284.

25. Bairoch A., Apweiler R. The SWISS-PROT protein sequence data bank and its new supplement TREMBL. (англ.) // *Nucleic acids research*. 1996. Vol. 24, no. 1. P. 21–25. PMID 8594581.

26. BOLD. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.boldsystems.org/>, свободный. Загл. с экрана. Язык англ.

27. Bruno J. Strasser. GenBank--Natural History in the 21st Century? (англ.) // *Science*. 2008-10-24. Vol. 322, iss. 5901. P. 537–538. ISSN 1095-9203. DOI 10.1126/science.1163399.

28. MolBiol.ru. Электрон. дан. Режим доступа: <http://molbiol.ru/ol.ru/>, свободный. Загл. с экрана. Язык рус., лат.

29. NCBI. Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, свободный. Загл. с экрана. Язык англ.

30. Taylor Falk, Nic Herndon, Emily Grau, Sean Buehler, Peter Richter, Sumaira Zaman, Eliza M. Baker, Risharde Ramnath, Stephen Ficklin, Margaret taton, Frank A. Feltus, Sook Jung, Doreen Main and Jil L. We-

grzyn. Growing and cultivating the forest genomics database, TreeGenes. Database, 2018, 1–11 doi: 10.1093/database/bay084.

31. TreeGenes. Электрон. дан. Режим доступа: <https://treegenesdb.org/>, свободный. Загл. с экрана. Язык англ.

32. UniProt. Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.uniprot.org/>, свободный. Загл. с экрана. Язык англ.

REFERENCES

1. Amyaga E. N., Isaev S. P. Opredelenie vidovoj prinadlezhnosti listvennicy v Evrejskoj avtonomnoj oblasti i ocenka ee fitosanitarnogo sostoyaniya // *Regional'nye problemy*, 2021. T. 24, No. 1. S. 3–9.

2. Podbor yadernyh mikrosatellitnyh lokusov dlya vidovoj identifikacii listvennicy daurskoj (Gmelina) i listvennicy sibirskoj, a takzhe sravnenie ih geneticheskikh profilej dlya resheniya zadach lesnogo hozyajstva / E. N. Amyaga, S. V. Nifontov, A. N. Gridnev, N. M. Makrushin // *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2019. No. 132. S. 72–79.

3. Bessalova V. V., Polyanskaya O. A. Vnedrenie cifrovyyh tekhnologij na predpriyatiyah lesnogo kompleksa // *Zhurnal prikladnyh issledovanij*, 2021. No. 2-4. S. 66–70.

4. Butvilovskij A. V., Barkovskij E. V., Butvilovskij V. E. Sravnitel'naya harakteristika variantov NCBI blast-analiza ryada mitohondrial'nyh fermentov razlichnyh zhivotnyh // *Medicinskij zhurnal*. 2006. No. 3(17). S. 34–36.

5. Gagarin Yu. N., Dobrovol'skij A. A., Smirnov A. P. Sostoyanie i perspektivy ohrany lesov ot nezakonnyh rubok v Rossijskoj Federacii // *Voprosy lesnoj nauki*, 2019. T. 2, No. 4. S. 22.

6. Neobhodimost' vnedreniya cifrovyyh tekhnologij v lesnoe hozyajstvo Rossii kak glavnogo mekhanizma ustojchivogo lesoupravleniya / S. A. Gal'chenko, O. B. Borodina, A. A. Rasskazova, I. V. Chuksin // *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal*, 2021. No. 2. S. 50–61.

7. Kamalov R. M. Geneticheskaya izmenchivost' populyacii vntri lesosemennyyh rajonov i semenovodstvo Quercus Robur L. // *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2022. № 144. S. 19–24.

8. Karaseva O. A., Malkova T. V. Informacionnye tekhnologii v lesnom biznese // *Lesa Rossi i hozyajstvo v nih*, 2020. No.1(72). S. 71–77.

9. Knaus O. A., Prudnikova A. Yu., Nikerov D. M. Effektivnost' ispol'zovaniya ekspertiz pri rassledovanii prestuplenij, svyazannyh s nezakonnyimi rubkami lesnyh nasazhdenij // *Kriminalistika: vchera, segodnya, zavtra*, 2019. No. 3. S. 57–65.

10. Baza dannyh po vntrividovoj izmenchivosti hvoynyh rastenij Sibiri / S. G. Knyazeva, L. I. Milyutin, E. N. Muratova [et al.] // *Hvoynye boreal'noj zony*. 2007. T. 24. No. 2-3. S. 201–206.

11. Razvitie genetiko-selekcionnyh metodov povysheniya produktivnosti lesov / O. M. Korchagin, M. A. Semenov, I. N. Varivodina [et al.] // *Lesohozyajstvennaya informaciya*, 2020. No. 4. S. 5–22.

12. Postgenomnye tekhnologii v prakticheskom lesnom hozyajstve: razrabotka polnogenomnyh markerov dlya

идентификации происхождения древесины и других задач / K. V. Krutovskij, Yu. A. Putinceva, N. V. Oreshkova [et al.] // *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2019. No. 1. S. 9–16.

13. Mel'chakova E. V., Maleeva N. A. Geneticheskoe raznoobrazie estestvennyh populyacij sosny obyknovennyj v severnoj chasti Respubliki Karelii // *Lesohozyajstvennaya informacija*, 2023. No. 1. S. 85–96.

14. Sostoyanie i zadachi sovershenstvovaniya ucheta vidovogo raznoobraziya drevesnyh i kustarnikovyh rastenij v lesnom hozyajstve / M. M. Palenova, V. N. Korotkov, A. A. Notov [et al.] // *Lesohozyajstvennaya informacija*, 2022. No. 4. S. 58–84.

15. O gosudarstvennoj informacionnoj sisteme v oblasti geneticheskoy informacii "Nacional'naya baza geneticheskoy informacii" : Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 31.01.2024 No. 87. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

16. Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda : Rasporяazhenie Pravitel'stva RF ot 11.02.2021 No. 312-r. URL: <https://www.consultant.ru/>.

17. O Strategii nauchnotekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii : Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 01.12.2016 No. 642. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

18. O Nacional'nom centre geneticheskikh resursov rastenij : Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 08.02.2022 No. 44. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

19. O razvitii geneticheskikh tekhnologij v Rossijskoj Federacii : Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 28.11.2018 No. 680. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

20. Fis'kov I. A. Sostoyanie i dinamika prestuplenij, svyazannyh s nezakonnym ispol'zovaniem lesov // *Agrarnoe i zemel'noe pravo*, 2019. No. 3. S. 121–127.

21. Sovremennoe sostoyanie lesnoj selekcii v Rossijskoj Federacii: trend poslednih desyatiletij / A. P. Carev, N. V. Laur, V. A. Carev, R. P. Careva // *Izvestie vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2022. No. 6. S. 38–55.

22. Shejkina O. V., Gladkov Yu. F. Geneticheskoe raznoobrazie i differenciaciya cenopopulyacij sosny obyknovennyj (*Pinus sylvestris* L.) sformirovannyh na bolotnyh i suhodol'nyh ekotipah // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020. No. 50. S. 101–118.

23. Shejkina O. V. Primenenie molekulyarnyh markerov v lesnom selekcionnom semenovodstve v Rossii: opyt i perspektivy // *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2022. No. 2. S. 64–79.

24. Yacenko A. M. Sovershenstvovanie sistem operativnogo monitoringa za sostoyaniem lesov kak odin iz perspektivnyh sposobov bor'by s nelegal'nymi lesozagotovkami // *Voprosy Rossijskoj yusticii*, 2020. No. 10. S. 281–284.

25. Bairoch A., Apweiler R. The SWISS-PROT protein sequence data bank and its new supplement TREMBL. (angl.) // *Nucleic acids research*. 1996. Vol. 24, No. 1. P. 21–25. PMID 8594581.

26. BOLD. Elektron. dan. Rezhim dostupa: <http://www.boldsystems.org>, svobodnyj. Zagl. s ekrana. Yazyk angl.

27. Bruno J. Strasser. GenBank--Natural History in the 21st Century? (angl.) // *Science*. 2008-10-24. Vol. 322, iss. 5901. P. 537–538. ISSN 1095-9203. DOI 10.1126/science.1163399.

28. MolBiol.ru. Elektron. dan. Rezhim dostupa: <http://molbiol.ru/ol.ru>, svobodnyj. Zagl. s ekrana. Yazyk rus., lat.

29. NCBI. Elektron. dan. Rezhim dostupa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, svobodnyj. Zagl. s ekrana. Yazyk angl.

30. Taylor Falk, Nic Herndon, Emily Grau, Sean Buehler, Peter Richter, Sumaira Zaman, Eliza M. Baker, Risharde Ramnath, Stephen Ficklin, Margaret taton, Frank A. Feltus, Sook Jung, Doreen Main and Jil L. Wegrzyn. Growing and cultivating the forest genomics database, TreeGenes. Database, 2018, 1–11 doi: 10.1093/database/bay084.

31. TreeGenes. Elektron. dan. Rezhim dostupa: <https://treegenesdb.org/>, svobodnyj. Zagl. s ekrana. Yazyk angl.

32. UniProt. Elektron. dan. Rezhim dostupa: <https://www.uniprot.org/>, svobodnyj. Zagl. s ekrana. Yazyk angl.

© Раздымахо А. А., Слипец А. А.,
Арефьева М. А., Савченкова В. А., 2025

Поступила в редакцию 13.12.2024

Принята к печати 25.04.2025

**ШКАЛА ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ РОСТА
МОЛОДНЯКА СОСНЫ НА ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЛЯХ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ*****А. А. Вайс, С. К. Мамедова, А. А. Андропова, Н. О. Мотырев**Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Аннотация. Леса играют важную роль в глобальном углеродном цикле и стабилизации климата. Лесовосстановление заброшенных и вышедших из сельскохозяйственного использования земель – это значимый механизм смягчения последствий изменения климата. В Красноярской лесостепи, на бывших сельскохозяйственных угодьях, формируются преимущественно сосновые древостои, отличающиеся однородным составом, с редким присутствием березы, лиственницы и ели. Наблюдается четкая стадийность развития этих сосновых насаждений. Можно выделить три основные стадии: стадия формирования (возраст до 10 лет), характеризующаяся периодом восстановления и ранним развитием древесных пород; стадия умеренного роста (11–17 лет), когда происходит интенсивное наращивание биомассы; и стадия интенсивного роста (18 лет и старше), для которой характерно максимальное развитие и рост сосновых деревьев. Для исследования динамики роста сосняков в высоту использовалось уравнение Гомпертца. На основе строения сгруппированных рядов по диаметру выполнен анализ процесса формирования сосняков в постаграрных условиях. Критерием являлась оценка формы рядов, выполнена оценка процесса лесовосстановления сосняков на бывших сельскохозяйственных землях Красноярской лесостепи. Анализ формы рядов распределения по диаметру деревьев предоставляет возможность оценить динамику и характеристики восстановленных насаждений. Данный подход позволяет более точно определить этапы развития сосновых лесов на залежных землях и разработать оптимальные стратегии управления процессами лесовосстановления в регионе. Полученные результаты имеют практическое значение для мониторинга и планирования мероприятий по восстановлению лесных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях. Такой комплексный подход, основанный на сочетании аналитических методов и конкретных данных, позволяет более эффективно использовать потенциал лесных экосистем для смягчения последствий изменения климата.

Ключевые слова: залежные земли, сосна, лесовосстановление, ряд распределения, эксцесс, асимметрия, шкала оценки.

*Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 14–19***ASSESSMENT SCALE OF REFORESTATION PROCESS AND GROWTH INTENSITY
OF YOUNG PINE TREES ON FALLOW LANDS OF THE KRASNOYARSK FOREST-STEPPE******A. A. Vais, S. K. Mamedova, A. A. Andronova, N. O. Motyrev**Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Annotation. Forests play an important role in the global carbon cycle and climate stabilization. Reforestation of abandoned and non-agricultural lands is a significant mechanism for mitigating the effects of climate change. In the Krasnoyarsk forest-steppe, on former agricultural lands, predominantly pine stands are formed, characterized by a homogeneous composition, with rare presence of birch, larch and spruce. A clear stage-by-stage development of these pine stands is observed. Three main stages can be distinguished: the formation stage (age up to 10 years), characterized by a period of restoration and early development of tree species; the moderate growth stage (11–17 years), when there is an intensive increase in biomass; and the intensive growth stage (18 years and older), which is characterized by maximum development and growth of pine trees. The Gompertz equation was used to study the dynamics of pine forest growth in height. Based on the structure of grouped rows by diameter, the analysis of the process of pine forest formation in post-agricultural conditions was performed. The criterion was the assessment of the form of distribution series. As a result, the process of reforestation of pine forests on former agricultural lands of

* Исследование проводилось в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта FEFE-2024-0029 «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомофитофагами» коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

** The study was carried out by the staff of the scientific laboratory “Forest Ecosystems” within the framework of the state assignment commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of the FEFE-2024-0029 project “Dynamics of restoration of taiga forests of Central Siberia disrupted by entomological damage”.

Krasnoyarsk forest-steppe was characterised. Analysis of the forms by tree diameter makes it possible to assess the dynamics and characteristics of restored stands. This approach allows for a more accurate determination of the stages of pine forest development on fallow lands and the development of optimal strategies for managing forest restoration processes in the region. The results obtained are of practical importance for monitoring and planning measures to restore forest ecosystems on former agricultural lands. Such an integrated approach, based on a combination of analytical methods and specific data, allows for a more efficient use of the potential of forest ecosystems to mitigate the effects of climate change.

Keywords: fallow lands, pine, reforestation, distribution series, kurtosis, asymmetry, assessment scale.

ВВЕДЕНИЕ

Леса играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле и стабилизации климата, а лесовосстановление заброшенных, вышедших из сельскохозяйственного использования земель, является важным механизмом смягчения последствий изменения климата [1; 2]. В связи с этим, создание искусственных плантаций (преимущественно, хвойных) стало важным инструментом для снижения выбросов CO₂ в атмосферу [3].

В соответствии с Киотским протоколом 1992 года, агролесоводство признано в качестве одной из стратегий смягчения последствий изменения климата и адаптации к ним [4].

Процессы зарастания, лесовосстановления происходят с разной скоростью и цикличностью [5–10]. Так, Е. А. Домнина с соавторами [5] на основе анализа спутниковых снимков установили, что процесс зарастания постаграрных площадей носит неоднородный (гетерогенный) характер. Естественное возобновление на залежах малой площади происходит одновременно, а на больших территориях восстановление происходит от стены леса, со временем постепенно удаляясь от неё. Э. А. Терёхин [6–8] исследовал материалы многозональных спутниковых снимков Landsat и определил на основе анализа вегетационных индексов, что для территории Среднерусской лесостепи процесс зарастания составляет в среднем 8 лет [6; 7]. В другой статье автор констатирует, что лесистость залежей является индикатором пространственной вариации скорости её годового прироста [8]. Д. А. Данилов с соавторами [9] констатируют, что почвенное плодородие является одним из основных факторов, влияющим на процесс естественного возобновления леса. Процесс развития сосновых и еловых древостоев может проходить через множество временных стадий, связанных конкуренцией с мелколиственными древесными породами.

По мере роста и развития насаждений на постаграрных территориях всё острее становится проблема оценки продуктивности древостоев [10–14]. Как отмечает ряд исследователей учёт экономической и экологической составляющей, а также рациональный и научно-обоснованный подход позволяет существенно увеличить выход деловой древесины с единицы площади земель после сельскохозяйственного использования [10; 11]. А. В. Жигунов с соавторами [12] установили возможность успешного искусственного лесовосстановления на землях, вышедших из сельскохозяйственного пользования. Л. В. Голубева, Е. Н. Наквасина, Н. С. Минин [13] исследовали постаграрные сосновые насаждения, сформированные на залежах более 40 лет назад, и определили, что эти древостои характеризуются

интенсивным ростом и близким к нативным насаждениям качеством древесины. Ряд авторов отмечают, что биологическая продуктивность естественных 10-летних сосняков соответствует по фитомассе 20-летним плантационным культурам [14], а успешность зарастания оценивается увеличением числа растений и повышением годичного прироста в высоту [15].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе на всех участках выполнены учётные работы в виде перечёта деревьев, замера высот. Основным методом работ являлся ленточный способ [16]. Выбор данного метода учёта обоснован тем, что при таком подходе происходит охват максимальной территории, что целесообразно при выполнении работ на площадных территориях (залежные земли). Общие принципы работ описаны в ряде научных и инструктивных источниках [16–18].

Таксационная оценка насаждений выполнялась по стандартным методическим положениям, представленным в классических трудах М. М. Орлова [17], Н. П. Анучина [16] и В. С. Моисеева [18].

Необходимо отметить следующие основные особенности сосняков, формирующихся на залежных землях в условиях Красноярской лесостепи. На бывших сельскохозяйственных землях формируются преимущественно сосновые древостои, чистые по составу с единичной представленностью берёзы, лиственницы и ели.

Средний диаметр варьировал от 3,1 до 11,8 см. На двух участках молодняк не достиг высоты груди, поэтому замеры произведены у шейки корня. Высота молодняка менялась от 0,9 до 9,4 м. Условия формирования и развития способствуют густотному разнообразию древостоев: 346–15733 шт. · га⁻¹. Класс бонитета насаждений на участках представлен всем спектром продуктивности сосняков в условиях Красноярской лесостепи: I–III классы качества условий произрастания. Размеры и густота сосняков способствует достаточно высокой производительности древостоев (5–229 м³ · га⁻¹). Таким образом, можно констатировать, что опытные участки включают в себя максимальное разнообразие как условий формирования и произрастания, так и продуктивности сосновых насаждений.

Целью исследования являлась оценка периода и стадий формирования сосняков на залежных землях с помощью различных методических подходов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На следующем этапе выявлено наличие определённых соотношений в морфологических показателях

молодняков, поскольку наличие таких связей с достаточно высокой степенью позволяет констатировать устойчивость роста и морфологическую адаптивность к условиям местопроизрастания.

С учётом методологии кусочной линейной аппроксимации общую линию роста можно разделить на три возрастных стадии (рис. 1).

Изменение коэффициентов линейной регрессии подтверждает возможность выделения возрастных стадий формирования:

1 стадия – $H = 0,348 \cdot A - 1,664$;

2 стадия – $H = 0,450 \cdot A - 2,097$;

3 стадия – $H = 0,711 \cdot A - 1,664$.

На основании данных рисунка 1 и коэффициентов уравнений можно определить три стадии развития сосновых насаждений на залежных землях:

- стадия формирования (возраст до 10 лет);
- стадия умеренного роста (11–17 лет);
- стадия интенсивного роста (18 лет и старше).

Линии по отдельным участкам залежей были объединены в одну статистическую совокупность для связи $H = f(A)$ (рис. 2).

С помощью функции Гомпертца получены линии роста сосняков в высоту для древостоев различного возраста (рис. 3). Следует отметить, что данная функция в большей мере отражает рост возрастных древостоев, у которых выражена затухающая фаза.

Стадия формирования, умеренного и начало интенсивного роста (возраст до 24 лет).

$H = 20,136 \cdot \exp(-\exp(1,703 - 0,089 \cdot A))$, $R^2 = 0,84$;
 $m_x = 1,6$ м.

Все стадии роста, включая затухающий период (возраст до 76 лет).

$H = 19,137 \cdot \exp(-\exp(1,545 - 0,081 \cdot A))$, $R^2 = 0,86$;
 $m_x = 1,8$ м.

Ряды распределения по диаметру в той или иной мере, наряду с возрастной структурой, указывают на продолжительность процесса формирования насаждения (рис. 4).

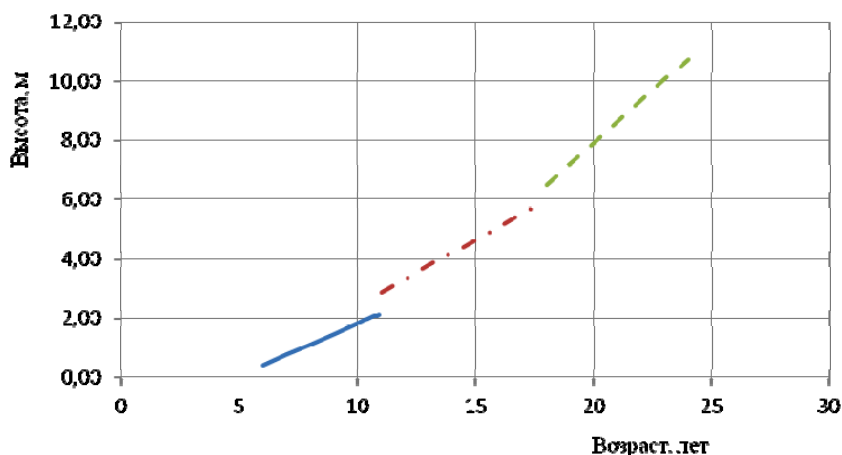


Рис. 1. Возрастные стадии роста в высоту сосновых молодняков

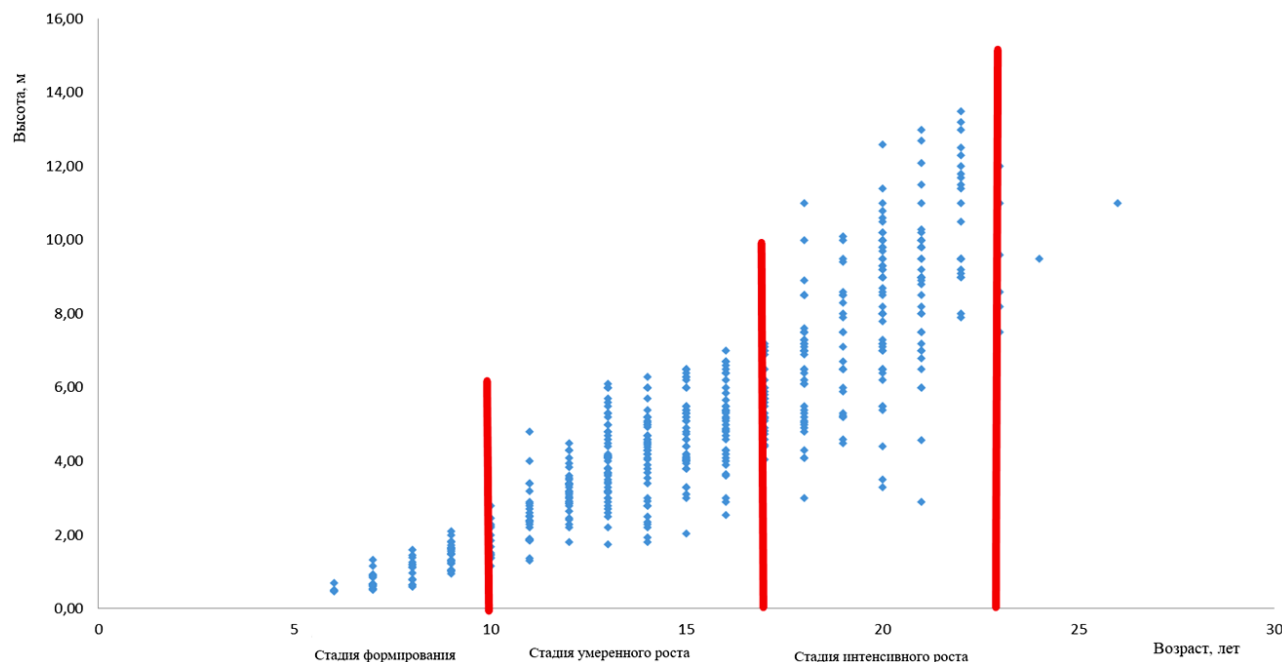


Рис. 2. Точечная диаграмма связи высот и возраста деревьев на постаграрных землях

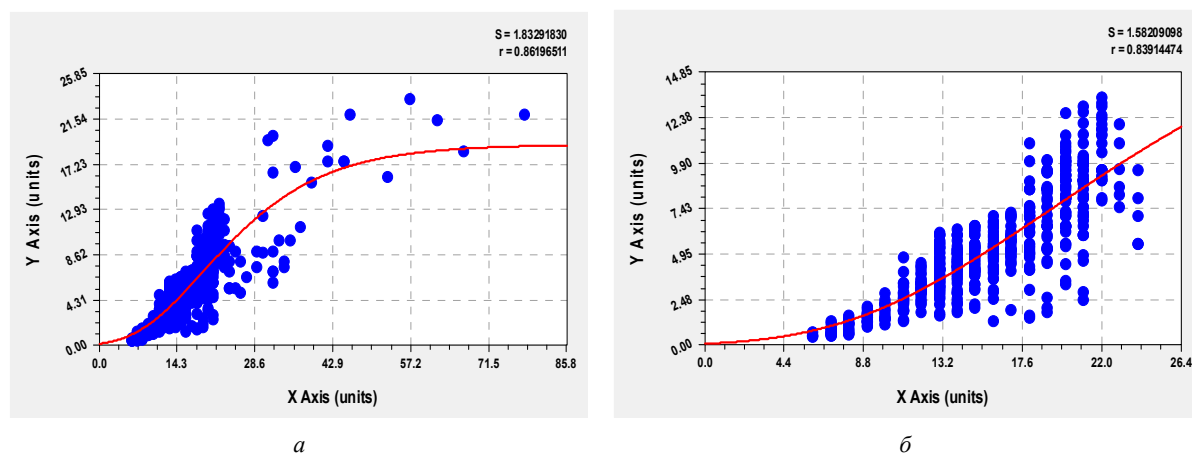


Рис. 3. Ход роста в высоту сосняков на постаграрных землях (x – возраст, лет; y – высота, м):
а – молодняки сосны возраста до 24 лет; б – сосняки возраста до 76 лет

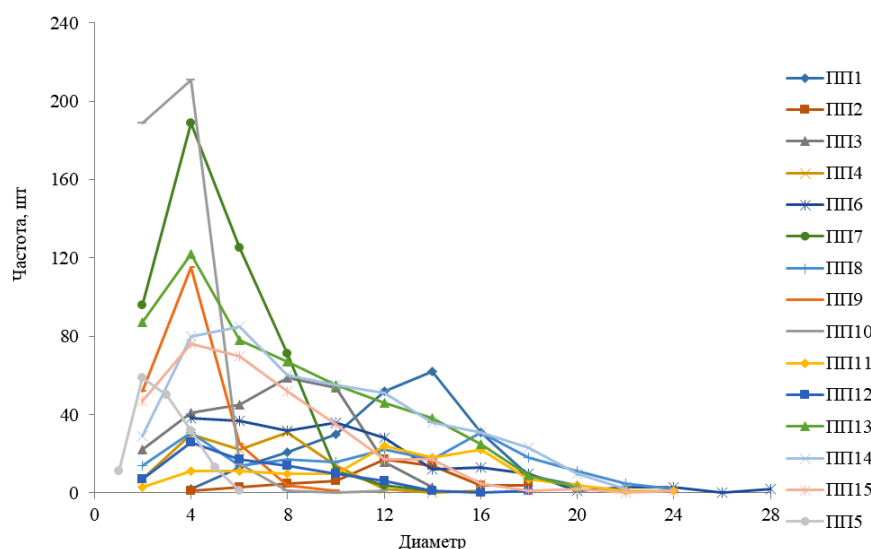


Рис. 4. Стречение по диаметру сосняков на залежных землях

На этом основании выполнен анализ строения сгруппированных рядов по диаметру для оценки процесса формирования сосняков в постаграрных условиях. Критерием являлась оценка формы рядов распределения (табл. 1) по двум основным характеристикам (асимметрии и эксцессу).

После проведения описательной статистики рядов распределения по диаметру выполнена оценка формы рядов согласно статистическим критериям [19; 20].

Данная таблица позволяет с учётом стандартной оценки формы рядов распределения по асимметрии и эксцессу определить период формирования (зарастания) постаграрных земель.

С учётом классификационной таблицы выполнена оценка формирования сосняков Красноярской лесостепи на бывших сельскохозяйственных землях с учётом анализа формы рядов распределения по диаметру (табл. 2).

Таблица 1

Анализ распределения с учётом стадии начального формирования сосняков на бывших сельскохозяйственных землях (период до 10 лет)

Показатель формы ряда распределения	Числовое значение показателя формы ряда распределения	Оценка распределения	Период формирования
Асимметрия	$A = 0$	нормальное распределение	одномоментный период формирования
	$A < 0$	левая асимметрия	растянутый период формирования с максимумом в конце периода зарастания
	$A > 0$	правая асимметрия	растянутый период формирования с максимумом в начале периода зарастания
	$\pm A < 0,5$	малое смещение	одномоментный период формирования 1–2 года
	$0,5 > \pm A < 1,0$	среднее смещение	растянутый период зарастания 3–5 лет
	$\pm A > 1,0$	большое смещение	растянутый период зарастания 6–10 лет

Окончание табл. 1

Показатель формы ряда распределения	Числовое значение показателя формы ряда распределения	Оценка распределения	Период формирования
Экссесс	$E = 0$	нормальное распределение	одномоментный период формирования
	$E > 0$	экссессивное распределение	короткий период застарения
	$E < 0$	депрессивное распределение	растянутый период застарения
	$0 < E < 0,5$	незначительная экссессивность	одномоментный период формирования
	$E > 0,5$	экссессивное распределение	одномоментный период формирования 1–2 года
	$0 > E > -0,5$	незначительная депрессивность	растянутый период формирования 3–5 лет
	$-0,5 > E > -2$	депрессивное распределение	растянутый период застарения 6–10 лет)
	$E > -2$	полимодальное распределение	формирование разновозрастного древостоя

Таблица 2

Оценка формирования сосновых древостоев на залежных землях Красноярской лесостепи

Номер участка	Асимметрия	Экссесс	Оценка формы распределения	V, %	P, %
1	–0,30	–0,26	растянутый период формирования 3–5 лет	27,9	1,9
2	–0,33	0,15	одномоментный период формирования 1–2 года	30,4	3,3
3	–0,09	–0,89	растянутый период формирования 6–10 лет	45,9	3,0
4	0,43	0,10	одномоментный период формирования 1–3 года	46,4	4,5
5	0,49	–0,66	растянутый период формирования 3–5 лет	43,3	3,4
6	1,11	1,29	растянутый период формирования 6–10 лет	56,1	3,8
7	0,80	0,64	растянутый период застарения до 5 лет	51,7	2,3
8	0,03	–1,19	растянутый период застарения 6–10 лет	56,1	4,0
9	1,29	2,04	одномоментный период формирования 1–2 года	44,2	3,1
10	1,81	10,83	одномоментный период формирования 1–2 года	46,8	2,3
11	–0,18	–0,64	растянутый период формирования 6–10 лет	43,1	3,9
12	0,88	0,54	растянутый период застарения до 5 лет	55,6	6,1
13	0,65	–0,57	растянутый период формирования до 6 лет	68,0	3,0
14	0,57	–0,56	растянутый период формирования до 6 лет	58,6	2,7
15	1,09	1,48	растянутый период застарения до 5 лет	62,8	3,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика определения периода формирования сосняков на залежных землях носит не абсолютный, а в большей мере условный характер, и для окончательной оценки нужно учитывать совокупность факторов (визуальный анализ графиков, возрастную структуру). Но для первичной классификации периода формирования сосняков по перечётным данным в камеральных условиях рекомендуется использовать анализ формы рядов распределения по диаметру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ССЫЛКИ

1. Усольцев В. А., Колчин К. В., Маленко А. А. О необходимости построения и анализа аллометрических моделей фитомассы лесных деревьев как основы корректной оценки углерододепонирующей функции лесов (аналитический обзор) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (149). С. 78–87.
2. Belay B., Pötzelsberger E., Hasenauer H. The Carbon Sequestration Potential of Degraded Agricultural Land in the Amhara Region of Ethiopia // Forests. 2018. Vol. 9, No. 8. P. 470.
3. Chen C.-I., Wang Y.-N., Lin H.-H., Wang C.-W., Yu J.-C., Chen Y.-C. Seasonal Photosynthesis and Carbon Assimilation of Dynamics in a Zelkova serrata (Thunb.) Makino Plantation // Forests. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 467.

4. Semere M., Cherinet A., Gebreyesus M. Climate resilient traditional agroforestry systems in Silite district, Southern Ethiopia // Journal Forest Science. 2022. Vol. 68. No. 4. – P. 136–144.

5. Домнина Е. А., Адамович Т. А., Тимонов А. С., Ашихмина Т. Я. Мониторинг застарения заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 82–89.

6. Терехин Э. А. Процессы лесовозобновления на залежах юго-запада Среднерусской возвышенности // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2016. № 2. С. 57–62.

7. Терехин Э. А. Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86, № 4. С. 594–604.

8. Терехин Э. А. Состояние залежных земель и особенности их спектрально-отражательных свойств на территории Среднерусской лесостепи // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 356–365.

9. Влияние плодородия почвы на естественное возобновление леса на старопахотных землях / Д. А. Данилов, Л. С. Богданова, С. С. Мандрыкин [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. № 229. С. 145–163.

10. Мониторинг трансформации старопашотных почв лесостепной зоны при лесовосстановлении / Т. В. Пономарева, Е. И. Пономарёв, А. С. Шишкин, Е. Г. Швецов // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 154–161.

11. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения / С. Е. Грибов, С. А. Корчагов, Р. С. Хамитов, И. В. Евдокимов // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24. № 6. С. 19–25.

12. Создание высокопродуктивных лесонасаждений на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного оборота / А. В. Жигунов, Д. А. Данилов, А. Н. Красновидов, О. О. Эндерс // Вестник Башкирского гос. аграр. ун-та. 2014. № 3 (31). С. 85–90.

13. Голубева Л. В., Наквасина Е. Н., Минин Н. С. Продуктивность и качество древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в постагrogenных насаждениях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 215. С. 19–29.

14. Януш С. Ю., Данилов Д. А., Красновидов А. Н., Иванов А. А. Фитомасса 10-летних насаждений сосны на залежных землях Ленинградской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 53. С. 55–57.

15. Динамика роста подроста сосны обыкновенной на неосваиваемых землях / Ю. А. Янбаев, В. В. Тагиров, С. Ю. Бахтина, А. А. Тагирова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 4(72). С. 150–151.

16. Анучин Н. П. Лесная таксация : учебник для вузов. М. : Лесн. пром-ть, 1982. 550 с.

17. Орлов М. М. Лесная таксация. Л., 1929. 532 с.

18. Моисеев В. С. Таксация леса : учебное пособие. Л., 1970. 255 с.

19. Багинский В. Ф., Лапичкая О. В. Биометрия в лесном хозяйстве. Гомель : ГГУ, 2010. 374 с.

20. Бондаренко А. С., Жигунов А. В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований : учеб. пособие. СПб., 2016. 125 с.

REFERENCES

1. Usol'cev V. A., Kolchin K. V., Malenko A. A. O neobходимosti postroeniya i analiza allometricheskikh modelej fitomassy lesnyh derev'ev kak osnovy korrektnoj ocenki uglerododeponiruyushchej funkcii lesov (analiticheskij obzor) // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 3(149). S. 78–87.

2. Belay B., Pötzelsberger E., Hasenauer H. The Carbon Sequestration Potential of Degraded Agricultural Land in the Amhara Region of Ethiopia // Forests. 2018. Vol. 9, No. 8. P. 470.

3. Chen C.-I., Wang Y.-N., Lin H.-H., Wang C.-W., Yu J.-C., Chen Y.-C. Seasonal Photosynthesis and Carbon Assimilation of Dynamics in a Zelkova serrata (Thunb.) Makino Plantation // Forests. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 467.

4. Semere M., Cherinet A., Gebreyesus M. Climate resilient traditional agroforestry systems in Silite district, Southern Ethiopia // Journal Forest Science. 2022. Vol. 68, No. 4. P. 136–144.

5. Monitoring zarastaniya zabroshennyh zemel' sel'sko-hozyajstvennogo naznacheniya po sputnikovym snimkam

vysokogo razresheniya / E. A. Domnina, T. A. Adamovich, A. S. Timonov, T. Ya. Ashihmina // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2022. № 3. S. 82–89.

6. Terekhin E. A. Processy lesovozobnovleniya na zalezhh yugo-zapada Srednerusskoj vozvysheynosti // Lesnye ekosistemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring. 2016. № 2. S. 57–62.

7. Terekhin E. A. Osobennosti lesovozobnovleniya na zalezhhnyh zemlyah Srednerusskoj lesostepi // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2022. T. 86, № 4. S. 594–604.

8. Terekhin E. A. Sostoyanie zalezhhnyh zemel' i osobennosti ih spektral'no-otrazhatel'nyh svoystv na territorii Srednerusskoj lesostepi // Regional'nye geosistemy. 2022. T. 46, № 3. S. 356–365.

9. Vliyanie plodorodiya pochvy na estestvennoe vozobnovlenie lesa na staropashotnyh zemlyah / D. A. Danilov, L. S. Bogdanova, S. S. Mandrykin [et al.] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2019. № 229. S. 145–163.

10. Monitoring transformacii staropashotnyh pochv lesostepnoj zony pri lesovosstanovlenii / T. V. Ponomareva, E. I. Ponomaryov, A. S. Shishikin, E. G. Shvecov // Geografiya i prirodnye resursy. 2018. № 2. S. 154–161.

11. Proizvoditel'nost' drevostoev, sformirovavshihsya na zemlyah sel'skohozyajstvennogo naznacheniya / S. E. Gribov, S. A. Korchagov, R. S. Hamitov, I. V. Evdokimov // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2020. T. 24, № 6. S. 19–25.

12. Sozdanie vysokoproduktivnyh lesonasazhdenij na zemlyah, vyshedshih iz aktivnogo sel'skohozyajstvennogo oborota / A. V. Zhigunov, D. A. Danilov, A. N. Krasnovidov, O. O. Enders // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. № 3(31). S. 85–90.

13. Golubeva L. V., Nakvasina E. N., Minin N. S. Produktivnost' i kachestvo drevesiny sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) v postagrogennyh nasazhdeniyah // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2016. № 215. S. 19–29.

14. Fitolmassa 10-letnih nasazhdenij sosny na zalezhhnyh zemlyah Leningradskoj oblasti / S. Yu. Yanush, D. A. Danilov, A. N. Krasnovidov, A. A. Ivanov // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2018. № 53. S. 55–57.

15. Dinamika rosta podrosta sosny obyknovnoy na neosvaivaemyh zemlyah / Yu. A. Yanbaev, V. V. Tagirov, S. Yu. Bahtina, A. A. Tagirova // Izvestiya Orenburgskogo gos. agrar. un-ta. 2018. № 4 (72). S. 150–151.

16. Anuchin N. P. Lesnaya taksaciya : uchebnik dlya vuzov. M. : Lесn. prom-t', 1982. 550 s.

17. Orlov M. M. Lesnaya taksaciya. L., 1929. 532 s.

18. Moiseev V. S. Taksaciya lesa : uchebnoe posobie. L., 1970. 255 s.

19. Baginskij V. F., Lapickaya O. V. Biometriya v lesnom hozyajstve. Gомel' : GGU, 2010. 374 s.

20. Bondarenko A. S., Zhigunov A. V. Statisticheskaya obrabotka materialov lesovodstvennyh issledovanij : uchebnoe posobie. SPb., 2016. 125 s.

© Байс А. А., Мамедова С. К., Андропова А. А., Мотырев Н. О., 2025

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЛИНЕЙНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ
ЦИФРОВОЙ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЗАДАЧ ТАКСАЦИОННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ
(СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПРОБЛЕМАТИКА, МОДЕЛИ)**

Е. В. Сомов¹, С. Л. Шевелев²

¹Тихоокеанский государственный университет

Российская Федерация, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

E-mail: ¹000342@togudv.ru, ²shevelev@sibsau.ru

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы расчетного оценивания линейного разрешения на местности, как показателя точности таксационно-дешифровочных измерений на цифровых аэрофотоснимках, полученных посредством БПЛА. Работа основана на анализе более 100 научных публикаций по теории и методологии регистрации цифровых изображений, оценки их качества и метрических свойств, общей и лесной аэрофотосъемки, лесотаксационных измерений и лесного дешифрирования, оптимизации выбора БПЛА в применении к задачам таксации леса и городского озеленения. В качестве результатов работы предложены видоизмененный вариант математической модели и расчетного алгоритма, позволяющие на основе определения линейного разрешения на местности цифровой аэрофотосъемочной системы: оценить расчетные пределы точности дешифровочной таксации для современного уровня развития БПЛА; оценить требуемую точность наземных таксационных измерений при разработке дешифровочных моделей для БПЛА-таксации; осуществить адекватный выбор БПЛА в штатной комплектации для производства таксационной аэрофотосъемки; осуществить самостоятельный подбор съемочной аппаратуры БПЛА для решения задач дешифровочной таксации леса и инвентаризации озеленения городов.

Ключевые слова: дешифровочная таксация, беспилотная аэрофотосъемка, точность таксационных измерений, линейное разрешение на местности, размер пикселя на местности, разрешающая способность, функция передачи модуляции, выбор беспилотного летательного аппарата.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 20–26

**CALCULATED ESTIMATION OF THE LINEAR RESOLUTION ON THE GROUND
OF A DIGITAL UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPHY SYSTEM
FOR TAXATION DECRYPTION TASKS (ISSUE STATUS, PROBLEMATICS, MODELS)**

E. V. Somov¹, S. L. Shevelyov²

¹Pacific National University

136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: ¹000342@togudv.ru, ²shevelev@sibsau.ru

Annotation. The article discusses the problems of calculating the linear resolution on the ground, as an indicator of the accuracy of the taxation and decryption measurements on digital aerial photographs obtained by means of UAV. The work is based on the analysis of more than 100 scientific publications on the theory and methodology of digital image registration, assessment of their quality and metric properties, general and forest aerial photography, forest taxa measurements and forest decoding, optimization of the choice of UAVs in application to the tasks of forest taxation and urban landscaping. As the results of the work, a modified version of the mathematical model and calculation algorithm are proposed, which, based on the determination of the linear resolution on the ground of a digital aerial photography system allows: to assess the estimated accuracy limits of decryption taxation for the current level of UAV development; to evaluate the required accuracy of ground-based taxation measurements when developing decryption models for UAV taxation; to make an adequate choice of UAVs in standard configuration for production of taxicab aerial photography; to carry out an independent selection of UAV filming equipment for solving the tasks of decoding forest taxation and inventory of urban landscaping.

Keywords: decryption taxation, unmanned aerial photography, accuracy of taxation measurements, linear resolution on the ground, pixel size on the ground, resolution, modulation transmission function, choice of unmanned aerial vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

Применение данных аэрофотосъемки, полученных посредством беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для таксационной оценки лесных насаждений практикуется в мире достаточно широко с начала 2000 гг. [8]. В европейских странах данные БПЛА считаются важным компонентом программы расширенной инвентаризации лесов (Enhanced Forest Inventory – EFI) [5]. В России также проводятся исследования по применению БПЛА для лесотаксационного дешифрирования, в том числе лесных культур [1], подроста [19], ведутся работы по созданию аллометрических моделей для оценки биомассы лесов с использованием дронов [18]. Следует констатировать, что разработки по таксации леса на основе БПЛА и создание для этих целей таксационно-дешифровочных нормативов, несмотря на их значимость, в нашей стране находятся на начальном этапе. Не менее важными являются вопросы инвентаризации озеленения городов на основе материалов БПЛА-съемок.

В качестве одного из критериев, позволяющего составить определенное суждение о пространственном разрешении цифрового изображения, сначала за рубежом, а затем и в отечественной практике, стал использоваться размер пикселя на местности – GSD (Ground Sampling Distance), представляющий собой проекцию пикселя цифровой матрицы фотокамеры на земную поверхность [12; 21]. Специалистами утверждается, что при выполнении определенных требований к съемочной аппаратуре и процессу съемки, а также при строгой фотограмметрической обработке точность полученных в результате БПЛА-съемки ортофотопланов может приближаться к единице GSD [17]. К сожалению, данный показатель часто предлагается использовать как меру точности измерений на цифровых изображениях, и соответственно на 3D-моделях, построенных на их основе, предполагая GSD в качестве «цены деления» БПЛА-снимков. Большинство производителей, а за ними и продавцов БПЛА, в рекламных целях используют GSD, как основной параметр разрешения изображений, получаемых их беспилотниками, по причине чего пользователь нередко вводит в заблуждение относительно реальных измерительных возможностей съемочных систем на основе БПЛА [4; 11; 16].

В аэрофотосъемке основным критерием точности измерений по аэрофотоснимкам является линейное разрешение на местности (ЛРМ), то есть минимальный размер объекта на поверхности Земли, который может быть дешифрирован на изображении как отдельный от других объектов [7; 10]. Также и в лесной аэрофотосъемке ЛРМ принято за величину информативности снимка, необходимую для дешифрирования лесных объектов [13]. GSD в свою очередь является всего лишь мерой той составляющей разрешения изображения, которая обусловлена структурой цифровой матрицы фотокамеры [21]. Особенностью матричного сенсора является то, что он осуществляет дискретизацию (пространственную выборку) изображения объекта, и поэтому качество формируемого им цифрового снимка определяется закономерностями восста-

новления непрерывного сигнала из его дискретных отчетов. Фундаментальное значение в теории дискретизации имеет теорема Котельникова (Найквиста), следствие которой состоит в том, что матричный сенсор передает без искажений пространственные частоты, не превышающие половины максимальной частоты, определяемой периодом расположения пикселей [4; 12; 14; 16]. Исходя из этого, оценка пространственного разрешения цифрового снимка по GSD оказывается завышенной в два раза относительно предельно возможного по теореме Котельникова [4; 12; 16]. Определение границы объекта на цифровом снимке (например, границы кроны дерева) с точностью в один GSD является событием, вероятность которого оценивается только лишь в 11 % [11], а устойчивые значения точности реальных измерений получаются значительно хуже [4] и определяются разрешающей способностью используемой цифровой аэрофотосъемочной системы (ЦАФС) с учетом всех потерь модуляции сигнала на пути атмосфера – объектив – сенсор, включая потери за сдвиг изображения в процессе движения БПЛА.

В первом приближении оценить величину ЛРМ цифровых изображений можно посредством расчетов, например, на основе определения функции передачи модуляции ЦАФС, учитывающих по крайней мере основную долю модуляционных потерь. Реальное значение ЛРМ можно адекватно оценить посредством анализа изображений, содержащих специальные тестовые объекты (миры) или путём анализа на изображениях перепадов яркости резких границ объектов [4]. Таким образом, каждая модель БПЛА, являющаяся носителем определенной ЦАФС, будет иметь при заданных параметрах съемки свое значение ЛРМ (свою точность измерений). Соответственно, создаваемые таксационно-дешифровочные модели и нормативы для дешифрирования насаждений по материалам БПЛА-съемки должны разрабатываться с опорой не на GSD, а на величину ЛРМ, которую способна обеспечить ЦАФС.

В связи с вышесказанным, в данной работе была поставлена цель провести обзор теоретических основ и методологических подходов для оценки ЛРМ для ЦАФС, и на этой базе определить варианты математических моделей и алгоритмов расчета для оценки данного параметра при известных технических характеристиках ЦАФС и заданных параметрах полета носителя в условиях БПЛА-съемки крон деревьев в оптическом диапазоне. В дальнейшем это позволит решить вопрос методики выбора оптимальной модели БПЛА или даже укрупненного модульного проектирования БПЛА для задач таксации, а также позволит осуществлять разработку таксационно-дешифровочных нормативов, имеющих заданную точность, согласованную с потенциалом измерительной точности современных цифровых БПЛА-систем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Взгляд на БПЛА, как на средство таксации, требует к нему отношения, как к инструменту для измерений, и, учитывая сложность и специфику данного инструмента, требует междисциплинарного подхода.

В исследовании рассматриваются проблемы расчетной оценки ЛРМ, как показателя точности таксационно-дешифровочных измерений на аэрофотоснимках при использовании ЦАФС, размещенных на беспилотных платформах. Работа основана на анализе научных публикаций по теории и методологии регистрации цифровых изображений, оценки их качества и метрических свойств, общей и лесной аэрофотосъемки, лесотаксационных измерений и лесного дешифрирования, оптимизации выбора БПЛА для решения прикладных и исследовательских задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ЛРМ определяется известной формулой [7; 10]:

$$L = \frac{H}{2Rf},$$

где H – высота съемки; R – разрешающая способность ЦАФС; f – фокусное расстояние объектива фотокамеры.

Ключевым параметром здесь является разрешающая способность ЦАФС, под которой понимается способность системы раздельно отображать две близко расположенные точки или линии, и которую можно выразить количеством отдельно отображаемых линий на 1 мм изображения, полученного посредством ЦАФС [6; 7]. Существуют различные способы определения разрешающей способности, одним из которых является способ расчета функции передачи модуляции по данным о конструктивных параметрах ЦАФС и который удобно использовать в задачах оптимизации выбора состава ЦАФС.

Функцией передачи модуляции (ФПМ), являющейся частотно-контрастной характеристикой для ЦАФС, называется функция, отражающая потерю модуляции в системе или снижение контраста изображения по отношению к контрасту объекта в зависимости от пространственной частоты, выражаемая соотношением [6; 7]:

$$T(N) = \frac{K'(N)}{K_N},$$

где K' – контраст изображения; K_N – контраст объекта; N – пространственная частота.

Под пространственной частотой N понимается детальность изображения, формируемого ЦАФС, определяемая количеством штрихов тест-объекта (стандартной миры) на 1 мм изображения при условии, что все штрихи видны раздельно (разрешаются) [7, 15].

Минимальный контраст объекта, который еще может быть зарегистрирован сенсором при данных условиях съемки, называется пороговым контрастом, а соответствующая ему частота – граничной частотой, определяющей предел разрешения системы [6; 7]. Пороговый контраст сенсора зависит от пространственной частоты, и эта зависимость есть функция порогового контраста (ФПК), рассчитываемая по формуле Сэндвика [2; 15; 16]:

$$K_n(N) = \frac{N}{2R_m - N},$$

где R_m – разрешающая способность сенсора фотокамеры, определяемая при контрасте изображения, равном 1. Здесь R_m для цифровых сенсоров определяется из выражения [12; 16]:

$$R_m = \frac{1}{2p},$$

где p – размер пиксела цифрового сенсора (матрицы).

Исходя из определений разрешающей способности и порогового контраста, разрешающая способность ЦАФС может быть определена, как пространственная частота, при которой контраст изображения равен пороговому контрасту объекта, и тогда:

$$K'(N) = K_N \cdot T(N) = K_n(N) = \frac{N}{2R_m - N}.$$

Если функции $K'(N)$ и $K_n(N)$ определены, то разрешающая способность ЦАФС может быть найдена графически, как абсцисса точки пересечения кривых $K'(N)$ и $K_n(N)$ [12; 15; 16].

Контраст объекта съемки при условии, что детали объекта находятся в условиях одинакового освещения, определяется по формуле [6; 15]:

$$K_N = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{r_{\max} + r_{\min}},$$

где $r_{\max}$ и $r_{\min}$ – коэффициенты спектральной яркости самой светлой и самой темной деталей объекта фотографирования (могут использоваться r объекта и r фона).

Таким образом, задача определения разрешающей способности ЦАФС сводится к расчету результирующей ФПМ ЦАФС, которая представляет собой ряд коэффициентов, определяющих снижение интенсивности контраста изображения по отношению к контрасту объекта от влияния отдельных звеньев системы для каждого заданного значения пространственной частоты [6; 9; 15]:

$$T(N) = T(N)_a T(N)_o T(N)_m T(N)_s,$$

где $T(N)_a$ – ФПМ атмосферы; $T(N)_o$ – ФПМ аэрофотосъемочного объектива; $T(N)_m$ – ФПМ цифрового сенсора; $T(N)_s$ – ФПМ сдвига изображения.

ФПМ вышеуказанных звеньев системы можно определить следующим образом:

А) для атмосферы [9]:

$$T(N)_a = T(N)_h T(N)_v,$$

где $T(N)_h$ – ФПМ атмосферной дымки; $T(N)_v$ – ФПМ за турбулентность атмосферы.

ФПМ атмосферной дымки в случае, когда геометрическая толщина рассеивающего слоя атмосферы принимается равной высоте фотографирования, может быть рассчитана по формуле [15]:

$$T(N)_a = e^{-\mu d} \left(\sqrt{1 + \frac{N^2 d^2}{\alpha^2}} + \frac{Nd}{\alpha} \right)^{\frac{\alpha \mu}{N}}, \quad (1)$$

где μ – показатель рассеяния для атмосферного воздуха; d – геометрическая толщина рассеивающего слоя; α – параметр индикатрисы рассеяния.

За ФПМ турбулентной атмосферы можно принять [20]:

$$T(N)_v = \exp(-2\pi^2 \gamma^2 f^2 N^2), \quad (2)$$

где γ – оценка углового размера минимально разрешаемого объекта на местности, определяемая в зависимости от высоты съемки [20].

Для определения влияния рассеивающих свойств атмосферы на снижение контраста изображения вместо определения ФПМ можно ограничиваться вычислением коэффициента снижения контраста объекта, наблюдаемого сквозь слой атмосферы, предполагая его независимость от пространственной частоты [2, 15].

Б) для аэрофотосъемочного объектива [2; 15]:

$$T(N)_o = \left(1 - \frac{4}{\pi} n_0 \lambda N\right) \cdot \exp\left(-\frac{0,0035 f \cdot \text{tg}^2 \beta \cdot N}{n_0^2}\right), \quad (3)$$

где n_0 – знаменатель относительного отверстия диафрагмы; λ – опорная длина волны; β – половина угла поля изображения. Здесь β определяется по формуле [6]:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2f}\right),$$

где a и b – размеры сторон фотоснимка, вписываемого в поле изображения (для цифровых фотокамер – линейные размеры цифрового сенсора).

ФПМ оптических систем могут быть вычислены по их конструктивным параметрам с ошибкой отклонения от экспериментальных значений $\pm 0,04$ – $0,07$ [6; 7]. Для некоторых моделей объективов в открытых источниках бывают доступны графики ФПМ от компании-производителя.

В) для цифрового сенсора:

ФПМ цифрового сенсора определяется следующими составляющими [14]:

$$T(N)_m = T(N)_g T(N)_t T(N)_d, \quad (4)$$

где $T(N)_g$ – ФПМ геометрии, учитывающая потери от влияния размеров и шага размещения пикселей на поверхности матрицы; $T(N)_t$ – ФПМ переноса, учитывающая потери от неэффективности переноса зарядов; $T(N)_d$ – ФПМ диффузии, учитывающая потери от диффузионного растекания зарядов.

Расчетные формулы составляющих ФПМ цифрового сенсора здесь не приводятся ввиду их специфики, относящейся к области электроники. Они описаны во многих специализированных работах [9; 14 и др.], и расчеты на их основе при наличии данных о параметрах структуры цифрового сенсора сложности не представляют.

Г) для сдвига изображения:

В зависимости от источника возникновения различают линейный и угловой сдвиг [6]. Тогда ФПМ сдвига:

$$T(N)_s = T(N)_w T(N)_\varphi,$$

где $T(N)_w$ – ФПМ линейного сдвига; $T(N)_\varphi$ – ФПМ углового сдвига.

Линейный сдвиг в свою очередь представлен регулярной составляющей, обусловленной поступательным движением носителя, и случайной составляющей, возникающей по причине линейного смещения носителя перпендикулярно направлению движения и вдоль вертикальной оси [6]. Кроме того, могут быть случайные ускорения БПЛА от попутного или встречного ветра. Наибольшее влияние на передачу контраста оказывает линейный регулярный сдвиг, ФПМ которого можно определить из выражения [6]:

$$T(N)_w = \frac{\sin(\pi \delta N)}{\pi \delta N} \cdot \frac{\sin\left(\pi \delta \frac{1-\eta}{\eta} N\right)}{\pi \delta \frac{1-\eta}{\eta} N}, \quad (5)$$

где δ – фотографический сдвиг изображения; η – оптический КПД затвора фотокамеры.

При фотографировании объектов, имеющих большую яркость, фотографический сдвиг мало отличается от геометрического сдвига [6], следовательно, для древесного полога в период яркой осенней окраски можно принять $\delta \approx \delta_w$; здесь δ_w – геометрический сдвиг изображения [6; 7]:

$$\delta_w = \frac{wt}{m} = wt \frac{f}{H}, \quad (6)$$

где w – линейная скорость БПЛА; t – время экспонирования (выдержка); m – знаменатель масштаба фотографирования.

Для объектов летнего ландшафта пользуются формулой [6]: $\delta \approx (0,6-0,7)\delta_w$.

Линейный регулярный сдвиг может значительно снижать разрешающую способность системы и ухудшать ее ФПМ [6].

Угловой сдвиг возникает из-за неустойчивости движения носителя в атмосфере под воздействием турбулентных потоков. В условиях БПЛА-съемки в отличие от аэрофотосъемки с использованием пилотируемых самолетов угловой сдвиг может достигать значительных величин, а для небольших БПЛА может и превышать значения линейного сдвига. Данная составляющая имеет стохастический характер и поэтому, как и случайная составляющая линейного сдвига, может быть описана, как случайный сдвиг, формула ФПМ которого имеет вид [20]:

$$T(N)_\varphi = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 N^2), \quad (7)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение случайного сдвига в плоскости изображения [20].

Величины случайных линейных сдвигов изображения вдоль продольной (по ходу движения носителя) и поперечной осей можно также описать формулой (6) при замене линейной скорости движения БПЛА на оценку скорости случайных смещений. Величины угловых сдвигов изображения вокруг про-

дольной, поперечной и вертикальной осей определяются соответственно по формулам [6]:

$$\varphi_x = \frac{f \cdot \omega_x}{\cos^2 \beta} t; \quad \varphi_y = \frac{f \cdot \omega_y}{\cos^2 \beta} t; \quad \varphi_z = q \omega_z t,$$

где ω_x , ω_y , ω_z – угловые скорости колебаний аэрофотокамеры соответственно вокруг продольной, поперечной и вертикальной осей; q – расстояние от центра снимка до точки на изображении, для которой определяется сдвиг.

Смоделировав вероятностные распределения возможных значений равнодействующих случайных составляющих линейного и углового сдвигов в ходе полета БПЛА в заданных атмосферных условиях, можно получить оценку их σ .

Следует сказать, что существуют и более сложные подходы, учитывающие дополнительные составляющие ФПМ для решения специальных задач [3; 9 и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор и анализ литературных источников по теме работы (всего более 100, ключевые из которых приведены в библиографическом списке) позволяют сделать следующие выводы:

- исследования по адаптации технологии БПЛА для создания лесотаксационно-дешифровочных нормативов в нашей стране находятся на начальном этапе; подобные работы для задач инвентаризации городских насаждений практически отсутствуют;

- имеет место значительное распространение ошибочного мнения о возможности использования GSD для оценки точности таксационных измерений на цифровых аэрофотоснимках, что приводит к завышенным оценкам (более чем в два раза) с варьированием величины ошибок в зависимости от модели БПЛА и характеристик ЦАФС;

- имеющаяся теория и математические описания позволяют производить расчетную оценку ЛРМ, как критерия точности измерений на аэрофотоснимках, на основе моделирования ФПМ, однако различные подходы, уровень и временной период исследований создают в одних случаях чрезмерное упрощение предлагаемых моделей, неполное их соответствие условиям функционирования БПЛА в отличие от пилотируемых самолетов, отсутствие учета особенностей работы цифровой фототехники, а в других – их усложнение для специальных целей, что бывает малоприспособно для других прикладных задач.

В данной работе предложен видоизмененный вариант математической модели и расчетного алгоритма, учитывающий наиболее важные факторы, влияющие на ФПМ (формулы (1)–(5), (7)), и позволяющие, используя технические характеристики цифровой фотокамеры, фотообъектива, параметры полета БПЛА, спектральные характеристики атмосферы и снимаемых объектов, произвести предварительную оценку разрешающего и измерительного потенциала ЦАФС, на основе которой возможно:

- определить расчетные пределы точности дешифровочной таксации для современного уровня раз-

вития беспилотных ЦАФС (отечественных и зарубежных);

- определить требуемую точность наземных таксационных измерений при разработке дешифровочных моделей для БПЛА-таксации;

- осуществить адекватный выбор ЦАФС для производства таксационной аэрофотосъемки в штатной комплектации БПЛА, предлагаемой компаниями-производителями;

- осуществить самостоятельный подбор состава модулей ЦАФС (носитель + фотокамера + объектив) для решения задач дешифровочной таксации леса и инвентаризации озеленения городов (некоторые компании предлагают пользовательский выбор камер и объективов для своих платформ или модернизацию ЦАФС под требования заказчика).

Предложенный алгоритм может быть адаптирован для технологий аэрофотосъемки с использованием БПЛА самолетного, мультикоптерного и гибридного типов. Описанный подход имеет особенное значение для решения задач, связанных с детальным анализом цифровых аэрофотоизображений на пиксельном и субпиксельном уровнях [4]. На основе предложенных моделей и алгоритма разработана программа UAS-FP, позволяющая оптимизировать процесс расчета и делающая его доступным для реализации в производственных структурах лесного хозяйства и городского зеленого строительства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области / А. С. Алексеев, Ю. И. Данилов, А. А. Никифоров [и др.] // Труды Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесн. хоз-ва. 2020. № 2. С. 46–58.

2. Определение предельных условий аэрофотосъемки в целях выявления на снимках элементов ландшафта с известными размерами и отражательными свойствами / И. В. Алмазов, В. Н. Овечкин, А. Ф. Стеценко [и др.] // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1990. № 3. С. 63–71.

3. Веселов Ю. Г., Глушко В. А., Молчанов А. С. Математическая модель аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда // Наука и образование : науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. № 10. С. 219–232.

4. Замшин В. В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 1. С. 43–51.

5. Князева С. В., Никитина А. Д., Гаврилюк Е. А., Тихонова Е. В., Королева Н. В. Оценка биометрических параметров сосновых древостоев по спутниковым данным WorldView-3 и материалам беспилотной аэрофотосъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 6. С. 93–107.

6. Кучко А. С. Аэрофотография. М. : Недра, 1974. 272 с.

7. Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. М. : Недра, 1981. 296 с.

8. Медведев А. А., Тельнова Н. О., Кудиков А. В., Алексеенко Н. А. Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. № 1. С. 150–163.

9. Молчанов А. С. Оценка качества аэрофотосистем методом математического моделирования с использованием критерия Шадэ // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 1. С. 28–33.

10. Молчанов А. С. Методика оценки линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем военного назначения при проведении летных испытаний // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. № 4. С. 390–396.

11. Молчанов А. С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова–Найквиста–Шеннона // Инженерные решения. 2019. № 2. С. 8–14.

12. Молчанов А. С. Методика расчета пороговой модуляционной характеристики цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 9. С. 328–336.

13. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко [и др.]. М. : Колос, 1992. 495 с.

14. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М. : Радио и связь, 1991. 264 с.

15. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. М. : Картогеоцентр – Геодезиздат, 1997. 378 с.

16. Свиридов К. Н., Тюлин А. Е. Разрешающая способность и линейное разрешение для оценки качества и проектирования аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. № 1. С. 9–29.

17. Сечин А. Ю., Дракин М. А., Киселева А. С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Ч. 2. URL: https://racurs.ru/upload/iblock/3b4/UAV_2.pdf.

18. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореальной зоны. 2023. № 4. С. 300–305.

19. Филатов А. А., Алексеев А. С., Никифоров А. А. Анализ численности и пространственного расположения подростов на вырубке на основе аэрофотосъемки // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Т. 2. СПб. : СПбГЛТУ, 2021. С. 200–203.

20. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М. : Мир, 1978. 670 с.

21. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House,

2001. URL: https://books.google.ru/books?id=f3zUKZZ_WjMC&dq=%22ground+sample+distance%22&pg=PA30&redir_esc=y#v=twopage&q&f=true.

REFERENCES

1. Opyt primeneniya bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya inventarizacii i ocenki opytnyh lesnyh kul'tur Lisinskoj chasti uchebno-opytного lesnichestva Leningradskoj oblasti / A. S. Alekseev, Yu. I. Danilov, A. A. Nikiforov [et al.] // Trudy Sankt-Peterburg. nauch.-issledovat. in-ta lesn. hoz-va. 2020. № 2. S. 46–58.

2. Opređenje predel'nyh uslovij aerofotos'emki v celyah vyavleniya na snimkah elementov landshafta s izvestnymi razmerami i otrazhatel'nyimi svojstvami / I. V. Almazov, V. N. Ovechkin, A. F. Stecenko [et al.] // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 1990. № 3. S. 63–71.

3. Veselov Yu. G., Glushko V. A., Molchanov A. S. Matematicheskaya model' aerofotosistemy, postroennoj na osnove fotochuvstvitel'nyh priborov s perenosom zaryada // Nauka i obrazovanie : nauch. izd. MGTU im. N. E. Bauman. 2013. № 10. S. 219–232.

4. Zamshin V. V. Metody opredeleniya linejnoj razreshayushchej sposobnosti opticheskikh i radiolokacionnyh aerokosmicheskikh izobrazhenij // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 2014. № 1. S. 43–51.

5. Ocenka biometricheskikh parametrov osnovnyh drevostoev po sputnikovym dannym WorldView-3 i materialam bespilotnoj aeros'yomki / S. V. Knyazeva, A. D. Nikitina, E. A. Gavriluk [et al.] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. № 6. S. 93–107.

6. Kuchko A. S. Aerofotografiya. M. : Nedra, 1974. 272 s.

7. Lavrova N. P., Stecenko A. F. Aerofotos'emka. Aerofotos'emochnoe oborudovanie. M. : Nedra, 1981. 296 s.

8. Analiz i kartografirovaniye strukturnykh parametrov redkostojnykh severotayozhnykh lesov na osnove fotogrammetricheskikh oblakov toček / A. A. Medvedev, N. O. Tel'nova, A. V. Kudikov, N. A. Alekseenko // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. № 1. S. 150–163.

9. Molchanov A. S. Ocenka kachestva aerofotosistem metodom matematicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniem kriteriya Shade // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 2017. № 1. S. 28–33.

10. Molchanov A. S. Metodika ocenki linejnogo razresheniya na piksel' aerofotosistem voennogo naznacheniya pri provedenii letnykh ispytaniy // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 2018. № 4. S. 390–396.

11. Molchanov A. S. Issledovanie harakteristik linejnogo razresheniya i razreshayushchej sposobnosti cifrovyyh aerofotosistem s ispol'zovaniem teoremy Kotel'nikova–Najkvista–Shennona // Inzhenernye resheniya. 2019. № 2. S. 8–14.

12. Molchanov A. S. Metodika rascheta porogovoj modulyacionnoj harakteristiki cifrovyyh optiko-elektronnykh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Izv. TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2020. Vyp. 9. S. 328–336.

13. Obshchesoyuznye normativy dlya taksacii lesov / V. V. Zagreev, V. I. Suhii, A. Z. Shvidenko [et al.]. M. : Kolos, 1992. 495 s.
14. Press F. P. Fotochuvstvitel'nye pribory s zaryadovoy svyaz'yu. M. : Radio i svyaz', 1991. 264 s.
15. Savinyh V. P., Kuchko A. S., Stecenko A. F. Aerokosmicheskaya fotos'emka. M. : Kartgeocentr – Geodezizdat, 1997. 378 s.
16. Sviridov K. H., Tyulin A. E. Razreshayushchaya sposobnost' i linejnoe razreshenie dlya ocenki kachestva i proektirovaniya aerokosmicheskikh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy. 2022. № 1. S. 9–29.
17. Sechin A. Yu., Drakin M. A., Kiseleva A. S. Bespilotnyj letatel'nyj apparat: primeneniye v celyah aerofotos'emki dlya kartografirovaniya (chast' 2). URL: https://racurs.ru/upload/iblock/3b4/UAV_2.pdf.
18. Usol'cev V. A., Cepordej I. S., Chasovskih V. P. Modeli dlya ocenki biomassy derev'ev lesoobrazuyushchih vidov po diametru krony v svyazi s ispol'zovaniem dronov // Hvojnye boreal'noj zony. 2023. № 4. S. 300–305.
19. Filatov A. A., Alekseev A. S., Nikiforov A. A. Analiz chislennosti i prostranstvennogo raspolozheniya podrosta na vyrubke na osnove aerofotos'emki // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie : materialy VI Vseros. nauch.-tekhn. konf. T. 2. SPb. : SPbGLTU, 2021. S. 200–203.
20. Frizer H. Fotograficheskaya registraciya informacii. M. : Mir, 1978. 670 s.
21. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House, 2001. URL: https://books.google.ru/books?id=f3zUKZZ_WjMC&dq=%22ground+sample+distance%22&pg=PA30&redir_esc=y#v=twopage&q&f=true.

© Сомов Е. В., Шевелев С. Л., 2025

Поступила в редакцию 09.01.2025
Принята к печати 25.04.2025

СНИЖЕНИЕ ВОЗРАСТА СПЕЛОСТИ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ И МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЕЛОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ

И. В. Преденна¹, С. В. Залесов¹, Н. М. Итешина², А. С. Попов¹, М. Е. Семенова¹

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

²Удмуртский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
Автор для переписки: Залесов Сергей Вениаминович, e-mail: zalesovsv@m.usfeu.ru

Аннотация. По результатам обработки баз данных лесоустроительных материалов и результатов закладки пробных площадей с валкой учетных деревьев установлена целесообразность перехода в арендных участках крупных целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК) от количественной к технической спелости. Последняя рассчитывается по максимальному выходу наиболее востребованного сортимента – хвойного баланса. Установление технической спелости позволит снизить возраст рубки в еловых насаждениях, переданных в аренду для заготовки древесины АО «Соликамскбумпром» с 81–100 до 61–80 лет в насаждениях III и выше классов бонитета и с 101–120 до 81–100 лет в насаждениях IV и ниже классах бонитета.

Указанное позволит не только обеспечить повышение выхода древесины с единицы площади, то есть продуктивность лесов, но и минимизировать риски гибели еловых насаждений от лесных пожаров, сильных ветров и эпифитотий вредных насекомых и болезней. В частности, короеда типографа (*Ips typographus* L.).

В то же время снижение возраста рубки вызовет необходимость перехода от мер содействия естественному возобновлению к искусственному и комбинированному лесовосстановлению еловых насаждений с обязательным проведением агротехнических и лесоводственных уходов.

Ключевые слова: ельники, количественная спелость, техническая спелость, возраст рубки, повышение продуктивности лесов, устойчивость.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 27–34

REDUCING THE AGE OF MATURITY AS A WAY TO INCREASE FOREST PRODUCTIVITY AND MINIMIZE RISKS IN GROWING SPRUCE STANDS

I. V. Predeina¹, S. V. Zalesov¹, N. M. Iteshina², A. S. Popov¹, M. E. Semenova¹

¹Ural State Forestry Engineering University
37, Sibirskiy Trakt Str., Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Izhevsk State Agricultural University
11, Studentcheskays Str., Izhevsk, 426069, Russian Federation
The author for correspondence: Zalesov Sergey Veniaminovich, e-mail: zalesovsv@m.usfeu.ru

Annotation. Based on the results of the databases of forest management materials processing and the results of laying out test plots with felling of accounting trees it was established the advisability of switching from quantitative to technical maturity in the leased areas of large pulp and paper mills. The latter is calculated on the maximum yield of the most popular assortment of coniferous pulpwood. Establishing of technical maturity will allow reducing the cutting age in spruce stands leased for timber procurement by the JSC “Solikamskbumprom” from 81–100 to 61–80 years in plantings of quality class III or higher and from 101–120 to 81–100 years in plantings of IV quality class or lower.

This will not only ensure an increase in timber yield per unit of area, forest productivity, but also minimize the risk of spruce plantations dying from forest fires, strong winds and epiphytotics of pests and diseases, in particular the engraver beetle (*Ips typographus* L.).

At the same time, reducing the cutting age will necessitate a transition from measures to promote natural regeneration to artificial and combined reforestation of spruce stands with mandatory implementation of agricultural and silvicultural care.

Keywords: spruce forest, quantative maturity, technical maturity, age of cutting, increased forest productivity, sustainability.

ВВЕДЕНИЕ

Научно обоснованное лесное хозяйство должно обеспечивать постоянное неистощительное лесопользование при условии рационального использования выращиваемой продукции леса. Сложность реализации поставленной задачи усугубляется наблюдающимися изменениями климата [Лескинен и др., 2020; Желдак, 2022; Зиновьева, 2022].

В результате повышения температуры воздуха и уменьшения количества осадков возрастают риски гибели насаждений от лесных пожаров, эпифитотий вредных насекомых и болезней, а также штормовых ветров [Feurdean et al., 2000, Vuryaev et al., 2001; Flannigan et al., 2001; Пирихалава-Карпова, 2021; Залесов и др., 2022]. Сложившаяся ситуация требует пересмотра и (или) уточнения нормативно-правовых документов по ведению лесного хозяйства на основе объективных данных о состоянии лесного фонда, устойчивости насаждений, их динамике и рисках, возникающих при непродуманных управленческих решениях.

Поскольку основным видом пользования лесом в большинстве субъектов Российской Федерации является заготовка древесины нами рассмотрено влияние возраста рубки на продуктивность лесов и риски, возникающие в процессе лесовыращивания на примере еловых насаждений Пермского края, находящихся в аренде у АО «Соликамскбумпром».

Под возрастом рубки Н. А. Луганский с соавторами [Луганский и др., 2015] понимали возраст древостоя, начиная с которого он переходит из этапа приспевания в этап спелости. В терминологическом словаре [Лесное хозяйство ..., 2002] под возрастом рубки спелых и перестойных насаждений понимается возраст древостоя, установленный для назначения их в рубку спелых и перестойных насаждений в соответствии с целевым назначением лесов.

Важнейшим фактором, влияющим на возраст рубки, является спелость леса, которая, в свою очередь, зависит от целого ряда биологических и экономических факторов. Максимальный эффект от лесовыращивания наблюдается в том случае, когда насаждение поступает в рубку в возрасте той спелости, которая является для лесопользователя целевой. Отклонение от указанного возраста в ту или иную сторону неизбежно приводит к экономическим потерям [Машковский, 2008].

В практике лесопользования чаще всего используется количественная и редко техническая спелости. При этом техническая спелость характеризует возраст древостоя, в котором он имеет наивысший средний прирост по группам основных сортиментов. Возраст наступления максимального среднего прироста древесины всех сортиментов характеризует количественную спелость [Ермаков, 1993; Кахненко, Машковский, 2015; Машковский, Севрюк, 2016].

АО «Соликамскбумпром» является крупнейшим лесопользователем в Пермском крае и ежегодно заготавливает и перерабатывает около 1,5 млн м³ древесины. Основным сырьем для получения газетной бумаги, выпускаемой акционерным обществом, служат хвойные балансы. Однако, как и для других пользователей края, для АО «Соликамскбумпром» в эксплуатационных еловых насаждениях установлен возраст рубки по

количественной спелости, то есть 81–100 лет для насаждений III и выше классов бонитета, 101–120 лет для насаждений IV и ниже классов бонитета. Для защитных лесов указанных классов бонитета возраст рубки выше на один класс возраста, то есть 101–120 и 121–140 лет соответственно. Другими словами, предприятие вынуждено выращивать пиловочник, в то время как необходимым сортиментом являются балансы.

Цель работы – установление возраста технической спелости по максимальному выходу хвойных балансов для АО «Соликамскбумпром» и анализ последствий перехода от количественной спелости к технической.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований служили еловые насаждения Западно-Уральского таежного лесного района. В процессе исследований были обработаны базы данных лесоустроительных материалов (Чермных и др., 2024) с установлением средних таксационных показателей еловых насаждений разных классов возраста и бонитета.

Сбор экспериментальных материалов был выполнен на пробных площадях, которые закладывались в еловых насаждениях I–III и IV классов бонитета в соответствии с требованиями апробированных методических рекомендаций [Данчева, Залесов, 2015; Бунькова и др., 2020]. Помимо естественных древостоев ПП были заложены в искусственных еловых насаждениях.

На всех ПП устанавливались основные таксационные показатели древостоев, а также количественные и качественные показатели подроста путем перечета его на учетных площадках размером 2×2 м в количестве 20–30 учетных площадок на каждой ПП [Об установлении ..., 2021]. Дополнительно при перечете деревьев отбиралось по 25 деревьев ели на каждой ПП пропорционально количеству деревьев в ступенях толщины. Указанные учетные деревья спиливались и разделялись на сортименты в соответствии с требованиями методических рекомендаций А. Г. Мошкалева с соавторами [Мошкалев и др., 1982].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные нами в условиях Западно-Уральского таежного лесного района в границах Пермского края исследования показали, что по материалам лесоустройства выход наиболее востребованного сортимента хвойного баланса в еловых насаждениях прекращает увеличиваться, начиная с 61 года (рис. 1).

В насаждениях IV и ниже классов бонитета возраст резкого сокращения выхода балансов начинается с 81 года (рис. 2).

Материалы рис. 1 и 2 свидетельствуют, что согласно материалам лесоустройства, в арендных участках АО «Соликамскбумпром» наиболее оптимальным является возраст технической спелости, установленный по выходу наиболее востребованного сортимента, то есть 61–80 лет для насаждений I–III классов бонитета и 81–100 лет для насаждений IV и ниже классов бонитета.

Установленные возраста технической спелости подтверждаются и материалами заложенных нами пробных площадей (рис. 3 и 4).

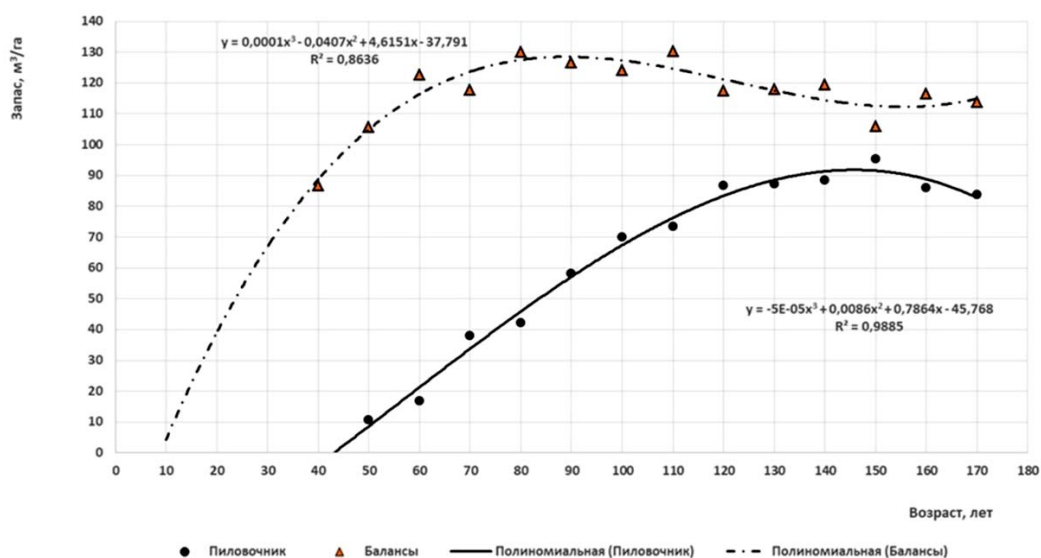


Рис. 1. Возрастная динамика основных еловых сортиментов в ельниках естественного происхождения (класс бонитета I–III) – материалы лесоустройства

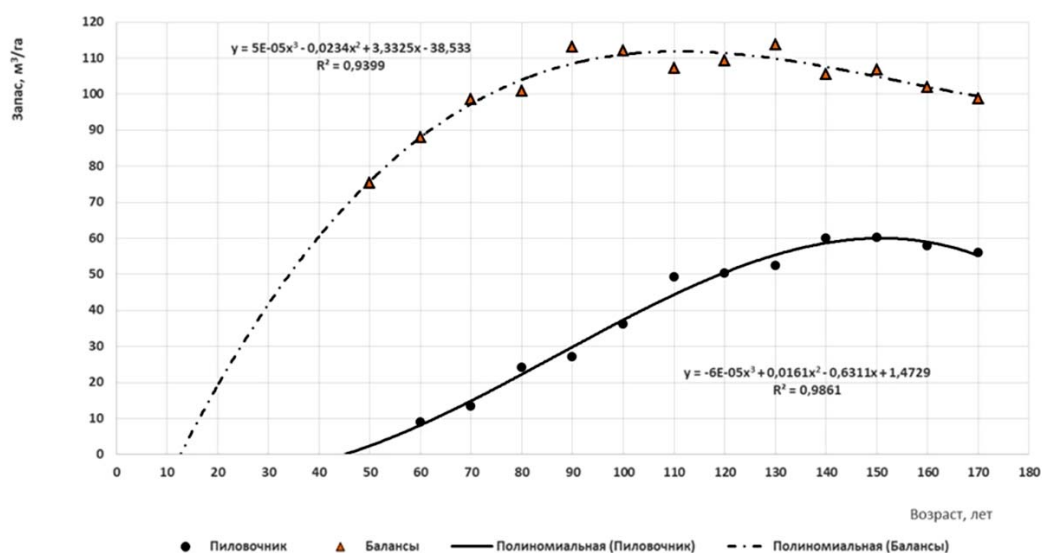


Рис. 2. Возрастная динамика основных еловых сортиментов в ельниках естественного происхождения (класс бонитета IV и ниже) – материалы лесоустройства

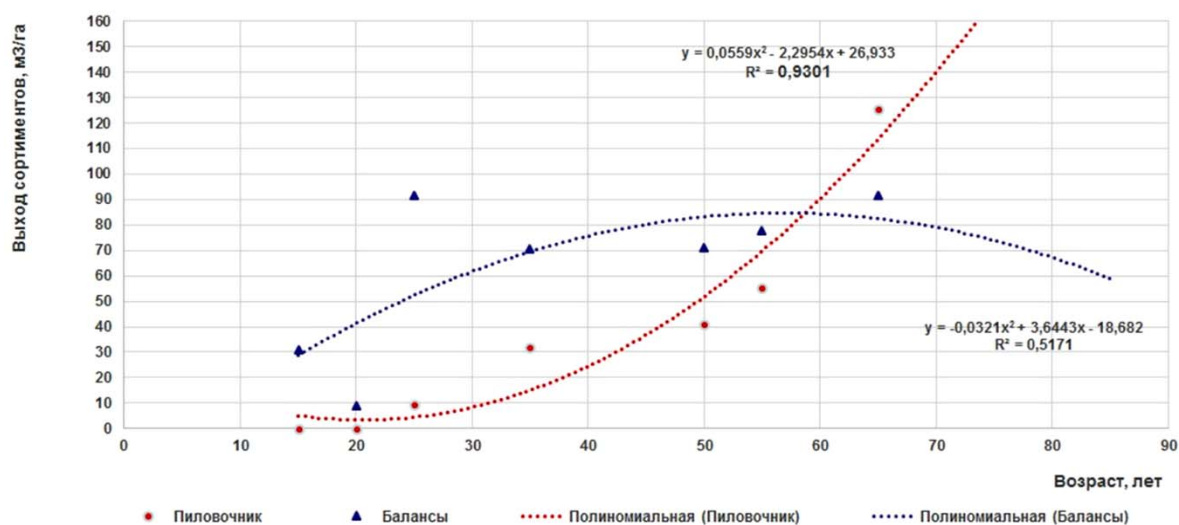


Рис. 3. Возрастная динамика основных еловых сортиментов в ельниках естественного происхождения (класс бонитета I–III) – полевые материалы

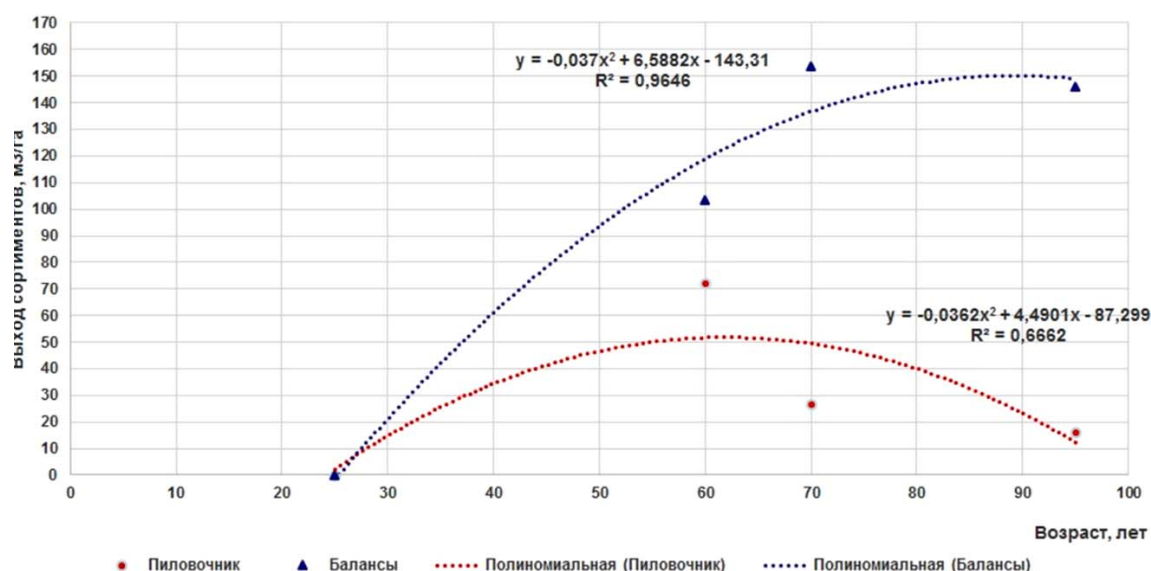


Рис. 4. Возрастная динамика основных еловых сортиментов в ельниках естественного происхождения (класс бонитета IV и ниже) – полевые материалы

Снижение возраста рубки в еловых насаждениях арендных участков крупных ЦБК до возраста технической спелости наиболее востребованных сортиментов позволит решить целый ряд экологических и экономических проблем [Залесов и др., 2024; Семенова и др., 2024; Семенова, Залесов, 2024].

Во-первых, снижение возраста рубки уменьшит оборот рубки и по нашим подсчетам в 1,5 раза повысит продуктивность лесов за счет более высокого прироста и короткого оборота рубки.

Во-вторых, минимизируются риски ветровала и бурелома в еловых насаждениях, поскольку устойчивость против сильного ветра понижается в старовозрастных насаждениях.

В-третьих, по причине более раннего поступления насаждений в рубку уменьшается масса напочвенных горючих материалов и минимизируются риски гибели древостоев от лесных пожаров.

В-четвертых, улучшается санитарное состояние лесов, поскольку напенная гниль ели, как правило, появляется в древостоях старше 100 лет.

В-пятых, в связи с изменением климата резко возрастает опасность эпифитотий стволовых вредителей, в частности, короеда типографа (*Ips typographus* L.). Проведенными ранее исследованиями [Иванчина, Залесов, 2018; Иванчина и др., 2018] установлено, что в условиях Пермского края короед типограф практически не повреждает деревья ели с диаметром на высоте 1,3 м менее 16 см. Следовательно, снижение возраста спелости и переход на заготовку преимущественно балансов предотвратит развитие очагов короеда типографа в еловых насаждениях.

В-шестых, увеличение количества продукции, получаемой с единицы площади, за счет уменьшения оборота рубки позволит сократить площадь арендных участков и улучшить логистику доставки сырья к центрам ее переработки. Другими словами, снизится себестоимость конечной продукции переработки хвойных балансов.

В-седьмых, снижение возраста рубки увеличивает прирост древесины в пересчете на единицу площади, поскольку более молодые еловые насаждения характеризуются большим приростом. Общеизвестно, что в старовозрастных насаждениях отпад практически равен приросту, а следовательно, весь задепонированный в процессе фотосинтеза из атмосферного воздуха углерод будет возвращаться в атмосферу в процессе разложения отпада. Другими словами, снижение возраста рубки и своевременное изъятие и переработка древесины являются одним из лесоводственных направлений реализации климатических проектов по минимизации в атмосфере парниковых газов.

Естественно, что снижение возраста рубки путем установления технической спелости по наиболее востребованному сортименту целесообразно только для крупных предприятий с объемом заготавливаемой древесины не менее 500 тыс. м³. Кроме того, следует учитывать изменение в соотношении способов лесовосстановления. Выполненные нами исследования показали, что обеспеченность жизнеспособным подростом еловых насаждений зависит от возраста древостоя и класса бонитета (рис. 6 и 7).

Материалы рис. 6 и 7 свидетельствуют, что несмотря на различие в продуктивности лесов общие закономерности в обеспеченности подростом хвойных пород являются идентичными. Так, в насаждениях I–III классов бонитета максимальное количество подроста зарегистрировано под пологом 185-летних насаждений, а в насаждениях IV и ниже классов бонитета в 165-летних. При этом в первом случае густота хвойного жизнеспособного подроста составляет 2,05 тыс. шт./га, а во втором – 2,2 тыс. шт./га. Естественно, что выращивать еловые насаждения до указанного возраста, в целях накопления подроста предварительной генерации, нецелесообразно ни с экономической, ни с экологической точек зрения.

Для планирования способа лесовосстановления действующим нормативным документом [Об утвер-

ждении..., 2021] предусмотрены определенные значения густоты подроста хозяйственно ценных пород. Для еловых насаждений I–III классов бонитета установлены следующие показатели густоты подроста, тыс. шт./га:

- сохранение подроста – более 1600;
- минерализация почвы – 700–1600;
- комбинированное лесовосстановление – 1100–1500;

– искусственное лесовосстановление – менее 700.

Для еловых насаждений IV и ниже классов бонитета указанные показатели следующие, тыс. шт./га:

- сохранение подроста – более 1400;
- минерализация почвы – 600–1400;
- комбинированное лесовосстановление – 1100–1500;
- искусственное лесовосстановление – менее 600.

Анализ материалов, приведенных на рис. 6 и 7, свидетельствует, что в еловых насаждениях при ориентации на сохранение подроста рубку следует проводить в насаждениях III и выше классов бонитета в 135 лет, а в насаждениях IV и ниже классов бонитета в 110 лет. При установлении возраста рубки по технической спелости, рассчитанной на получение балансов, потребуется проводить искусственное лесовосстановление на большинстве вырубках после сплошных лесосечных рубок в еловых насаждениях всех классов бонитета.

Увеличение доли искусственного лесовосстановления позволит, в свою очередь, ускорить получение балансовой древесины, что наглядно прослеживается на материалах рис. 8, основанных на материалах пробных площадей, заложенных в искусственных еловых насаждениях I–III классов бонитета.

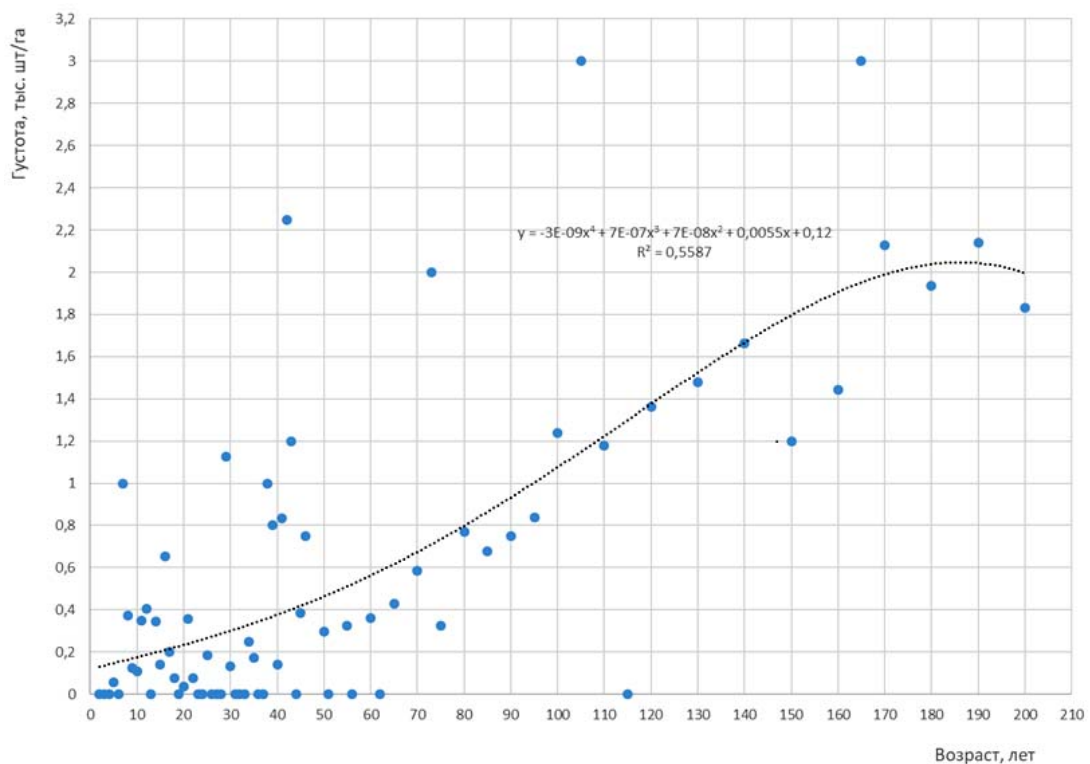


Рис. 6. Динамика накопления крупного жизнеспособного подроста в ельниках I–III классов бонитета естественного происхождения – материалы лесоустройства

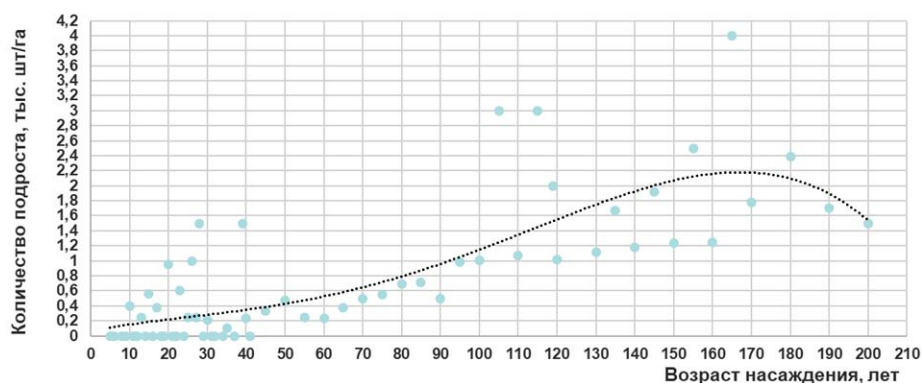


Рис. 7. Динамика накопления подроста в еловых насаждениях IV и ниже классов бонитета

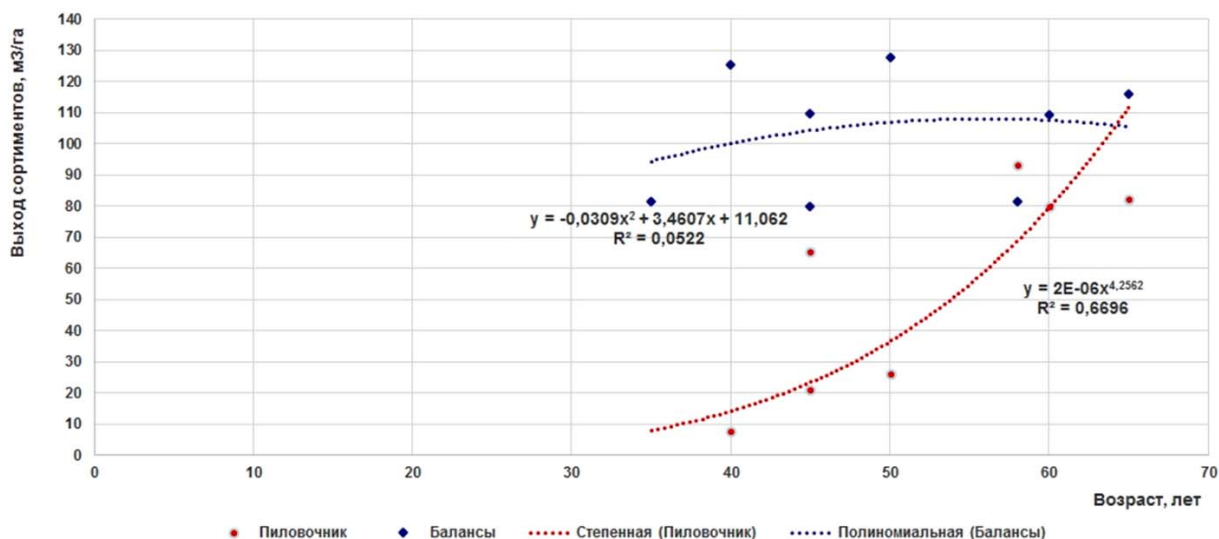


Рис. 8. Возрастная динамика основных еловых сортиментов в ельниках искусственного происхождения (класс бонитета I–III) – полевые материалы

ВЫВОДЫ

1. В целях повышения продуктивности лесов и обеспечения их устойчивости при лесовыращивании в арендных участках крупных ЦБК, с заготовкой более 500 м³ древесины в год, следует перейти от количественной спелости к технической.

2. Снижение возраста рубки в еловых насаждениях на один класс возраста не только повысит количество древесины, получаемой с единицы площади, и улучшит экономические показатели предприятия, но и решит целый ряд экологических проблем, в частности, будет способствовать ускоренному депонированию углерода в выращиваемой древесине.

3. Переход на техническую спелость по наиболее востребованному для ЦБК сортименту-балансам, будет способствовать минимизации рисков гибели еловых насаждений от пожаров, сильных ветров и эпифитотий стволовых вредителей, но потребует перехода на искусственное и комбинированное лесовосстановление.

4. Учитывая важную роль перехода от количественной к технической спелости, следует продолжить исследования в данном направлении, а также получить объективные данные об объемах депонируемого в процессе фотосинтеза углерода еловыми насаждениями при различных возрастах рубки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Машковский В. П., Севрук П. В. Техническая и хозяйственная спелость еловых древостоев // Труды БГТУ. Лесное хозяйство. Минск, 2016. № 1 (183). С. 14–18.
2. Ермаков В. Е. Лесоустройство. Минск : Вышш. школа, 1993. 259 с.
3. Машковский В. П. Методика оценки потерь от несвоевременного поступления древостоев в рубку // Труды БГТУ. Сер. I. Лесное хозяйство. 2008. Вып. XVI. С. 21–25.
4. Кохненко А. С., Машковский В. П. Методика оценки оптимальности планов рубки // Труды БГТУ. Лесное хозяйство, 2015. № 1. С. 20–23.

5. Создание электронной лесотаксационной базы данных / А. И. Черных, И. В. Безденежных, С. В. Залесов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 3 (90). С. 56–62. DOI: 10.51318/FRET.2024.71.57.006.

6. Проблематика интенсификации лесопользования и пути ее решения / С. В. Залесов, И. В. Безденежных, Н. П. Бунькова [и др.] // Лесные экосистемы бореальной зоны: биосферная роль, биоразнообразие, экологические риски : материалы Междунар. конф. Красноярск : ИЛСО РАН, 2024. С. 115–116.

7. Повышение устойчивости еловых насаждений / М. Е. Семенова, Т. Н. Агафонова, А. С. Новожилов [и др.]. Брянск : БГТУ, 2024. С. 231–233.

8. Семенова М. Е., Залесов С. В. Совершенствование ведения лесного хозяйства в связи с меняющимся климатом // Интенсификация использования и воспроизводства лесов Сибири и Дальнего Востока. Хабаровск : Изд-во ФБУ «Даль НИИЛХ», 2024. С. 258–261.

9. Иванчина Л. А., Залесов С. В., Косенкова Е. И. Влияние размера деревьев ели на их устойчивость в условиях Прикамья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: науки и высшее профессиональное образование. 2018. № 1 (49). С. 147–153.

10. Иванчина Л. А., Залесов С. В. Влияние размера деревьев ели на их устойчивость в условиях ельника зеленомошного // Актуальные проблемы лесного комплекса : сб. науч. тр. Вып. 51. Брянск : БГИТУ, 2018. С. 34–37.

11. Основы фитомониторинга / Н. П. Бунькова, С. В. Залесов, Е. С. Залесова [и др.]. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2020. 90 с.

12. Таксация товарной структуры древостоев / А. Г. Мошкалев, А. А. Книзе, Н. И. Ксенофонов [и др.]. М. : Лесная промышленность, 1982. 160 с.

13. Данчева А. В., Залесов С. В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 152 с.

14. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка составления проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления : Утв. Приказом Минприроды России от 29.12.2021 № 1024.

15. Лесное хозяйство : терминологический словарь / под общ. ред. А. Н. Филиппчука. М. : ВНИИЛМ, 2002. 480 с.

16. Луганский Н. А., Залесов С. В., Луганский В. Н. Лесоведение и лесоводство. Термины, понятия, определения. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 125 с.

17. Recent fire regime in the Southern boreal forests of Western Siberia is unprecedented in the last five millennia / A. Feurdean, G. Florescu, I. Tantau [et al.] // *Quaternary Sci. Rev.* 2020. Vol. 244. P. 106495.

18. Flannigan M., Stocks B., Turetsky M. Wotton Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest / *Glob. Change Biol.* 2009. Vol. 15. P. 549–560.

19. Effects of Fire and climate on Successions and Structural / V. V. Vurgaev, E. A. Vaganov, N. M. Tchebakova [et al.] // *Euras. J. For. Res.* 2001. № 2. P. 1–15.

20. Залесов С. В., Платонов Е. П., Платонов Е. Ю. Пожары и их последствия в Западной Сибири. Екатеринбург : УГЛТУ, 2022. 191 с.

21. Защита словых лесов от вспышек *Ips typographus* (обзор) / Н. Р. Пирихалава-Карпова, А. А. Карпов, Е. Е. Козловский [и др.] // *Известия вузов. Лесной журнал.* 2021. № 4. С. 55–67.

22. Желдак В. И. Функционально-целевая «карбонная» система объектов лесоводства углеводородопонирующего и углеродохранительного назначения: ее формирование и использование // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование.* 2022. № 4 (56). С. 47–73. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.4.5>.

23. Зиновьева О. А. Правовое регулирование декарбонизации и охраны атмосферного воздуха в целях решения глобальной экологической проблемы изменения климата // *Вестник Университет имени О. Е. Кутафина (МГЮА).* 2022. № 5 (93). С. 95–103. DOI: 10.17803/2311-5998.2022.93.5.095-103.

24. Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука 11 / П. Лескинен, М. Линднер, П.-й Веркерк [и др.]. Joensuu, 2020. 142 с.

REFERENCES

1. Mashkovskij V. P., Sevruk P. V. Tekhnicheskaya i hozyajstvennaya spelost' elovyh drevostoev // *Trudy BGTU. Lesnoe hozyajstvo.* Minsk, 2016. № 1 (183). S. 14–18.

2. Ermakov V. E. Lesoustrojstvo. Minsk : Vyssh. shkola, 1993. 259 s.

3. Mashkovskij V. P. Metodika ocenki poter' ot nesvoevremennogo postupleniya drevostoev v rubku // *Trudy BGTU. Ser. I. Lesnoe hozyajstvo.* 2008. Vyp. XVI. S. 21–25.

4. Kohnenko A. S., Mashkovskij V. P. Metodika ocenki optimal'nosti planov rubki // *Trudy BGTU. Lesnoe hozyajstvo,* 2015. № 1. S. 20–23.

5. Sozдание elektronnoy lesotaksacionnoy bazy dannyh / A. I. Chernykh, I. V. Bezdeneznykh, S. V. Zalesov [i dr.] // *Les Rossii i hozyajstvo v nih.* 2024. № 3 (90). S. 56–62. DOI: 10.51318/FRET.2024.71.57.006.

6. Problematika intensifikatsii lesopol'zovaniya i puti ee resheniya / S. V. Zalesov, I. V. Bezdeneznykh, N. P. Bun'kova [i dr.] // *Lesnye ekosistemy boreal'noj zony: biosferная rol', bioraznoobrazie, ekologicheskie riski* : Mat. mezhd. konf. Krasnoyarsk : ILSO RAN, 2024. S. 115–116.

7. Povyshenie ustojchivosti elovyh nasazhdenij / M. E. Semenova, T. N. Agafonova, A. S. Novozhilov [i dr.]. Bryansk : BGTU, 2024. S. 231–233.

8. Semenova M. E., Zalesov S. V. Sovershenstvovanie vedeniya lesnogo hozyajstva v svyazi s menyayushchimsya klimatom // *Intensifikatsiya ispol'zovaniya i vosproizvodstva lesov Sibiri i Dal'nego Vostoka.* Habarovsk : Izd-vo FBU "Dal' NIILH", 2024. S. 258–261.

9. Ivanchina L. A., Zalesov S. V., Kosenkova E. I. Vliyanie razmera derev'ev eli na ih ustojchivost' v usloviyakh Prikam'ya // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauki i vysshee professional'noe obrazovanie.* 2018. № 1 (49). S. 147–153.

10. Ivanchina L. A., Zalesov S. V. Vliyanie razmera derev'ev eli na ih ustojchivost' v usloviyakh el'nika zelenomoshnogo // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* : Sb. nauch. trudov. Vyp. 51. Bryansk : BGITU, 2018. S. 34–37.

11. Osnovy fitomonitoringa / N. P. Bun'kova, S. V. Zalesov, E. S. Zalesova [i dr.]. Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2020. 90 s.

12. Taksatsiya tovarnoj struktury drevostoev / A. G. Moshkalev, A. A. Knize, N. I. Ksenofontov [i dr.]. M. : Lesnaya promyshlennost', 1982. 160 s.

13. Dancheva A. V., Zalesov S. V. Ekologicheskij monitoring lesnyh nasazhdenij rekreacionnogo naznacheniya. Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2015. 152 s.

14. Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya, formy, sostava, poryadka sostavlenniya proekta lesovosstanovleniya, osnovaniy dlya otказа v ego soglasovanii, a takzhe trebovaniy k formatu v elektronnoy forme proekta lesovosstanovleniya : Utv. Priказом Minprirody Rossii ot 29.12.2021 № 1024.

15. Lesnoe hozyajstvo: Terminologicheskij slovar' / Pod obshch. red. A. N. Filipchuka. M. : VNIILM, 2002. 480 s.

16. Luganskij N. A., Zalesov S. V., Luganskij V. N. Lesovedenie i lesovodstvo. Terminy, ponyatiya, opredeleniya. Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2015. 125 s.

17. Recent fire regime in the Southern boreal forests of Western Siberia is un-precedented in the last five millennia / A. Feurdean, G. Florescu, I. Tantau [et al.] // *Quaternary Sci. Rev.* 2020. Vol. 244. P. 106495.

18. Flannigan M., Stocks B., Turetsky M. Wotton Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest / *Glob. Change Biol.* 2009. Vol. 15. P. 549–560.

19. Effects of Fire and climate on Successions and Structural / V. V. Vurgaev, E. A. Vaganov, N. M. Tchebakova [et al.] // Euras. J. For. Res. 2001. № 2. P. 1–15.

20. Zalesov S. V., Platonov E. P., Platonov E. Yu. Pozhary i ih posledstviya v Zapadnoj Sibiri. Ekaterinburg: UGLTU, 2022. 191 s.

21. Zashchita elovyh lesov ot vspyshek Ips typographus (obzor) / N. R. Pirihalava-Karpova, A. A. Karpov, E. E. Kozlovskij [i dr.] // Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal. 2021. № 4. S. 55–67.

22. Zheldak V. I. Funkcional'no-celevaya "karbo-novaya" sistema ob"ektov lesovodstva uglevododepo-niruyushchego i ugleradokonservacionnogo naznache-niya: ee formirovanie i ispol'zovanie // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie.

2022. № 4 (56). S. 47–73. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.4.5>.

23. Zinov'eva O. A. Pravovoe regulirovanie dekarbo-nizacii i ohrany atmosfernogo vozduha v celyah resheniya global'noj ekologicheskoy problemy izmeneniya klimata // Vestnik Universitet imeni O. E. Kutafina (MGYuA). 2022. № 5 (93). S. 95–103. DOI: 10.17803/2311-5998.2022.93.5.095-103.

24. Leskinen P. Lesa Rossii i izmenenie klimata. Chto nam mozhет skazat' nauka 11 / P. Leskinen, M. Lindner, P.-j Verkerk [i dr.]. Joensuu, 2020. 142 s.

© Предеина И. В., Залесов С. В., Итешина Н. М.,
Попов А. С., Семенова М. Е., 2025

Поступила в редакцию 13.01.2025
Принята к печати 25.04.2025

ОТСЕЛЕКТИРОВАННЫЕ 20-ЛЕТНИЕ ДЕРЕВЬЯ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ РОСТА И РАННЕМУ РЕПРОДУКТИВНОМУ РАЗВИТИЮ

Р. Н. Матвеева, И. В. Комаров, М. В. Гришлова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: komarovilya13@gmail.ru

Аннотация. Исследования проведены на плантации «ЛЭП-2», расположенной в Караульном лесничестве Учебно-опытного лесхоза СибГУ науки и технологий им. М. Ф. Решетнева. На данной плантации произрастает потомство сосны кедровой сибирской во втором поколении разного географического происхождения: алтайского (урочища Атушкен, Курли, Туштуезень), бирюсинского, танзыбейского, тисульского, черемховского, ярцевского. Плантация была создана из семян собранных на географических плантациях «Метеостанция» и «Известковая», расположенных в том же лесничестве. По интенсивности роста на плантации «ЛЭП-2» выделяются экземпляры превышающие по высоте и диаметру ствола среднее значение по происхождению более чем на 15 % с плантации «Метеостанция»: № 6-3, 6-18, 6-38, 6-43, 6-46, 3-43, 3-47 алтайского; № 2-30, 2-36 и 5-8 бирюсинского; № 3-10, 3-11, 3-13, 3-15, 8-43 тисульского и № 4-9, 4-12, 4-15, 9-6 ярцевского происхождения, и с плантации «Известковая» № 4-30, 4-37, 4-40 танзыбейского и № 2-12, 2-14, 2-15, 2-17, 8-2 черемховского происхождения. По раннему репродуктивному развитию с образованием макростробилов выделено 6 деревьев. Наибольшее количество макростробилов было у экземпляров № 5-12 бирюсинского (4 шт.) и № 8-37 тисульского (3 шт.) происхождения. Микростробилы сформировались у 12 деревьев. Наибольшее их значение было у экземпляра № 4-21 ярцевского и № 6-7 алтайского (ур. Атушкен) происхождения. Выделено два экземпляра образовавших макро- и микростробилов: № 3-32 тисульского и № 5-12 бирюсинского происхождения, а также два экземпляра являются и быстрорастущими и раннего образования пыльцы: № 3-13 тисульского и № 6-46 алтайского (ур. Курли) происхождения. Отселектированные экземпляры планируется размножить вегетативно с целью выращивания посадочного материала, отличающегося интенсивным ростом и ранним репродуктивным развитием.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, второе поколение, репродуктивное развитие, географическое происхождение.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 35–39

20-YEAR-OLD PINUS SIBIRICA TREES SELECTED BY GROWTH INTENSITY AND EARLY REPRODUCTIVE DEVELOPMENT

R. N. Matveeva, I. V. Komarov, M. V. Grishlova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: komarovilya13@gmail.ru

Annotation. The research was conducted on the LEP-2 plantation located in the Karaulnoye forestry of the Educational and Experimental Forestry Enterprise of the Siberian State University of Science and Technology named after M. F. Reshetnev. The second generation of *Pinus Sibirica* of different geographical origins: Altai (Atushken, Kurli, Tushtuezen tracts), Biryusinsky, Tanzybeysky, Tisulsky, Cheremkhovsky, Yartsevsky grows on this plantation. The plantation was created from seeds collected on the Meteostation and Izvestkovaya geographical plantations located in the same forestry. According to the intensity of growth on the plantation "LEP-2" there are specimens that exceed the average value by origin in height and trunk diameter by more than 15 %: No. 6-3, 6-18, 6-38, 6-43, 6-46, 3-43, 3-47 of Altai origin; No. 2-30, 2-36 and 5-8 of Biryusinsky origin; No. 3-10, 3-11, 3-13, 3-15, 8-43 of Tisulsky origin and No. 4-9, 4-12, 4-15, 9-6 of Yartsevsky origin on the plantation "Meteostation"; and No. 4-30, 4-37, 4-40 of Tanzybei origin and No. 2-12, 2-14, 2-15, 2-17, 8-2 of Cheremkhovsky origin on the Izvestkovaya plantation. According to early reproductive development with the formation of macrostrobiles, 6 trees stand out. The largest number of macrostrobiles was in specimens No. 5-12 of Biryusinsky (4 pcs.) and № 8-37 of Tisulsky (3 pcs) origin. Microstrobiles were formed in 12 trees. The highest value was in specimen No. 4-21 of Yartsevsky and No. 6-7 of Altai (ur. Atushken) origin. Two specimens that formed macro- and microstrobiles were selected: No. 3-32 of Tisulsky and № 5-12 of Biryusinsky origin, and two specimens are both fast-growing and early in pollen formation: No. 3-13 of Tisulsky and No. 6-46 of Altai

(*ur. Kurli*) origin. Selected specimens are supposed to be propagated vegetatively in order to grow planting material characterized by intensive growth and early reproductive development.

Keywords: *Pinus Sibirica*, second generation, reproductive development, geographical origin.

ВВЕДЕНИЕ

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) является ценной хвойной древесной породой, отличающейся образованием кедровых орехов, имеющих большую питательную ценность, в состав которых входят белки, жиры, углеводы, витамины, макро-, микроэлементы и др. Данный вид отличается высокой биоэкологичностью, продолжительным периодом жизни (до 500–850 лет), востребованной древесиной [1; 2; 5; 8; 12]. О проявлении индивидуальной, популяционной, географической изменчивости данного вида отмечается во многих источниках [3; 4; 7; 9; 11; 13; 14; 15]. Имеются литературные данные об изменчивости в области репродуктивного развития [16], о селекционной оценке и проведении отбора деревьев по целевому назначению [6; 10; 16; 17; 18; 19; 20]. Целью наших исследований явилось выделить деревья в 20-летнем возрасте, отличающиеся интенсивностью роста и образованием макро- и микростробилы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования были 20-летние деревья сосны кедровой сибирской во втором поколении, произрастающие на плантации «ЛЭП-2», расположенной в Учебно-опытном лесхозе СибГУ науки и технологий им. М. Ф. Решетнева. Плантация была создана в 2014 году с использованием 10-летних се-

янцев разного географического происхождения: алтайского (урочища Атушкень, Курли и Туштуезень), бирюсинского, танзыбейского, тисульского, черемховского и ярцевского. Для выращивания сеянцев шишки были собраны на географических плантациях «Метеостанция» и «Известковая» первого поколения, созданных в тех же условиях, что и «ЛЭП-2». Посадка сеянцев второго поколения проведена в площадки размером 1,5×1,5 м. Расстояние между площадками составило 4×4 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В 20-летнем возрасте потомство сосны кедровой сибирской разного географического происхождения во втором поколении на плантации «ЛЭП-2» имело следующую изменчивость по высоте и диаметру ствола (табл. 1).

Были отселектированы экземпляры в вариантах разного географического происхождения по превышению высоты и диаметра ствола в сравнении со средним значением по происхождению на 15 % и более (табл. 2).

Также в 2024 году был произведен учет деревьев, образовавших макростробилы и микростробилы в 20-летнем возрасте. Экземпляры, образовавшие макростробилы приведены в табл. 3.

Данные об экземплярах сосны кедровой сибирской, образовавших микростробилы, приведены в табл. 4.

Таблица 1
Высота и диаметр ствола у сосны кедровой сибирской

Показатели	$\bar{X}_{cp}$	max	min	$\pm m$	$\pm \sigma$	$V, \%$	$P, \%$	Уровень изменчивости
Высота, м	3,26	4,68	1,15	0,05	0,68	20,8	1,6	средний
Диаметр, см	6,3	9,3	2,4	0,10	1,32	21,2	1,6	высокий

Таблица 2
Показатели роста 20-летних отселектированных экземпляров

Географическое происхождение	Номер дерева	Высота		Диаметр ствола	
		м	% к $\bar{X}_{cp}$	см	% к $\bar{X}_{cp}$
Алтайское (урочище Атушкень)	6-3	4,17	129,5	7,6	126,7
	6-18	4,44	137,9	9,3	155,0
Среднее значение по происхождению		3,22	100,0	6,0	100,0
Алтайское (урочище Курли)	6-38	3,72	122,7	8,4	135,5
	6-43	3,88	128,0	7,8	125,8
	6-46	3,83	126,4	8,6	138,7
Среднее значение по происхождению		3,03	100,0	6,2	100,0
Алтайское (урочище Туштуезень)	3-43	4,10	115,8	8,8	129,4
	3-47	4,28	120,9	8,4	123,5
Среднее значение по происхождению		3,54	100,0	6,8	100,0
Бирюсинское	2-30	4,07	121,9	8,8	135,4
	2-36	3,90	116,8	8,3	127,7
	5-8	4,42	132,3	9,3	143,1
Среднее значение по происхождению		3,34	100,0	6,5	100,0

Окончание табл. 2

Географическое происхождение	Номер дерева	Высота		Диаметр ствола	
		м	% к $X_{\text{ср}}$	см	% к $X_{\text{ср}}$
Танзыбейское	4-30	3,95	116,9	7,7	116,7
	4-37	3,92	116,0	8,4	127,3
	4-40	3,98	117,8	8,3	125,8
Среднее значение по происхождению		3,38	100,0	6,6	100,0
Тисульское	3-10	4,33	133,6	7,2	124,1
	3-11	4,18	129,0	7,7	132,8
	3-13	4,23	130,6	7,3	125,9
	3-15	4,10	126,5	8,7	150,0
	8-43	3,75	115,7	6,9	118,9
Среднее значение по происхождению		3,24	100,0	5,8	100,0
Черемховское	2-12	3,93	122,4	7,9	131,7
	2-14	4,68	146,0	8,9	148,3
	2-15	4,20	130,8	8,5	141,7
	2-17	4,53	141,1	9,2	153,3
	8-2	4,04	125,9	7,2	120,0
Среднее значение по происхождению		3,21	100,0	6,0	100,0
Ярцевское	4-9	4,28	133,8	7,5	119,0
	4-12	3,96	123,8	8,3	131,7
	4-15	4,07	127,2	8,3	131,7
	9-6	3,88	121,3	8,2	130,1
Среднее значение по происхождению		3,20	100,0	6,3	100,0

Таблица 3
Деревья с макростробилами

Географическое происхождение	Номер дерева	Количество макростробилов	
		шт.	% к $X_{\text{ср}}$
Алтайское (ур. Курли)	6-34	1	50,0
Бирюсинское	5-12	4	200,0
Бирюсинское	9-20	2	100,0
Танзыбейское	11-31	1	50,0
Тисульское	3-32	1	50,0
Тисульское	8-37	3	150,0
Среднее значение		2	100,0

Таблица 4
Деревья с микростробилами в 20-летнем возрасте

Географическое происхождение	Номер дерева	Микростробилы	
		шт.	% к $X_{\text{ср}}$
Алтайское (ур. Атушкень)	6-7	17	239,4
Алтайское (ур. Атушкень)	6-19	9	126,8
Алтайское (ур. Курли)	6-46	2	28,1
Бирюсинское	5-23	1	14,1
Бирюсинское	5-17	1	14,1
Бирюсинское	5-12	2	28,1
Бирюсинское	5-11	5	70,4
Бирюсинское	5-7	1	14,1
Танзыбейское	4-32	10	140,8
Тисульское	3-32	2	28,1
Тисульское	3-13	9	126,8
Ярцевское	4-21	20	281,7
Среднее значение		7,1	100

Среди деревьев сосны кедровой сибирской, образовавших микростробилов в 2024 году имели наибольшее их количество следующие экземпляры:

№ 4-21 ярцевского образовал 20 микростробилов, № 6-7 алтайского (ур. Атушкень) – 17 шт., № 4-32 танзыбейского 10 микростробилов.

Выделены деревья уже формировавшие микро-стробилы в предыдущие годы [10]. Экземпляры № 3-13 тисульского, № 6-7 и № 6-19 алтайского происхождения (ур. Атушкень) с 2022 года на протяжении трех лет подряд формировали микростробилы, № 5-11 бирюсинского происхождения в 2023 и 2024 году, и № 4-21 ярцевского происхождения образовывали микростробилы в 2022 и 2024 гг., соответственно (рис. 1).



Рис. 1. Экземпляр № 4-21, образовавший микростробилы в 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отселектированные деревья рекомендуются для дальнейшего их вегетативного размножения и использования посадочного материала для создания селекционных объектов, отличающихся интенсивным ростом и ранним репродуктивным развитием. В 2024 г. к быстрорастущим отнесено 27 деревьев, ранним образованием макростробилов – 6 шт., микростробилов – 12 шт. Большую ценность представляют деревья № 3-32 тисульского и № 5-12 бирюсинского происхождения, образовавшие в 20-летнем возрасте макро- и микростробилы, а также № 3-13 тисульского и № 6-46 алтайского (ур. Курли) происхождения, отнесенные к группе быстрорастущих и раннего образования микростробилов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабич Н. А., Соколов Н. Н., Бахтин А. А. Бесценный дар тайги / Арханг. гос. техн. ун-т, 1996. 224 с.
2. Бех И. А., Кривец С. А., Бисирова Э. М. Кедр – жемчужина Сибири. Томск : Печатная мануфактура, 2009. 49 с.

3. Братилова Н. П., Свалова А. И., Гришлова М. В. Рост сосны кедровой сибирской разного географического происхождения под пологом леса // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37. № 6. С. 381–384.

4. Брынцев В. А., Храмова М. И. Индивидуальная и семейственная изменчивость семян сосны кедровой сибирской, выращенных из семян интродукционной популяции // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 5. С. 4–10.

5. Горошкевич С. Н. Селекция кедра сибирского как орехоплодной породы // Лесное хозяйство, 2000. № 4. С. 25–27.

6. Земляной А. И., Некрасова Т. Н. Методика отбора плюсовых деревьев кедра сибирского по семенной продуктивности // Гос. ком. СССР по лесн. хозяйству. Москва : ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1980. 22 с.

7. Ирошников А. И. Полиморфизм популяций кедра сибирского // Изменчивость древесных растений Сибири. Красноярск, 1974. С. 77–103.

8. Ирошников А. И. Биоэкологические свойства и изменчивость кедра сибирского // Кедровые леса Сибири. Новосибирск : Наука, 1985. С. 8–40.

9. Комарницкий В. В., Щерба Ю. Е. Изменчивость показателей сосны кедровой сибирской разного географического происхождения во втором поколении // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 6. С. 451–456.

10. Комаров И. В., Щерба Ю. Е., Гришлова М. В. Показатели роста сосны кедровой сибирской раннего образования микростробилов во втором поколении // Хвойные бореальной зоны, 2024. Т. 42, № 4. С. 75–81.

11. Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. Москва : Наука, 1973. 284 с.

12. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Братилова Н. П. Полезные свойства и методы размножения кедра сибирского : монография / М-во образования Рос. Федерации. Сиб. гос. технол. ун-т. Красноярск : СибГТУ, 2003. 154 с.

13. Изменчивость показателей 10-летней сосны кедровой сибирской на учебно-научном объекте «ЛЭП-2» / Р. Н. Матвеева, А. Г. Кичильдеев, Ю. Е. Щерба [и др.] // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2016. Т. XIX, № 1. С. 51–53.

14. Влияние географического происхождения на рост сосны кедровой сибирской во втором поколении / Р. Н. Матвеева, О. Ф. Буторова, Ю. Е. Щерба [и др.] // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 6. С. 426–431.

15. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф. Исследования по выращиванию сосны кедровой сибирской за многолетний период // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 374–380.

16. Паркина О. В., Третьякова Р. А., Галецкая Г. А. Динамика семеношения сосны кедровой сибирской (pinus sibirica) в условиях Новосибирской области // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 44–50.

17. Попов А. В. Влияние погодных факторов на заложение макростробилов сосны кедровой сибирской pinus sibirica du tour (pinaceae lindl.) // Проблемы

ботаники Южной Сибири и Монголии. 2023. № 22-1. С. 270–273.

18. Титов Е. В. Плантационное выращивание кедровых сосен // учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Лесное хоз-во» направления «Лесное хоз-во и ландшафт. стр-во». Воронеж : Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2004 (Тип. ЦНТИ). 165 с.

19. Титов Е. В. Орехопродуктивные кедровые плантации и лесосады : монография / М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Воронеж, 2021. 267 с.

20. Воспроизводство сосны кедровой сибирской на генетико-селекционной основе / Ю. Е. Щерба, А. А. Ибе, Т. В. Сухих, Д. Е. Копченко // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 5. С. 401–407.

REFERENCES

1. Babich N. A., Sokolov N. N., Bahtin A. A. Bescen-nyj dar tajgi / Arhang. gos. tekhn. un-t, 1996. 224 s.

2. Bekh I. A., Krivec S. A., Bisirova E. M. Kedr – zhemchuzhina Sibiri. Tomsk : Pechatnaya manufaktura, 2009. 49 s.

3. Bratilova N. P., Svalova A. I., Grishlova M. V. Rost sosny kedrovoj sibirskoj raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya pod pologom lesa // Hvojnye boreal'noj zony. 2019. T. 37, № 6. S. 381–384.

4. Bryncev V. A., Hramova M. I. Individual'naya i semejstvennaya izmenchivost' seyancev sosny kedrovoj sibirskoj, vyrashchennyh iz semyan introdukcionnoj populyacii // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik. 2011. № 5. S. 4–10.

5. Goroshkevich S. N. Selekcija kedra sibirskogo kak orekhoplodnoj porody // Lesnoe hozyajstvo, 2000. № 4. S. 25–27.

6. Zemlyanov A. I., Nekrasova T. N. Metodika otbora plusovyh derev'ev kedra sibirskogo po semennoj produktivnosti // Gos. kom. SSSR po lesn. hoz-vu. Moskva : CBNTI Gosleskhoza SSSR, 1980. 22 s.

7. Iroshnikov A. I. Polimorfizm populyacij kedra sibirskogo // Izmenchivost' drevesnyh rastenij Sibiri. Krasnoyarsk, 1974. S. 77–103.

8. Iroshnikov A. I. Bioekologicheskie svoystva i izmenchivost' kedra sibirskogo // Kedrovye lesa Sibiri. Novosibirsk : Nauka, 1985. S. 8–40.

9. Komarnickij V. V., Shcherba Yu. E. Izmenchivost' pokazatelej sosny kedrovoj sibirskoj raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya vo vtorom pokolenii // Hvojnye boreal'noj zony. 2021. T. 39, № 6. S. 451–456.

10. Komarov I. V., Shcherba Yu. E., Grishlova M. V. Pokazateli rosta sosny kedrovoj sibirskoj rannego obrazovaniya mikrostrombilov vo vtorom pokolenii // Hvojnye boreal'noj zony, 2024. T. 42, № 4. S. 75–81.

11. Mamaev S. A. Formy vnutrividovoj izmenchivosti drevesnyh rastenij. Moskva : Nauka, 1973. 284 s.

12. Matveeva R. N., Butorova O. F., Bratilova N. P. Poleznye svoystva i metody razmnozheniya kedra sibirskogo : Monografiya / M-vo obrazovaniya Ros. Federacii. Sib. gos. tekhnol. un-t. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003 (RIO SibGTU). 154 s.

13. Izmenchivost' pokazatelej 10-letnej sosny kedrovoj sibirskoj na uchebno-nauchnom ob'ekte "LEP-2" / R. N. Matveeva, A. G. Kichkil'deev, Yu. E. Shcherba [et al.] // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rastenij. 2016. T. XIX, № 1. S. 51–53.

14. Vliyanie geograficheskogo proiskhozhdeniya na rost sosny kedrovoj sibirskoj vo vtorom pokolenii / R. N. Matveeva, O. F. Butorova, Yu. E. Shcherba [et al.] // Hvojnye boreal'noj zony. 2019. T. 37, № 6. S. 426–431.

15. Matveeva R. N., Butorova O. F. Issledovaniya po vyrashchivaniyu sosny kedrovoj sibirskoj za mnogoletnij period // Hvojnye boreal'noj zony. 2022. T. 40, № 5. S. 374–380.

16. Parkina O. V., Tret'yakova R. A., Galeckaya G. A. Dinamika semenosheniya sosny kedrovoj sibirskoj (pinus sibirica) v usloviyah Novosibirskoj oblasti // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2020. T. 24, № 6. S. 44–50.

17. Popov A. V. Vliyanie pogodnyh faktorov na zalozenie makrostrombilov sosny kedrovoj sibirskoj pinus sibirica du tour (pinaceae lindl.) // Problemy botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii. 2023. № 22-1. S. 270–273.

18. Titov E. V. Plantacionnoe vyrashchivanie kedrov-nyh sosen // ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po special'nosti "Lesnoe hoz-vo" napravleniya "Lesnoe hoz-vo i landschaft. str-vo". Voronezh : Voronezh. gos. lesotekhn. akad., 2004 (Tip. CNTI). 165 s.

19. Titov E. V. Orekhoproductivnye kedrovye plantacii i lesosady: monografiya / M-vo nauki i vysshego obrazovaniya RF, FGBOU VO "VGLTU". Voronezh, 2021. 267 s.

20. Vosproizvodstvo sosny kedrovoj sibirskoj na genetiko-selekcionnoj osnove / Yu. E. Shcherba, A. A. Ibe, T. V. Suhij, D. E. Kopchenko // Hvojnye boreal'noj zony. 2021. T. 39, № 5. S. 401–407.

© Матвеева Р. Н., Комаров И. В.,
Гришлова М. В., 2025

Поступила в редакцию 17.02.2025
Принята к печати 25.04.2025

**РЕПРОДУКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ ПОЛУСИБОВ 38-ЛЕТНЕГО ВОЗРАСТА
СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ В ДЕНДРАРИИ СИБГУ ИМ. М. Ф. РЕШЕТНЕВА ***

Р. Н. Матвеева, О. Ф. Буторова, Н. А. Шенмайер¹, А. С. Коростелев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ¹schenmaier@yandex.ru

Аннотация. Приведены данные о репродуктивном развитии деревьев сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) 38-летнего биологического возраста, являющихся семенным потомством (полусибами) плюсовых деревьев, аттестованных в Колыванском лесхозе Новосибирской области и в Слюдянском лесхозе Иркутской области. Полусибы произрастают в дендрарии СибГУ на участке «Продолжение геошколы». Цель исследования – установить изменчивость семеношения деревьев сосны кедровой сибирской и выделить экземпляры, отличающиеся повышенной репродуктивной способностью в 2024 г. У деревьев определяли количество шишек, макро- и микростробилов. Установлено, что в зависимости от принадлежности к потомству плюсовых деревьев проявляется их изменчивость по образованию макро-и микростробилов, шишек. По 21–40 шт. шишек образовалось у 16 % деревьев, 51–60 шт. – у 3 %. Выделены экземпляры, отличающиеся большим количеством шишек и высокой пыльцевой продуктивностью, которые рекомендованы для дальнейшего вегетативного размножения и создания урожайных лесосеменных плантаций.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, макростробилы, микростробилы, шишки, потомство плюсовых деревьев.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 40–45

**REPRODUCTIVE DEVELOPMENT OF 38-YEAR-OLD SIBERIAN
CEDAR PINE SEMIS IN THE ARBORETUM OF RESHETNEV UNIVERSITY****

R. N. Matveeva, O. F. Butorova, N. A. Shenmayer*, A. S. Korostelev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: ¹schenmaier@yandex.ru

Annotation. The data on the reproductive development of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) trees of 38-year-old biological age, which are seed progeny (semi-sibs) of plus trees certified in the Kolyvansky forestry of Novosibirsk Oblast and in the Slyudyansky forestry of the Irkutsk Oblast, are presented. Semi-sibs are planted in the arboretum of Siberian State University on the site “Geoschool continuation”. The aim of the study was to establish the variability of seed bearing for Siberian pine trees and to identify specimens with increased reproductive capacity in 2024. The number of cones, macro- and microstrobiles in trees was determined. It has been established that depending on the progeny of plus trees, their variability in the formation of macro- and microstrobiles, cones is manifested. 21–40 cones were formed in 16 % of trees, 51–60 were formed in 3 %. Specimens with a large number of cones and high pollen productivity have been identified, which are recommended for further vegetative reproduction and the creation of productive forest seed plantations.

Keywords: siberian cedar pine, macrostrobiles, microstrobiles, cones, offspring of plus trees.

* Исследование выполнено в рамках государственного задания № FEFE-2024-0013 по заказу Министерства науки и высшего образования РФ коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» по теме «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)».

** The study was carried out by the staff of the scientific laboratory “Breeding of woody plants” within the framework of the state assignment No. FEFE-2024-0013 commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic “Breeding and genetic foundations for the formation of target plantations and the rational use of wood resources in Krasnoyarsk Krai (Yenisei Siberia)”.

ВВЕДЕНИЕ

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) является ценной орехопродуктивной древесной породой, отличающейся образованием семян, содержащих комплекс полезных веществ: жиров, белков, углеводов, аминокислот, макро- и микроэлементов и др. [1; 3; 4; 7; 8; 14].

Перспективность создания лесосеменных плантаций с использованием полусибов и рамет плюсовых деревьев хвойных пород отмечали М. М. Котов [5], А. П. Царев, Н. В. Лаур [12], А. А. Белоусова и др. [2].

М. М. Котов [5] подчеркивал высокий уровень изменчивости показателей на лесосеменных плантациях, созданных полусибами плюсовых деревьев.

Е. В. Титовым [9; 10] проведены исследования по изучению полиморфизма признаков урожайности в различных высотно-поясных 60–180-летних популяциях кедровников Северо-Восточного Алтая. Была отмечена очень высокая индивидуальная изменчивость количества шишек на дереве. Выделены три категории деревьев по динамике урожайности: высокоурожайные (со стабильным семеношением), среднеурожайные (с нерегулярным семеношением) и низкоурожайные (с редкими урожаями).

При изучении изменчивости урожайности сосны кедровой сибирской в разных высотных условиях произрастания Г. В. Кузнецовой [6] установлена неравномерность и высокое варьирование урожайности по годам наблюдений. Достоверно влияют на урожайность как год исследований, так и индивидуальная изменчивость деревьев. В работе R. S. Khamitov et al. [13] проведена оценка уровня индивидуальной изменчивости сосны кедровой сибирской по урожайности с учетом ее изменчивости по годам наблюдения.

Выявлено значительное влияние на урожайность года образования шишек.

На индивидуальную изменчивость, по данным Р. С. Хамитова, С. А. Баранова [11], приходится 37 % от общей вариации урожайности. Коэффициент корреляции подтверждает наличие умеренной зависимости количества шишек от индивидуальной изменчивости и от года урожая.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования является сосна кедровая сибирская 38-летнего биологического возраста, произрастающая в отделении «Продолжение геошколы» дендрария СибГУ. При создании участка использовали посадочный материал, выращенный из шишек, собранных с плюсовых деревьев, аттестованных по семенной и стволовой продуктивности в Колыванском лесхозе Новосибирской области и Слюдянском лесхозе Иркутской области. Схема посадки на участке 4×4 м. Оценку репродуктивной способности деревьев проводили в начале июля в период образования микростробилов. У обследованных экземпляров определяли количество шишек, макро- и микростробилов. Выделяли деревья по проценту превышения показателей в сравнении со средними значениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведены данные по семеношению сосны кедровой сибирской – потомство плюсовых деревьев с учетом образования шишек в 2024 г. Количество шишек на дереве варьировало от 1 до 57 шт. Наибольшее их превышение над средним значением на 50–375 % имели отдельные полусибы плюсовых деревьев (табл. 1, 2).

Таблица 1
Количество шишек у 38-летних полусибов плюсовых деревьев

Место произрастания плюсовых деревьев	Номер плюсового дерева	Номер полусиба (ряд, место)	Количество шишек	
			шт.	% к $X_{\text{ср}}$
Полуибы плюсовых деревьев по стволовой продуктивности				
Новосибирская область, Колыванский лесхоз	13/13	80-2	1	11,9
		82-3	14	166,7
	143/107	70-11	10	119,0
		70-13	10	119,0
		72-16	9	107,1
		76-12	3	35,7
Иркутская область, Слюдянский лесхоз	56/20	85-16	3	35,7
	60/24	80-11	8	95,2
		82-7	18	214,3
		87-13	8	95,2
Среднее значение			8,4	100,0
Полусибы плюсовых деревьев по семенной продуктивности				
Новосибирская область, Колыванский лесхоз	83/47	79-11	33	259,8
	98/62	72-11	29	228,3
		73-13	28	220,5
		79-2	1	7,9
		79-8	6	47,2
		80-3	5	39,4
		81-4	3	23,6
		85-22	10	78,7
	99/63	72-12	8	63,0

Окончание табл. 1

Место произрастания плюсовых деревьев	Номер плюсового дерева	Номер полусиба (ряд, место)	Количество шишек	
			шт.	% к $X_{\text{ср}}$
Новосибирская область, Колыванский лесхоз	99/63	72-15	6	44,2
	100/64	80-10	4	31,5
		81-12	1	7,9
		83-1	5	39,4
	102/66	83-8	6	44,2
		83-9	9	70,9
		86-8	3	23,6
	106/70	78-9	5	39,4
		79-6	3	23,6
		80-9	22	173,2
		81-8	22	173,2
		85-19	18	141,7
	110/74	84-15	7	55,1
		86-5	5	39,4
	92/56	74-12	8	63,0
		77-19	57	448,8
		84-9	6	44,2
		86-19	30	236,2
	148/112	79-20	16	126,0
Среднее значение			12,7	100,0

Наибольшее превышение по количеству шишек над средним значением (на 348,8 %) было у полусиба № 77-19 плюсового дерева 92/56. У полусиба № 86-19 плюсового дерева 92/56, у полусиба 79-11 плюсового дерева 83/47, у полусибов 73-13 и 72-11 плюсового дерева 98/62; полусиба 80-9, 81-8 плюсового дерева 106/70; полусиба 82-7 плюсового дерева 60/24 превышение составило 73,2–159,8 %. В 2022 году высокий урожай отмечался также у деревьев № 81-8, 72-11, 73-13, 82-7 (по 22–85 шт. шишек).

Сравнивая количество шишек у полусибов плюсовых деревьев, отобранных по стволовой продуктивности, видно, что их показатель меньше по сравнению с вариантами по семенной продуктивности.

Распределение деревьев по количеству шишек показало, что у большинства деревьев (71 %) сформировалось по 1–10 шт. шишек; у 16 % деревьев – по 21–40 шишек. Три процента деревьев имели по 51–60 шт. (рис. 1).

Отличаются полусибы и по количеству шишек в пучке (табл. 2).

Согласно литературным данным, максимальное количество шишек в пучке у сосны кедровой сибирской начинает проявляться с первых лет семеношения. У 38-летних деревьев этот показатель варьирует

до 4 шт. (полусиб 79-11 плюсового дерева 83/47 и № 77-19 плюсового дерева 92/56).

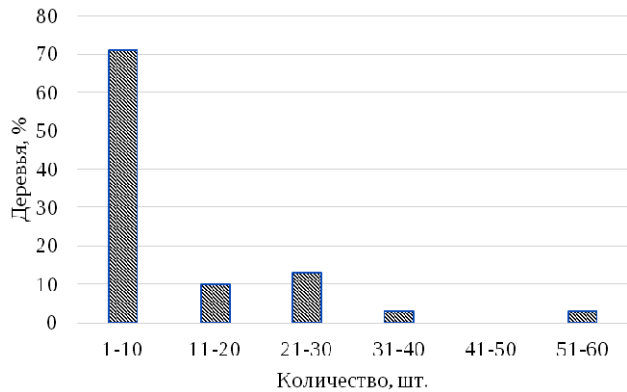


Рис. 1. Распределение деревьев по количеству шишек

На некоторых деревьях в 2024 г. сформировались макростробилы. Их количество на дереве варьировало от 2 до 22 шт. Наибольшее количество макростробилов (15–22 шт.) отмечено у деревьев 77-19, 72-11, 72-15, 79-6, 74-12 (табл. 3).

Таблица 2
Максимальное количество шишек в пучке

Номер плюсового дерева	Номер полусиба	Максимальное количество шишек в пучке		Номер плюсового дерева	Номер полусиба	Максимальное количество шишек в пучке	
		шт.	% к $X_{\text{ср}}$			шт.	% к $X_{\text{ср}}$
13/13	82-3	2	86,9	106-70	79-6	2	86,9
	80-2	1	43,0		78-9	2	86,9
83/47	79-11	4	173,9	110/74	86-5	2	86,9
98/62	85-22	1	43,5		84-15	1	43,5
	81-4	1	43,5	56/20	85-16	1	43,5

Окончание табл. 2

Номер плюсового дерева	Номер полусиба	Максимальное количество шишек в пучке		Номер плюсового дерева	Номер полусиба	Максимальное количество шишек в пучке	
		шт.	% к $X_{\text{ср}}$			шт.	% к $X_{\text{ср}}$
98/62	79-2	2	86,9	60/24	87-13	3	130,4
	80-3	2	86,9		82-7	3	130,4
	79-8	3	130,4		80-11	3	130,4
	73-13	2	86,9	92/56	86-19	3	130,4
	72-11	2	86,9		84-9	2	86,9
100/64	81-12	1	43,5		77-19	4	173,9
	80-10	3	130,4		74-12	3	130,4
102/66	86-8	2	86,9	99/63	72-12	2	86,9
	83-1	2	86,9		72-15	3	130,4
	83-8	3	130,4		70-11	3	130,4
	83-9	2	86,9	143/107	70-13	2	86,9
106/70	85-19	2	86,9		72-16	2	86,9
	81-8	3	130,4		76-12	1	43,5
	80-9	3	130,4	148/112	79-20	3	130,4
Среднее значение						2,3	100,0

Таблица 3
Количество шишек и макростробиллов на дереве

Номер плюсового дерева	Номер полусиба (ряд, место)	Макростробиллы, шт.	Шишки и макростробиллы	
			шт.	% к $X_{\text{ср}}$
13/13	80-2	2	3	12,0
83/47	79-11	2	35	139,4
98/62	80-3	11	16	63,7
	72-11	18	47	187,3
102/66	83-8	5	11	43,8
106/70	80-9	5	27	107,6
	79-6	16	19	75,7
	78-9	10	15	59,8
92/56	77-19	22	79	314,7
	74-12	15	23	91,6
99/63	72-12	9	17	67,7
	72-15	18	24	95,6
143/107	70-11	3	13	51,8
	70-13	12	22	87,6
Средние значения		10,6	25,1	100,0

По образованию макростробиллов изменчивость проявляется: от 7 % (количество макростробиллов 22–24 шт.) до 21 % (2–4 шт.) (рис. 2).

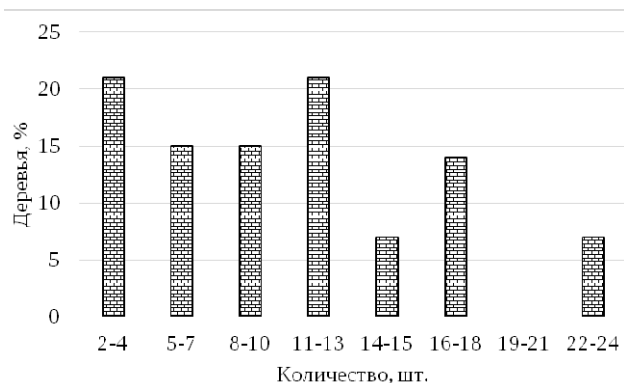


Рис. 2. Распределение деревьев по количеству макростробиллов

Микростробиллы образовались у 48 % экземпляров семенного потомства плюсовых деревьев. Их количество на дереве варьировало от 3 до 1541 шт. (табл. 4).

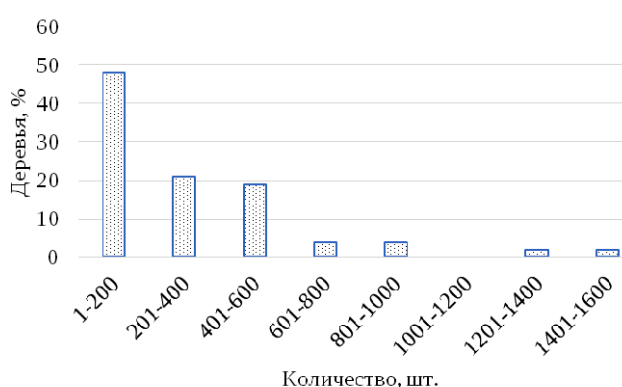


Рис. 3. Распределение деревьев по количеству микростробиллов

Наибольшее количество микростробилов отмечено у деревьев 77-19, 72-11, 73-13, 86-11, 84-12, 85-22, 72-12, 85-19, 86-9.

У большинства деревьев (48 %) образовалось по 1–200 микростробилов; по 201–600 микростробилов было у 40 % деревьев. Интенсивное мужское цветение

наблюдалось у 12 % деревьев (по 601–1600 микростробилов) (см. рис. 3).

Деревья семьи № 77-19 (плюсового дерева 92/56) и семья 72-11 (98/62) имели наибольшее количество шишек (57 и 29 шт., соответственно), макростробилов (22 и 18 шт.) и микростробилов (1541 и 1352 шт.).

Таблица 4
Образование микростробилов у семенного потомства плюсовых деревьев

Номер плюсового дерева	Номер полусиба (ряд, место)	Количество микростробилов		Номер плюсового дерева	Номер полусиба (ряд, место)	Количество микростробилов	
		шт.	% к X_{cp}			шт.	% к X_{cp}
13/13	82-3	68	21,6	106/70	81-9	44	13,9
83/47	79-11	25	7,9		81-10	3	0,9
98/62	85-22	613	194,6		78-3	364	115,6
	81-4	325	103,2		78-9	137	43,5
	79-4	324	102,9	110/74	86-5	448	142,2
	79-8	120	38,1		85-12	216	68,6
	73-13	882	280,0		84-12	684	217,1
	72-11	1352	429,2	56/20	87-10	64	20,3
100/64	79-10	209	66,3		85-16	28	8,9
	81-13	6	1,9	60/24	87-13	136	43,2
102/66	86-9	533	169,2		82-7	338	107,3
	86-10	59	18,7		82-8	94	29,8
	86-11	806	255,9		80-4	98	31,1
	84-4	189	60,0		80-11	495	157,1
	84-2	403	127,9	92/56	86-19	270	85,7
	83-1	400	126,9		84-9	100	31,7
	83-6	508	161,3		77-19	1541	489,2
	83-7	160	50,8	99/63	72-12	551	174,9
	83-8	59	18,7		72-15	105	33,3
	83-9	230	73,0	143/107	70-13	44	13,9
106/70	84-10	52	16,5		72-16	189	60,0
	84-11	16	5,1		75-11	460	146,0
	85-19	543	172,4		76-12	84	26,7
	81-8	462	146,7	148/112	79-20	279	88,6
Среднее значение						315	100,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в зависимости от принадлежности к потомству плюсовых деревьев проявляется их изменчивость по репродуктивному развитию: образованию макро- и микростробилов, шишек. По 21–40 шт. шишек было у 16 % деревьев, 51–60 шт. – у 3 %. Количество микростробилов варьировало от 3 до 1541 шт. Выделены экземпляры, отличающиеся большим количеством шишек и высокой пыльцевой продуктивностью. Данные экземпляры будут использованы для создания целевых плантаций на повышенную семенную продуктивность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабиц Н. А., Соколов Н. Н., Бахтин А. А. Бесценный дар тайги. Архангельск : АГТУ, 1996. 224 с.

2. Белоусова А. А. Испытание семенного потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной в условиях таежной зоны // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2016. № 1. Режим доступа: [https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-semennogo-](https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-semennogo-potomstva-plyusovyh-dereviev-sosny-obyknovЕННОY-v-usloviyah-taеzhnoy-zony)

[potomstva-plyusovyh-dereviev-sosny-obyknovЕННОY-v-usloviyah-taеzhnoy-zony](https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-semennogo-potomstva-plyusovyh-dereviev-sosny-obyknovЕННОY-v-usloviyah-taеzhnoy-zony) (дата обращения: 03.11.2022).

3. Бех И. А., Кривец С.А., Бисирова Э. М. Кедр – жемчужина Сибири. Томск : Печатная мануфактура, 2009. 50 с.

4. Географическая изменчивость показателей роста и репродуктивного развития сосны кедровой сибирской / Н. П. Братилова, Р. Н. Матвеева, О. Ф. Буторова, М. В. Гришлова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 6(402). С. 9–19. DOI 10.37482/0536-1036-2024-6-9-19. EDN HEDBKX.

5. Котов М. М. Организация лесосеменной базы. М. : Лесн. пром-сть, 1982. 136 с.

6. Кузнецова Г. В. Изменчивость показателей шишек и семян кедра сибирского в популяциях Западного Саяна // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2022. Т. 25. С. 58–60. EDN AFUQVA.

7. Содержание микроэлементов в семенах и хвое сосны кедра сибирского разного географического происхождения / Р. Н. Матвеева, Н. П. Братилова,

С. М. Кубрина, Ю. Е. Щерба // Лесоведение. 2019. № 6. С. 567–572. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41151931>.

8. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Исследования по выращиванию сосны кедровой сибирской за многолетний период // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. XL, № 5. С. 374–380.

9. Титов Е. В. Орехопродуктивные кедровые плантации и лесосады. Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2021. 267 с. ISBN 978-5-7994-0927-2. EDN XQFKDZ.

10. Титов Е. В. Разнокачественность высокогорных гибридов кедров сибирского // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2023. Т. 26. С. 169–173. EDN RJRVYX.

11. Хамитов Р. С., Баранов С. А. Индивидуальная изменчивость урожайности семян сосны кедровой сибирской в условиях интродукции // Хвойные бореальной зоны. 2019. XXXVII, № 6. С. 443–447.

12. Царев А. П., Лаур Н. В. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2009. № 1. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/seleksionno-geneticheskaya-otsenka-plyusovyh-derevievsosny-obyknovennoy-1>.

13. Khamitov R. S. et al. Variability of Siberian stone pine seed yield in introduction plantations in the Vologda region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. Т. 979. № 1. С. 012010. DOI 10.1088/1755-1315/979/1/012010.

14. Velisevich S., Popov A. Evaluation of cone and seed quality of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) for plus-tree selection // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2022. Т. 46. № 5. С. 717–729. URL: <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3037>.

REFERENCES

1. Babich N. A., Sokolov N. N., Bahtin A. A. Bescennyj dar tajgi. Arhangel'sk : AGTU, 1996. 224 s.

2. Belousova A. A. Ispytanie semennogo potomstva plyusovyh derev'ev sosny obyknovennoj v usloviyah taezhnoj zony // Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk. 2016. № 1. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-semennogo-potomstva-plyusovyh-derevievsosny-obyknovennoy-v-usloviyah-taezhnoj-zony> (data obrashcheniya: 03.11.2022).

3. Bekh I. A., Krivec S.A., Bisirova E. M. Kedr – zhemchuzhina Sibiri. Tomsk: Pechatnaya manufaktura, 2009. 50 s.

4. Bratilova N. P., Matveeva R. N., Butorova O. F., Grishlova M. V. Geograficheskaya izmenchivost' pokazatelej

rosta i reproduktivnogo razvitiya sosny kedrovoj sibirskoj // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2024. № 6(402). С. 9–19. DOI 10.37482/0536-1036-2024-6-9-19. EDN HEDBKX.

5. Kotov M. M. Organizaciya lesosemennoj bazy. M. : Lesn. prom-st', 1982. 136 s.

6. Kuznecova G. V. Izmenchivost' pokazatelej shishek i semyan kedra sibirskogo v populyacijah Zapadnogo Sayana // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rastenij. 2022. Т. 25. С. 58–60. EDN AFUQVA.

7. Soderzhanie mikroelementov v semenah i hvoe sosny kedra sibirskogo raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya / R. N. Matveeva, N. P. Bratilova, S. M. Kubrina, Yu. E. Shcherba // Lesovedenie. 2019. № 6. С. 567–572. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41151931>.

8. Matveeva R. N., Butorova O. F. Issledovaniya po vyrashchivaniyu sosny kedrovoj sibirskoj za mnogoletnij period // Hvojnye boreal'noj zony. 2022. Т. XL, № 5. С. 374–380.

9. Titov E. V. Orekhoproductivnye kedrovye plantacii i lesosady. Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G. F. Morozova, 2021. 267 s. ISBN 978-5-7994-0927-2. EDN XQFKDZ.

10. Titov E. V. Raznokachestvennost' vysokogornyh gibridov kedra sibirskogo // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rastenij. 2023. Т. 26. С. 169–173. EDN RJRVYX.

11. Hamitov R. S., Baranov S. A. Individual'naya izmenchivost' urozhajnosti semyan sosny kedrovoj sibirskoj v usloviyah introdukcii // Hvojnye boreal'noj zony. 2019. HHHVII, № 6. С. 443–447.

12. Carev A. P., Laur N. V. Selekcionno-geneticheskaya ocenka plyusovyh derev'ev sosny obyknovennoj // Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik. 2009. № 1. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/seleksionno-geneticheskaya-otsenka-plyusovyh-derevievsosny-obyknovennoy-1>.

13. Khamitov R. S. et al. Variability of Siberian stone pine seed yield in introduction plantations in the Vologda region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2022. Т. 979. № 1. С. 012010. DOI 10.1088/1755-1315/979/1/012010.

14. Velisevich S., Popov A. Evaluation of cone and seed quality of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) for plus-tree selection // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2022. Т. 46, № 5. С. 717–729. URL: <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3037>.

© Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Шенмайер Н. А., Коростелев А. С., 2025

**АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИОМАССЫ И МОРФОЛОГИИ ДЕРЕВЬЕВ
КЕДРА СИБИРСКОГО НА УРАЛЕ И ПРОБЛЕМА МУЛЬТИКОЛЛИНЕАРНОСТИ ФАКТОРОВ***

В. А. Усольцев^{1,2*}, Г. Г. Терехов³

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

²Уральский государственный экономический университет
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/ Народной Воли, 62/45

³Ботанический сад УрО РАН
Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а
E-mail: *Usoltsev50@mail.ru

^{1,2}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

³terekhov_g_g@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Аннотация. Необходимость в корректных аллометрических моделях обусловлена растущей потребностью в информации о биомассе лесов для осуществления политики в области изменения климата и оценки углерод депонирующей способности лесов. Поскольку в литературных источниках предлагаются аллометрические модели биомассы с разным количеством прогностических переменных, причем без учета мультиколлинеарности последних, впервые выполнен анализ трех- и двухфакторных моделей на предмет мультиколлинеарности. С этой целью для лесов Урала авторами получены фактические данные о структуре надземной биомассы и морфологии кедра сибирского (сосны кедровой сибирской) в количестве 77 модельных деревьев. Установлено, что имеющаяся на сегодня база данных о биомассе деревьев кедра сибирского не дает возможности построить корректные многофакторные модели по условию мультиколлинеарности. Предложена система простых (однофакторных) аллометрических моделей продукционных и морфологических показателей кедра сибирского, адекватных на уровне вероятности $p < 0,05$ и выше. Модели продукционных показателей могут быть использованы для оценки биопродуктивности кедровников на единице площади в возрастной динамике и при моделировании их углерод депонирующей способности. Модели морфологических показателей могут быть применены при анализе морфоструктуры древесного полога кедровников, в том числе, с применением методов глубокого обучения. По имеющимся литературным данным для молодых посадок кедра выявлена специфика отношения биомассы корней к надземной в возрастной динамике. Это соотношение снижается с 0,43 до 0,17 в возрастном диапазоне от 4 лет до 21 года.

Ключевые слова: *Pinus sibirica* Du Tour, уральский регион, аллометрические модели, показатели биомассы и морфологии деревьев, мультиколлинеарность факторов.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 46–54

**ALLOMETRIC MODELS OF BIOMASS AND MORPHOLOGY OF *PINUS SIBIRICA* DU TOUR
TREES IN THE URALS AND THE PROBLEM OF MULTICOLLINEARITY OF FACTORS****

V. A. Usoltsev^{1,2}, G. G. Terekhov³

¹Ural State Forest Engineering University,
37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Ural State University of Economics
62/45, 8 Marta/ Narodnaya Volya str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

³Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
202a, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation
E-mail: *Usoltsev50@mail.ru

^{1,2}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

³terekhov_g_g@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

* Работа выполнена согласно тематике научных исследований Уральского государственного экономического университета.

** The work was carried out according to the research programme of the Ural State University of Economics.

Annotation. *The use of correct allometric models is driven by the growing need for information on forest biomass to implement climate change policies and assess the carbon deposition capacity of forests. Since allometric models of biomass with a different number of predictive variables are proposed in the literature, and without taking into account the multicollinearity of the latter, an analysis of three- and two-factor models for the presence of multicollinearity was performed for the first time. For this purpose, the authors obtained actual data on the structure of aboveground biomass and morphology of Siberian cedar (*Pinus sibirica* Du Tour) for the forests of the Urals in the amount of 77 model trees. It has been established that the currently available database on the biomass of Siberian cedar trees does not make it possible to build correct multifactorial models under the condition of multicollinearity. A system of simple (one-factor) allometric models of the production and morphological parameters of Siberian cedar, adequate at a probability level of $p < 0.05$ and higher, is proposed. Models of production indicators can be used to assess the biological productivity of cedar forests per unit area in age dynamics and in modeling their carbon deposition capacity. Models of morphological indicators can be used in the analysis of the morphological structure of the canopy of cedar forests, including using deep learning methods. When using the available literature data, the specificity of the ratio of root biomass to aboveground biomass (R:S ratio) in age dynamics has been revealed for young cedar plantations. This ratio decreases from 0.43 to 0.17 in the age range from 4 to 21 years.*

Keywords: *Pinus sibirica* Du Tour, Ural region, allometric models, indicators of biomass and morphology of trees, multicollinearity of factors.

ВВЕДЕНИЕ

Точная оценка лесной биомассы имеет решающее значение в лесной экологии и при оценках глобального углеродного цикла [30]. Аллометрические модели являются наиболее часто используемым инструментом для оценки биомассы деревьев по их относительно легко измеряемым показателям высоты и диаметра ствола. Необходимость в точных аллометрических моделях обусловлена растущей потребностью в информации о биомассе лесов для осуществления политики в области изменения климата, что требует надежных оценок содержания углерода в лесных экосистемах [32; 38; 54]. Настоятельно требуется оценка надземной биомассы с точностью, позволяющей моделировать увеличение или уменьшение количества углерода, накопленного в лесу, за относительно короткие периоды времени [28]. Многие модели разработаны для отдельных видов деревьев с разными уровнями неопределенности [36; 44; 52; 53]. Также предпринимались различные попытки разработать всеобщие модели, применимые для многих видов, с использованием мета-анализа опубликованных уравнений для создания оперативной базы данных [33; 45; 58]. Эти модели могут быть адекватны для оценки биомассы в национальном или региональном масштабе, но могут вызвать смещения оценок биомассы деревьев в конкретном районе [51]. В последние годы формируются глобальные базы данных по аллометрическим моделям с целью решения экологических проблем мирового уровня [35; 39].

Исследование формы ствола традиционно является предметом лесной таксации [5]. Анализ формы кроны не представлял практического интереса, но с развитием методов лазерного зондирования [21] появилась необходимость в исследовании аллометрии кроны и морфологии деревьев, в том числе, для выявления оптимального пространства их роста. В целом, аллометрия кроны отдельного дерева определяет структуру и динамику всего древостоя [25; 47; 48; 49]. Современные нейро-символические модели, сочетающие глубокое обучение и символическую аргументацию, дают возможность корректного дистанционного определения не только морфоструктуры кроны деревьев, но и дистанционной классификации древес-

ных видов с помощью объектно-ориентированного программирования и алгоритмов настройки гиперпараметров [37].

Многофакторный анализ является наиболее распространенным подходом при изучении взаимосвязей между продукционными и легко измеряемыми таксационными показателями. При оценке биомассы дерева наиболее часто используются три структуры аллометрической модели: (1) 3-факторная, включающая в качестве прогностических переменных диаметр ствола, высоту и возраст дерева [12; 13; 19], (2) 2-факторная, включающая диаметр ствола и высоту дерева [15; 24; 50] и (3) простая аллометрическая, включающая только диаметр ствола [6; 11; 41]. Упомянутые прогностические переменные в литературе обычно называются независимыми, но фактически вследствие мультиколлинеарности они таковыми не являются. Известно, что усложнение модели путем включения в нее нескольких прогностических переменных обеспечивает, с одной стороны, меньшую вероятность смещений, вызванных игнорированием той или иной массобразующей (прогностической) переменной, а с другой стороны, – большую вероятность смещений, вызванных малым числом наблюдений или/и нарушением принципов планирования пассивного эксперимента [9; 43] и, как следствие, наличием некорректно структурированной матрицы исходных данных [14; 17].

Одним из условий корректности многофакторных моделей является наличие ортогональности определяющих факторов, однако в чистом виде это условие соблюдения невозможно, поскольку природа ортогональность игнорирует, и в ней все факторы взаимосвязаны, т. е. имеет место их мультиколлинеарность. Эффективность многофакторного анализа в значительной степени зависит от структуры корреляции между прогностическими переменными. Когда коварианты в модели не являются независимыми друг от друга, при анализе возникают проблемы мультиколлинеарности, что приводит к не адекватным оценкам. Обычно имеет место мультиколлинеарность структурная или мультиколлинеарность базы данных. Структурная мультиколлинеарность представляет математический артефакт, вызванный введением в модель новых переменных. Это или полиномы n -го

порядка, или синергизмы, представляющие совместный эффект 2–3 исходных переменных (полученные, например, путем их умножения, деления и т. п.). В частности, было установлено, что включение в модель подобных синергизмов повысило ее коэффициент детерминации, однако не было показано наличие или отсутствие их мультиколлинеарности [8].

С другой стороны, мультиколлинеарность, как уже упоминалось, может быть следствием плохо спланированного эксперимента и наличием плохо структурированной матрицы данных. Она является наиболее проблематичной, и, к сожалению, обременяет наши исследования наиболее часто и наиболее серьезно. Мультиколлинеарность вызывает неустойчивость оценок параметров модели, и, следовательно, приводит к недостаточной статистической значимости отдельных прогностических переменных, даже если модель в целом может быть значимой [46]. Она может привести к значительным стандартным ошибкам и ложному утверждению о статистической значимости результата [34]. В частности, было установлено, что изменчивость возраста хвойных деревьев определяется их высотой на 45–55 %, а включение диаметра кроны в качестве второй прогностической переменной оставило объясненную изменчивость возраста на том же уровне (44–54 %). Тем не менее, 2-факторная модель не была отвергнута как некорректная, а мультиколлинеарность переменных не оценивалась [40].

Известно имитационное исследование с использованием различных сценариев с разными структурами коллинеарности с целью оценить влияние коллинеарности при различных структурах корреляции между прогностическими переменными и сравнить эти результаты с существующими рекомендациями для учета нежелательной коллинеарности [57]. Рассмотрены три сценария корреляции между прогностическими переменными: (1) двумерная коллинеарная структура как наиболее простой случай, (2) многомерная коллинеарная структура, в которой прогностическая переменная коррелирует с остальными ковариантами, (3) более реалистичный сценарий, когда прогностические переменные могут быть выражены различными функциями [57].

Один из методов снижения отрицательного эффекта мультиколлинеарности основан на исключении прогностических переменных, коэффициенты корреляции которых превышают 0,95, посредством соответствующих статистических тестов по восьми критериям отбора [24]. Другой подход к снижению эффекта мультиколлинеарности основан на использовании критерия Шепли (Shapley values), первоначально предназначенного для оценки вклада прогностических переменных в объяснение изменчивости зависимой переменной, но при условии отсутствия взаимной корреляции прогностических переменных. Поскольку переменные коррелируют, была введена математически обоснованная корректировка коррелирующих переменных, в результате чего значение критерия Шепли становится независимым от существующих между ними корреляций. Более того, корректировка корреляций для одного объекта была расширена на несколько объектов в той же комбинации переменных [27].

Во множественной регрессии мерой мультиколлинеарности между прогностическими переменными служит коэффициент инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF) или тесно связанный с ним индекс толерантности (TI).

VIF и TI связаны с коэффициентом детерминации R^2 согласно соотношениям:

$$VIF_i = 1/(1 - R_i^2), \quad (1)$$

$$TI_i = 1 - R_i^2, \quad (2)$$

где R_i – коэффициент множественной корреляции между i -й переменной и остальными переменными. VIF и TI отражают оценки степени взаимосвязи одной прогностической переменной с остальными в регрессионной модели [43].

При полной ортогональности факторов $VIF = 0$. При $1 < VIF < 5$ корреляцию факторов (прогностических переменных) считают умеренной и допустимой, а при $5 < VIF < 10$ и $VIF > 10$ корреляция факторов считается соответственно сильной и высокой, что в многофакторных моделях с точки зрения их корректности и устойчивости недопустимо [10].

Исторически сложилось так, что по количеству фактических данных о биомассе и морфологии двух видов сосен – обыкновенной и кедровой сибирской (кедром сибирским) – в существующей базе данных [16] имеется 25-кратное расхождение (4225 против 167 модельных деревьев). Основное внимание исследователи уделяли сосне обыкновенной и фактически игнорировали кедр сибирский, хотя последний ценен еще и как «хлебное» дерево [1]. Поэтому информация о биомассе и морфологии кедров сибирского, приоритетного по потребительской стоимости и экологической значимости вида [2; 3; 7; 23], представляет первоочередной интерес.

Цель настоящего исследования – по фактическим данным авторов, полученным на пробных площадях Среднего Урала, разработать аллометрические модели биомассы и морфологии деревьев кедров сибирского с учетом мультиколлинеарности факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Специфика лесного фонда по кедровникам Урала (а, возможно, и Сибири) состоит в том, что кедр в молодом возрасте представлен культурами, а в приспевающем и спелом возрастах абсолютно преобладают естественные древостои. Естественные кедровые молодняки на Урале встречаются иногда лишь в нагорном типе леса и представлены рединами, по производительности не выше IV–V классов бонитета (устное сообщение канд. биол. наук Н. В. Танцырева). Соответственно наши исходные данные представлены модельными деревьями: в культурах в возрасте от 15 до 46 лет (60 деревьев) и в естественных древостоях – в возрасте от 40 до 165 лет (17 деревьев) (табл. 1). Диапазон густот – от 3660 до 950 деревьев на 1 га, соответственно в культурах и естественных древостоях. Шишки на модельных деревьях не были учтены ввиду их отсутствия – в культурах по причине молодого возраста, а в спелых древостоях по причине неурожайного года.

Таблица 1

Диапазоны фактических данных о биомассе и морфологии деревьев**

№	Показатель	Диапазон		№	Показатель	Диапазон	
		от	до			от	до
1	P_s , кг	0,11	283,0	9	A , лет	4***	165
2	P_{bark} , кг	0,04	26,4	10	D , см	1,0	29,2
3	P_{br} , кг	0,09	41,2	11	H , м	1,4	24,0
4	P_f , кг	0,03	21,2	12	D_{cr} , м	0,8	3,4
5	P_{q2} , кг	0,42	333,6	13	L_{cr} , м	0,7	14,1
6	P_r , кг	0,0009	0,45	14	ρ_{wood}	233	644
7	V_r , дм ³	0,67	741,3	15	ρ_{bark}	238	1093
8	V_{bark} , дм ³	0,10	88,5	—	—	—	—

* Данные получены для Вологодской области и Красноярского края [4; 22];

** $P_s, P_{bark}, P_{br}, P_f, P_a, P_r$ – соответственно биомасса ствола в коре, коры ствола, ветвей, хвои, надземная, корней в абсолютно сухом состоянии, кг; V_r и V_{bark} – соответственно объем ствола в коре и коры ствола, дм³; A – возраст дерева, лет, D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; D_{cr} – диаметр кроны, м; L_{cr} – длина кроны, м; ρ_{wood} и ρ_{bark} – соответственно базисная плотность древесины в коре и коры ствола, кг/м³.

*** Показан возраст саженцев кедра сибирского для Костромской области [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом изложенного, мы провели сравнительный анализ моделей следующих структур:

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln H + a_3 \ln A, \quad (3)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln H, \quad (4)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln A, \quad (5)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln H, \quad (6)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln D, \quad (7)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln A, \quad (8)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln H, \quad (9)$$

где Y – один из продукционных или морфологических показателей табл. 1. Наряду с моделью (4) очень часто используется зависимость биомассы дерева от так называемого «видового цилиндра» D^2H , показывающая обычно связь, близкую к функциональной, но только по отношению к массе и объему ствола [29; 55; 56]. В отношении биомассы кроны было неоднократно показано, что подобная комбинированная переменная объясняет изменчивость биомассы кроны даже в меньшей степени, чем только диаметр ствола. Причина в том, что при фиксированном диаметре связь биомассы кроны с высотой дерева отрицательная, а в комбинированной переменной она «принудительно» предполагается быть положительной [12; 13; 20; 31; 42]. По этой причине модели с названной комбинированной переменной здесь не рассматриваются. В моделях (3)–(9) не предусмотрено участие густоты древостоя в качестве одной из прогностических переменных по причине, изложенной ранее [18].

Сравнительный анализ моделей (3)–(6) выполнен на предмет мультиколлинеарности прогностических переменных, используя программное обеспечение Python (<https://www.reneshbedre.com/blog/variance-inflation-factor.html>). На первом этапе анализа мы получили следующий результат (табл. 2):

Оказалось, что наименее коррелирован с диаметром и высотой дерева его возраст, тем не менее, зна-

чение VIF, равное 27,8, а также остальные два (115,0 и 145,9), свидетельствуют о высокой взаимной корреляции трех прогностических переменных, и модель (3) нельзя считать корректной при использовании имеющихся исходных данных.

Таблица 2

Показатели VIF для прогностических переменных модели (3)

Прогностическая переменная	$\ln A$	$\ln D$	$\ln H$
VIF	27,8	115,0	145,9

На втором этапе анализа выполнен перебор трех вариантов 2-факторной модели (4), (5) и (6) (табл. 3).

Таблица 3

Показатели VIF для прогностических переменных моделей (4), (5) и (6)

Номер модели	(4)		(5)		(6)	
Прогностическая переменная	$\ln D$	$\ln H$	$\ln D$	$\ln A$	$\ln A$	$\ln H$
VIF	114,8	21,9	27,8	114,8	21,9	27,8

Оказалось, что наиболее сильная взаимная корреляция имеется между диаметром ствола и высотой дерева, менее выраженная – между диаметром ствола и возрастом, а также – между высотой дерева и его возрастом, но во всех случаях высокий уровень мультиколлинеарности не позволяет рассматривать модели (4), (5) и (6) в качестве адекватных для оценки продукционных показателей деревьев кедров сибирского.

Таким образом, мы приходим к выводу, что наши фактические данные о биопродуктивности и морфологии деревьев кедров сибирского не позволяют построить на их основе статистически адекватные многофакторные модели. Казалось бы, охвачен широкий возрастной диапазон от 4 до 165 лет, диапазон диаметра ствола от 1 до 29 см и диапазон высоты деревьев от 1,4 до 24 м, но все эти переменные в названных диапазонах оказались тесно коррелированы. Для построения 3-факторной модели продукционных и мор-

фологических показателей необходима корректно структурированная матрица исходных данных: для каждой градации возраста должны быть представлены фактические значения продукционных и морфологических показателей в максимально возможном диапазоне диаметра ствола, а для каждого сочетания возраста и диаметра ствола дерева должны быть представлены фактические значения названных показателей в максимально возможном диапазоне высоты деревьев. В подобной матрице данных мультиколлинеарность исключается, но ее формирование – дело отдаленного будущего.

Исходя из результатов двух этапов выполненного анализа мультиколлинеарности, всё, что можно получить сегодня по имеющейся базе данных по кедров сибирскому – рассчитать простые (однофакторные) аллометрические модели. На этом третьем этапе предстоит выяснить, какая прогностическая перемен-

ная из трех анализируемых будет объяснять наибольшую долю варьирования того или иного продукционного или морфометрического показателя. Для этой цели выполнен расчет моделей (7), (8) и (9), и его результаты представлены в табл. 4.

Варианты моделей с наибольшими значениями коэффициента детерминации сведены в табл. 5. Все модели значимы на уровне вероятности $p < 0,05$ и выше. Во всех моделях для продукционных показателей наиболее информативен диаметр ствола. В моделях для базисной плотности коры наиболее информативен возраст дерева (модель 8), но поскольку его значение не всегда доступно, для данного показателя продублирована модель (7), объясняющая несколько меньшую изменчивость плотности ($\text{adj}R^2$ равен 0,481 против 0,690). Аналогичное дублирование по моделям (8) и (9) было применено к морфологическим показателям (L_{cr}/H) и (D_{cr}/H).

Таблица 4
Значения коэффициентов детерминации моделей (7), (8) и (9)*

Зависимая переменная	Номер модели и прогностическая переменная			Зависимая переменная	Номер модели и прогностическая переменная		
	(7)	(8)	(9)		(7)	(8)	(9)
	$\ln D$	$\ln A$	$\ln H$		$\ln D$	$\ln A$	$\ln H$
Для продукционных показателей				Для морфологических показателей			
$\ln P_s$	0,980	0,712	0,948	$\ln D_{cr}$	0,620	0,079	0,464
$\ln P_{bark}$	0,974	0,683	0,934	$\ln L_{cr}$	0,886	0,525	0,878
$\ln P_{br}$	0,904	0,421	0,791	$\ln(D_{cr}/D)$	0,680	0,466	0,642
$\ln P_f$	0,868	0,379	0,693	$\ln(L_{cr}/D_{cr})$	0,274	0,260	0,368
$\ln P_a$	0,987	0,632	0,913	$\ln(L_{cr}/H)$	0,330	0,623	0,490
$\ln V_t$	0,986	0,710	0,955	$\ln(D_{cr}/H)$	0,329	0,715	0,552
$\ln V_{bark}$	0,955	0,782	0,938	–	–	–	–
$\ln \rho_{wood}$	0,319	0,092	0,260	–	–	–	–
$\ln \rho_{bark}$	0,481	0,690	0,509	–	–	–	–

* Обозначения переменных см. табл. 1. Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициента детерминации.

Таблица 5
Характеристика моделей (7), (8) и (9)

Номер модели	Зависимая переменная	Константы модели		$\text{adj}R^{2**}$	SE***
		a_0^*	a_1		
(7)	$\ln P_s$	–3,5250	2,6680	0,980	0,248
	$\ln P_{bark}$	–4,6110	2,3037	0,974	0,244
	$\ln P_{br}$	–3,3844	2,0993	0,904	0,439
	$\ln P_f$	–3,3131	1,8445	0,868	0,470
	$\ln P_a$	–2,4881	2,4289	0,987	0,185
	$\ln V_t$	–2,7351	2,7524	0,986	0,207
	$\ln V_{bark}$	–4,9709	2,6921	0,955	0,376
	$\ln \rho_{wood}$	6,1618	–0,1047	0,319	0,106
(8)	$\ln \rho_{bark}$	7,3715	–0,3967	0,481	0,272
	$\ln \rho_{bark}$	8,2758	–0,5053	0,690	0,221
(7)	$\ln D_{cr}$	–0,3219	0,4874	0,620	0,203
	$\ln L_{cr}$	0,1780	0,7005	0,886	0,163
	$\ln(D_{cr}/D)$	–0,2502	–0,5489	0,680	0,211
(9)	$\ln(L_{cr}/D_{cr})$	0,4257	0,2855	0,368	0,182
(9)	$\ln(L_{cr}/H)$	0,2226	–0,2688	0,490	0,173
(8)	$\ln(L_{cr}/H)$	0,8136	–0,3238	0,623	0,149
(9)	$\ln(D_{cr}/H)$	–0,1888	–0,5432	0,552	0,240
(8)	$\ln(D_{cr}/H)$	2,0689	–1,0073	0,715	0,192

* свободный член модели скорректирован на логарифмическую трансформацию [26];

** $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных;

*** SE – стандартная ошибка модели.

По биомассе корней кедр сибирского ситуация с фактическими данными еще хуже, чем по надземной: для Урала они отсутствуют, но имеются лишь немногочисленные данные для сеянцев и культур Вологодской области и Красноярского края в количестве 13 определений в возрасте от 4 до 21 года. По упомянутым 13 измерениям биомассы надземных и подземных органов кедр сибирского мы получили зависимость

$$\ln(P_r/P_a) = -0,0483 - 0,5680 \ln A;$$

$$\text{adj}R^2 = 0,839; SE = 0,186. \quad (10)$$

Согласно модели (10) отношение биомассы корней к надземной в посадках кедр сибирского снижается с 0,43 в возрасте 4 года до 0,17 в возрасте 21 год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку в литературных источниках предлагаются аллометрические модели биомассы с разным количеством прогностических переменных, причем без учета мультиколлинеарности последних, впервые выполнен анализ трех- и двухфакторных моделей на предмет мультиколлинеарности и установлено, что имеющаяся на сегодня база данных о биомассе деревьев кедр сибирского не дает возможности построить корректные многофакторные модели по условию мультиколлинеарности.

Предложена система простых (однофакторных) аллометрических моделей продукционных и морфологических показателей кедр сибирского, адекватных на уровне вероятности $p < 0,05$ и выше. Модели продукционных показателей могут быть использованы для оценки биопродуктивности кедровников на пробных площадях в возрастной динамике и при моделировании их углерод депонирующей способности. Модели морфологических показателей могут быть применены при анализе морфоструктуры древесного полога кедровников, в том числе, с применением методов глубокого обучения.

Для молодых посадок кедр выявлена специфика отношения биомассы корней к надземной в возрастной динамике, это соотношение снижается с 0,43 до 0,17 в возрастном диапазоне от 4 лет до 21 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Барышевцев В. Кедровники – плодовые сады // Лесной журнал. 1917. Вып. 1-3. С. 35–55.
2. Братилова Н. П., Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф. Биология и формовое разнообразие сосны кедровой сибирской // Эко-Потенциал. 2014. № 1 (5). С. 120–127.
3. Воробьев В. Н. Биологические основы комплексного использования кедровых лесов / отв. ред. И. В. Семечкин. Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1983. 254 с.
4. Воробьев В. Н., Хамитов Р. С. Влияние состояния филлотаксиса на показатели роста сеянцев кедр сибирского // Вестник Иркутской гос. сельскохозяйств. акад. 2015. Вып. 69. С. 46–52.
5. Гурский А. А. Форма и полнодревесность стволов сосны в искусственных насаждениях ленточных боров Казахстана // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1972. № 11. С. 91–94.

6. Ильюшенко А. Ф. Сезонное развитие листовой поверхности и биологическая продуктивность в березняках // Лесоведение. 1968. № 2. С. 3–13.

7. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Братилова Н. П. Королева тайги. Красноярск : СибГТУ, 2003. 144 с.

8. Мауринь А. М., Лиёпа И. Я., Дрике А. Я. и др. Прогнозирование плодоношения древесных растений // Оптимизация использования и воспроизводства лесов СССР. М. : Наука, 1977. С. 50–53.

9. Налимов В. В. Теория эксперимента. М. : Наука, 1971. 208 с.

10. Репина Е. Г., Цыпин А. П., Зайчикова Н. А., Ширнаева С. Ю. Эконометрика в табличном редакторе MS Excel [Электронный ресурс]: практикум. Самара: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2019. ISBN 978-5-94622-970-8 (https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010271621/).

11. Усольцев В. А. Взаимосвязь некоторых таксационных элементов кроны и ствола у березы пушистой в Северном Казахстане // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1971. № 2. С. 80–84.

12. Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).

13. Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск : Наука, Сибирское отд-ние, 1988. 253 с.

14. Усольцев В. А. О применении регрессионного анализа в лесоводственных задачах // Лесная таксация и лесоустройство. 2004. № 1 (33). С. 49–55.

15. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. 336 с.

16. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии : монография. Электронная база данных. 3-е доп. изд. Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-8295-0861-6 (<https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>).

17. Усольцев В. А., Марковский В. И., Максимов С. В. и др. О планировании пассивного эксперимента при оценке фитомассы лесов // Научные труды. Вып. 2. Екатеринбург : УГЛТУ, 2002. С. 15–22.

18. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Морфология кроны лесобразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование // Хвойные бореальной зоны. 2023б. Т. 41. № 6. С. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.

19. Усольцев В. А., Воробейчик Е. Л., Бергман И. Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург : УГЛТУ, 2012. 365 с.

20. Усольцев В. А., Ковязин В. Ф., Цепордей И. С. и др. Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнич. акад. 2020. Вып. 232. С. 50–78. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.50-78

21. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Модели для оценки биомассы деревьев лесобразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореальной зоны. 2023а. Т. 41. № 4. С. 300–305.
22. Усольцев В. А., Щерба Н. П. Структура фитомассы кедровых сосен в плантационных культурах. Красноярск : Изд-во СибГТУ, 1998. 134 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3377>).
23. Усольцев В. А., Щукин А. В. О географии и экологии кедра сибирского // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск : СибГТУ, 2003. № 1(32). С. 115–119.
24. Abdullah N., Jubok Z. H. Multicollinearity remedial techniques in model-building // Matematika. 2013. Vol. 29. No. 1b. P. 107–115.
25. Bartkowiec L., Paluch J. Morphological plasticity of six tree species with different light demands growing in multi-layered deciduous forests in Central Europe // European Journal of Forest Research. 2023. Vol. 142 (5). P. 1177–1195.
26. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2 (1). P. 49–53.
27. Basu I., Maji S. Multicollinearity correction and combined feature effect in Shapley values // Proceedings AI 2021: Advances in Artificial Intelligence, 34th Australasian Joint Conference, AI 2021, Sydney, NSW, Australia, February 2–4, 2022. P. 1–12. (Lecture Notes in Computer Science. 2022.)
28. Basuki T. M., Van Laake P. E., Skidmore A. K. et al. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests // Forest Ecology and Management. 2009. Vol. 257. P. 1684–1694.
29. Bi H., Turner J., Lambert M. J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia // Trees. 2004. Vol. 18. P. 467–479.
30. Bombelli A., Avitabile V., Beileli Marchesini L. et al. Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables: biomass. Food and Agriculture Organization – Global Terrestrial Observation System, Rome, 2009. 86 p.
31. Bondé L., Ganamé M., Ouédraogo O. et al. Allometric models to estimate foliage biomass of *Tamarindus indica* in Burkina Faso // Southern Forests: a Journal of Forest Science. 2017. Vol. 80. P. 143–150.
32. Brown S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges // Environmental Pollution. 2001. Vol. 116. P. 363–372.
33. Chave J., Andalo C., Brown S. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // Oecologia. 2005. Vol. 145. P. 87–99.
34. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis. New York, NY : Wiley, 2014. 736 p.
35. Falster D., Duursma R., Ishihara M. et al. BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants // Ecology. 2015. Vol. 96(5). P. 1445 (Ecological Archives E096-128).
36. Fehrmann L., Kleinn C. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 236. P. 412–421.
37. Harmon I., Weinstein B., Bohlman S. et al. A neuro-symbolic framework for tree crown delineation and tree species classification // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Article 4365.
38. Joosten R., Schumacher J., Wirth C. et al. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany // Forest Ecology and Management. 2004. Vol. 189. P. 87–96.
39. Jucker T., Fischer F. J., Chave J. et al. Tallo – a global tree allometry and crown architecture database // Global Change Biology. 2022. Vol. 28. P. 5254–5268.
40. Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information // Silva Fennica. 2005. Vol. 39. P. 227–248.
41. Kittredge J. Estimation of amount of foliage of trees and stands // Journal of Forestry. 1944. Vol. 42. No. 11. P. 905–912.
42. Lin K., Lyu M., Jiang M. et al. Improved allometric equations for estimating biomass of the three *Castanopsis carlesii* H. forest types in subtropical China // New Forests. 2017. Vol. 48. P. 115–135.
43. Marcoulides K. M., Raykov T. Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods // Educational and Psychological Measurement. 2019. Vol. 79(5). P. 874–882.
44. Návar J. Biomass component equations for Latin American species and groups of species // Annals of Forest Science. 2009. Vol. 66. P. 208–216.
45. Návar J. Alometría para biomasa en especies arbóreas del noroeste de México // Tropical and Subtropical Agroecosystems. 2010. Vol. 12. P. 507–519.
46. Oke J. A., Akinkunmi W. B., Etebeffia S. O. Use of correlation, tolerance, and variance inflation factor for multicollinearity test // Global Scientific Journals, 2019. Vol. 7(5). P. 652–659.
47. Pretzsch H. The effect of tree crown allometry on community dynamics in mixed-species stands versus monocultures. A review and perspectives for modeling and silvicultural regulation // Forests. 2019. Vol. 10. Article 810.
48. Pretzsch H. Tree growth as affected by stem and crown structure // Trees. 2021. Vol. 35. P. 947–960.
49. Schmucker J., Uhl E., Steckel M. et al. Crown allometry and growing space requirements of four rare domestic tree species compared to oak and beech: implications for adaptive forest management // European Journal of Forest Research. 2022. Vol. 141. P. 587–604.
50. Schumacher F. X., Hall F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume // Journal of Agricultural Research. 1933. Vol. 47. No. 9. P. 719–734.
51. Segura M., Kanninen M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica // Biotropica. 2005. Vol. 37. P. 2–8.
52. Shumie A., Alemu A., Abebe G. et al. Allometric equations for estimation of above- and below-ground biomass of *Acacia mearnsii* in northwestern Ethiopia // Forest Science and Technology. 2024. Vol. 20. No. 3. P. 279–285.
53. Sukhbaatar G., Chimednyam D., Nachin B. et al. Allometric equations for the estimation of above- and below-ground biomass for *Larix sibirica* Ledeb. in Northern Mongolia // Forest Science and Technology. 2023. Vol. 19. P. 12–20.

54. Wirth C., Schumacher J., Schulze E. D. Generic biomass functions for Norway spruce in central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation // *Tree Physiology*. 2003. Vol. 24. P. 121–139.

55. Xiang W., Liu S., Deng X. et al. General allometric equations and biomass allocation of *Pinus massoniana* trees on a regional scale in southern China // *Ecological Research*. 2011. Vol. 26. P. 697–711.

56. Xiang W., Zhou J., Ouyang S. et al. Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China // *European Journal of Forest Research*. 2016. Vol. 135. P. 963–979.

57. Yoo W., Mayberry R., Bae S. et al. A study of effects of multicollinearity in the multivariable analysis // *International Journal of Applied Science and Technology*. 2014. Vol. 4(5). Article 9.

58. Zianis D., Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass // *Forest Ecology and Management*. 2004. Vol. 187. P. 311–332.

REFERENCES

1. Baryshevcev V. Kedrovniki – plodovye sady // *Lesnoj zhurnal*. 1917. Vyp. 1-3. S. 35–55.

2. Bratilova N. P., Matveeva R. N., Butorova O. F. Biologiya i formovoe raznoobrazie sosny kedrovoy sibirskoy // *Eko-Potencial*. 2014. № 1 (5). S. 120–127.

3. Vorob'ev V. N. Biologicheskie osnovy kompleksnogo ispol'zovaniya kedrovyyh lesov / otv. red. I. V. Semechkin. Novosibirsk : Nauka : Sib. otd-nie, 1983. 254 s.

4. Vorob'ev V. N., Hamitov R. S. Vliyaniye sostoyaniya fillotaksisa na pokazateli rosta seyancev kedra sibirskogo // *Vestnik Irkutskoy gosudarstvennoy sel'skohozyajstvennoy akademii*. 2015. Vyp. 69. S. 46–52.

5. Gurskij A. A. Forma i polnodrevesnost' stvolov sosny v iskusstvennyh nasazhdeniyah lentochnyh borov Kazakhstana // *Vestnik sel'skohozyajstvennoy nauki Kazakhstana*. 1972. № 11. S. 91–94.

6. Il'yushenko A. F. Sezonnoe razvitie listovoy poverhnosti i biologicheskaya produktivnost' v bereznyakh // *Lesovedenie*. 1968. № 2. S. 3–13.

7. Matveeva R. N., Butorova O. F., Bratilova N. P. Koroleva tajgi. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 144 s.

8. Maurin' A. M., Liepa I. Ya., Drike A. Ya. i dr. Prognozirovaniye plodonosheniya drevesnyh rasteniy // *Optimizatsiya ispol'zovaniya i vosproizvodstva lesov SSSR*. M. : Nauka, 1977. S. 50–53.

9. Nalimov V. V. Teoriya eksperimenta. M. : Nauka, 1971. 208 s.

10. Repina E. G., Cypin A. P., Zajchikova N. A., Shirmaeva S. Yu. Ekonometrika v tablichnom redaktore MS Excel [Elektronnyj resurs] : praktikum. Samara : Izd-vo Samar. gos. ekon. un-ta, 2019. ISBN 978-5-94622-970-8. (https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010271621/).

11. Usol'cev V. A. Vzaimosvyaz' nekotoryh taksacionnyh elementov krony i stvola u berezy pushistoy v Severnom Kazakhstane // *Vestnik sel'skohozyajstvennoy nauki Kazakhstana*. 1971. № 2. S. 80–84.

12. Usol'cev V. A. Modelirovaniye struktury i dinamiki fitomassy drevostoev. Krasnoyarsk : Izd-vo Krasnoyarskogo un-ta, 1985. 191 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).

13. Usol'cev V. A. Rost i struktura fitomassy drevostoev. Novosibirsk : Nauka, Sibirskoe otd-nie, 1988. 253 s.

14. Usol'cev V. A. O primenenii regressionnogo analiza v lesovodstvennyh zadachah // *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo*. 2004. № 1 (33). S. 49–55.

15. Usol'cev V. A. Fitomassa model'nyh derev'ev lesoobrazuyushchih porod Evrazii : baza dannyh, klimaticheskii obuslovlennaya geografiya, taksacionnye normativy. Ekaterinburg : Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet, 2016. 336 s.

16. Usol'cev V. A. Fitomassa model'nyh derev'ev dlya distancionnoj i nazemnoj taksatsii lesov Evrazii : Monografiya. Elektronnyaya baza dannyh. 3-e dopolnennoe izdanie. Ekaterinburg : Botanicheskij sad UrO RAN, Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet, 2023. 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). ISBN 978-5-8295-0861-6 (<https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>).

17. Usol'cev V. A., Markovskij V. I., Maksimov S. V. i dr. O planirovanii passivnogo eksperimenta pri ocenke fitomassy lesov // *Nauchnye trudy. Vyp. 2*. Ekaterinburg : UGLTU, 2002. S. 15–22.

18. Usol'cev V. A., Cepordej I. S. Morfologiya krony lesoobrazuyushchih rodov Evrazii: allometriya i ranzhirovaniye // *Hvojnye boreal'noj zony*. 2023b. T. 41, № 6. S. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.

19. Usol'cev V. A., Vorobejchik E. L., Bergman I. E. Biologicheskaya produktivnost' lesov Urala v usloviyah tekhnogenogo zagryazneniya: Issledovanie sistemy svyazej i zakonomernostej. Ekaterinburg : UGLTU, 2012. 365 s.

20. Usol'cev V. A., Kovyazin V. F., Cepordej I. S. i dr. Biomassa assimilyacionnogo apparata lesov Evrazii: korrekciya metodov empiricheskogo modelirovaniya // *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2020. Vyp. 232. S. 50–78. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.50-78

21. Usol'cev V. A., Cepordej I. S., Chasovskih V. P. Modeli dlya ocenki biomassy derev'ev lesoobrazuyu-shchih vidov po diametru krony v svyazi s ispol'zovaniem dronov // *Hvojnye boreal'noj zony*. 2023a. T. 41. № 4. S. 300–305.

22. Usol'cev V. A., Shcherba N. P. Struktura fitomassy kedrovyyh sosen v plantacionnyh kul'turah. Krasnoyarsk : Izd-vo SibGTU, 1998. 134 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3377>).

23. Usol'cev V. A., Shchukin A. V. O geografii i ekologii kedra sibirskogo // *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo*. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. № 1(32). S. 115–119.

24. Abdullah N., Jubok Z. H. Multicollinearity remedial techniques in model-building // *Matematika*. 2013. Vol. 29. No. 1b. P. 107–115.

25. Bartkowicz L., Paluch J. Morphological plasticity of six tree species with different light demands growing in multi-layered deciduous forests in Central Europe // *European Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 142 (5). P. 1177–1195.

26. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // *Canadian Journal of Forest Research*. 1972. Vol. 2 (1). P. 49–53.

27. Basu I., Maji S. Multicollinearity correction and combined feature effect in Shapley values // *Proceedings AI 2021: Advances in Artificial Intelligence, 34th Australasian Joint Conference, AI 2021, Sydney, NSW, Australia, February 2–4, 2022*. P. 1–12. (Lecture Notes in Computer Science. 2022.)

28. Basuki T. M., Van Laake P. E., Skidmore A. K. et al. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests // *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257. P. 1684–1694.
29. Bi H., Turner J., Lambert M. J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia // *Trees*. 2004. Vol. 18. P. 467–479.
30. Bombelli A., Avitabile V., Beileli Marchesini L. et al. Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables: biomass. Food and Agriculture Organization – Global Terrestrial Observation System, Rome, 2009. 86 p.
31. Bondé L., Ganamé M., Ouédraogo O. et al. Allometric models to estimate foliage biomass of *Tamarin-dus indica* in Burkina Faso // *Southern Forests: a Journal of Forest Science*. 2017. Vol. 80. P. 143–150.
32. Brown S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges // *Environmental Pollution*. 2001. Vol. 116. P. 363–372.
33. Chave J., Andalo C., Brown S. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // *Oecologia*. 2005. Vol. 145. P. 87–99.
34. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis. New York, NY : Wiley, 2014. 736 p.
35. Falster D., Duursma R., Ishihara M. et al. BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants // *Ecology*. 2015. Vol. 96(5). P. 1445 (Ecological Archives E096-128).
36. Fehrmann L., Klein C. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 236. P. 412–421.
37. Harmon I., Weinstein B., Bohlman S. et al. A neuro-symbolic framework for tree crown delineation and tree species classification // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Article 4365.
38. Joosten R., Schumacher J., Wirth C. et al. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany // *Forest Ecology and Management*. 2004. Vol. 189. P. 87–96.
39. Jucker T., Fischer F. J., Chave J. et al. Tallo – a global tree allometry and crown architecture database // *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28. P. 5254–5268.
40. Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information // *Silva Fennica*. 2005. Vol. 39. P. 227–248.
41. Kittredge J. Estimation of amount of foliage of trees and stands // *Journal of Forestry*. 1944. Vol. 42. No. 11. P. 905–912.
42. Lin K., Lyu M., Jiang M. et al. Improved allometric equations for estimating biomass of the three *Castanopsis carlesii* H. forest types in subtropical China // *New Forests*. 2017. Vol. 48. P. 115–135.
43. Marcoulides K. M., Raykov T. Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods // *Educational and Psychological Measurement*. 2019. Vol. 79(5). P. 874–882.
44. Návár J. Biomass component equations for Latin American species and groups of species // *Annals of Forest Science*. 2009. Vol. 66. P. 208–216.
45. Návár J. Alometría para biomasa en especies arbóreas del noroeste de México // *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2010. Vol. 12. P. 507–519.
46. Oke J. A., Akinkunmi W. B., Etebefia S. O. Use of correlation, tolerance, and variance inflation factor for multicollinearity test // *Global Scientific Journals*, 2019. Vol. 7(5). P. 652–659.
47. Pretzsch H. The effect of tree crown allometry on community dynamics in mixed-species stands versus monocultures. A review and perspectives for modeling and silvicultural regulation // *Forests*. 2019. Vol. 10. Article 810.
48. Pretzsch H. Tree growth as affected by stem and crown structure // *Trees*. 2021. Vol. 35. P. 947–960.
49. Schmucker J., Uhl E., Steckel M. et al. Crown allometry and growing space requirements of four rare domestic tree species compared to oak and beech: implications for adaptive forest management // *European Journal of Forest Research*. 2022. Vol. 141. P. 587–604.
50. Schumacher F. X., Hall F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume // *Journal of Agricultural Research*. 1933. Vol. 47. No. 9. P. 719–734.
51. Segura M., Kanninen M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica // *Biotropica*. 2005. Vol. 37. P. 2–8.
52. Shumie A., Alemu A., Abebe G. et al. Allometric equations for estimation of above- and below-ground biomass of *Acacia mearnsii* in northwestern Ethiopia // *Forest Science and Technology*. 2024. Vol. 20. No. 3. P. 279–285.
53. Sukhbaatar G., Chimednyam D., Nachin B. et al. Allometric equations for the estimation of above- and below-ground biomass for *Larix sibirica* Ledeb. in Northern Mongolia // *Forest Science and Technology*. 2023. Vol. 19. P. 12–20.
54. Wirth C., Schumacher J., Schulze E. D. Generic biomass functions for Norway spruce in central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation // *Tree Physiology*. 2003. Vol. 24. P. 121–139.
55. Xiang W., Liu S., Deng X. et al. General allometric equations and biomass allocation of *Pinus massoniana* trees on a regional scale in southern China // *Ecological Research*. 2011. Vol. 26. P. 697–711.
56. Xiang W., Zhou J., Ouyang S. et al. Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China // *European Journal of Forest Research*. 2016. Vol. 135. P. 963–979.
57. Yoo W., Mayberry R., Bae S. et al. A study of effects of multicollinearity in the multivariable analysis // *International Journal of Applied Science and Technology*. 2014. Vol. 4(5). Article 9.
58. Zianis D., Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass // *Forest Ecology and Management*. 2004. Vol. 187. P. 311–332.

© Усольцев В. А., Терехов Г. Г., 2025

РОЛЬ ЛЕСОСТЕПНОЙ И ПОДТАЕЖНОЙ (ТРАВЯНЫХ ЛЕСОВ) РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ФОРМИРОВАНИИ ЛАНДШАФТОВ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ

В. А. Безруких¹, Е. В. Авдеева², А. А. Коротков², Н. А. Лигаева³, О. А. Кузнецова³

¹Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. А. Лебедевой, 89

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: e.v.avdeeva@gmail.com

³Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660099, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

Аннотация. Лесостепные и подтаежные природные комплексы Сибири являются одной из главных частей окружающей среды человека, в большей степени влияют на климат, чистоту воздуха, воды и почв, обеспечивают комфортные условия для проживания и отдыха людей. В статье рассматриваются особенности природных условий сибирских лесостепей и подтайги (травяных лесов) и их роль на формирование ландшафтов Сибири. Больше внимания уделено растительности разных типов лесостепей, степей и светлохвойных и лиственных лесов, кроме того дается характеристика почвенного покрова и подстилающих горных пород в зависимости от рельефа и экспозиции склонов. Даются взгляды разных авторов относительно происхождения и развития лесостепей, степей и зоны светлохвойных и лиственных травяных лесов (подтайга) с точки зрения истории формирования растительных ландшафтов.

Ключевые слова: ландшафт, лесостепь подтайга (зона травяных лесов), природные зоны, Кемчугское поднятие, Енисейский Кряж, террасы.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 55–62

THE ROLE OF FOREST-STEPPE AND SUB-TAIGA (GRASS FORESTS) VEGETATION IN THE FORMATION OF LANDSCAPES OF THE BOREAL ZONE OF YENISEI SIBERIA

V. A. Bezrukhikh¹, E. V. Avdeeva², A. A. Korotkov², N. A. Ligaeva³, O. A. Kuznetsova³

¹Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafyev
89, A. Lebedeva str., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: e.v.avdeeva@gmail.com

³Siberian Federal University
79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660099, Russian Federation

Annotation. Forest-steppe and subtaiga natural complexes of Siberia are one of the main parts of the human environment. They to a greater extent affect the climate, purity of air, water and soil, provide comfortable conditions for people to live and rest. The article discusses the features of the natural conditions of the Siberian forest-steppes and subtaiga (grass forests) and their role in the formation of Siberian landscapes. More attention is paid to the vegetation of different types of forest-steppes, steppes and light coniferous and deciduous forests. In addition, the characteristics of the soil cover and underlying rocks are given depending on the relief and exposure of the slopes. The views of different authors are given regarding the origin and development of forest-steppes, steppes and the zone of light coniferous and deciduous grass forests (subtaiga) from the point of view of the history of the formation of plant landscapes.

Keywords: landscape, forest-steppe subtaiga (grass forest zone), natural zones, Kemchug hills, Yenisei Ridge, terraces.

Основное внимание в исследованиях уделено растительности лесостепей, а также светлохвойных и лиственных травяных лесов.

Зона лесостепи. Растительный покров лесостепей своеобразен и характеризуется сочетанием различных типов растительности. Здесь сменяются: настоящие,

луговые и горные степи; светлые парковые березовые и сосновые леса; разнообразные луга, растительность солончаков, темнохвойные елово-пихтовые леса.

Настоящие степи занимают южные склоны водоразделов и невысоких останцевых возвышенностей, сухие долины рек и логов, надпойменные террасы

крупных рек. Леса распространены на водоразделах, склонах северной экспозиции. Огромное влияние на распределение растительного покрова, помимо экспозиции, оказывают крутизна и характер склонов (выпуклые, плоские, вогнутые) и литология горных пород. На карбонатных мергелистых породах девона появляются каменистые горные и опустыненные степи, резко отличающиеся от степей на континентальных толщах юрского возраста, песчаниках, песчано-глинистых отложениях) [1].

С севера на юг выделяются подзоны северной и южной лесостепи, отличные по характеру растительного и почвенного покрова.

В *северной лесостепи* значительные площади водоразделов занимают редкостойные парковые леса из березы, сосны, редко лиственницы сибирской. Степные ценозы приурочены к сухим долинам и южным склонам расчлененных водоразделов. По долинам рек тянутся темнохвойные леса. Лесистость в настоящее время составляет около 30 %. Преобладают серые лесные почвы, большие площади занимают выщелоченные черноземы.

В *южной лесостепи парковые леса* на водоразделах исчезают. Сосна и лиственница уступают место березе, которая растет по склонам северной экспозиции, в западинах, понижениях между буграми, в долинах рек. Лесистость от 5–15 %. Степные ассоциации в южной лесостепи прежде занимали господствующее положение – на водоразделах были луговые разнотравные степи, которые почти целиком распаханы, площади их заняты под посевы зерновых культур. По южным и западным склонам простираются настоящие и каменистые степи. Большие площади, особенно в центральной части Канской котловины, занимают бугристые лесостепи. В долинах рек в пойме располагаются осоковые кочкарники, нередко с березой пушистой и ивами, реже пойменные луга; на I надпойменной террасе – солонцеватые и остепненные луга, в Канской лесостепи местами по замкнутым депрессиям или луговым террасам встречаются заросли сочных солянок, белопопынники, солончаковатые луга. В почвенном покрове преобладают выщелоченные черноземы; значительные площади занимают обыкновенные черноземы; серые лесные почвы встречаются отдельными пятнами. Граница южной и северной лесостепей хорошо обозначается появлением темнохвойных лесов в долинах рек. В центре Канской лесостепи (к северо-западу от г. Канска) и в окрестностях Красноярска находятся небольшие участки настоящих степей («степное ядро» по Л. М. Черепнину [2; 3]. На высоких террасах Енисея и Кана, сложенных лессовидными суглинками, были распространены крупно-полынно-ковыльные степи на обыкновенных черноземах.

Луговые степи и настоящие различны по аспекту, видовому составу и ритму развития. Луговые степи располагаются на плакоре или в понижениях рельефа, в условиях некоторого избыточного увлажнения, на что указывают признаки оглеения на глубине, приуроченной к слою длительного сезонного промерзания почв. В течение весны и лета здесь сменяется ряд аспектов цветения (белый – ветреницы лесной, светло-

желтый – прострела желтеющего, оранжевый – купальницы азиатской, розовый – копеечника сибирского, синий – горошка однопарого, желтый – лилии даурской т. д.), максимум цветения совпадает с температурным максимумом и поэтому не бывает летнего периода покоя. Все это сближает луговые степи Средней Сибири с луговыми (северными) степями Русской равнины и Западно-Сибирской низменности, хотя видовой состав их различен [4].

На крутых выпуклых склонах южной экспозиции на настоящий крупнополынно-ковыльных и мелкодерновинных степях зимой снег сдувается и почвы глубоко и сильно промерзают, а весной поздно оттаивают. Поверхность разбита на мелкие полигоны. Весной и в первой половине лета, когда почвы, сухие и холодные, степи имеют унылый однообразный, серый вид. Эфемеры здесь отсутствуют, нет почти и цветущих видов. В течение лета степи сохраняют однотонный серый аспект, цветущие растения единичны; только в середине августа, когда почвы увлажнены, степи оживают. В это время наблюдается массовое цветение – сначала аспект ковыля изменчивого или ковыля-тырсы, позже – полыней и астр. В середине сентября в степях некоторые растения продолжают цвести, многие плодоносят, у ряда видов отмечается появление новых листьев и побегов. Эти степи резко отличны от настоящих степей Русской равнины и Западно-Сибирской низменности, они аналогичны степям Хакасии [5; 6].

Рассмотрим характерные черты растительности лесостепей.

Луговые степи на выщелоченных черноземах сохранились на отдельных участках. Как указывает Л. М. Черепнин [4], луговые степи отличаются большой видовой насыщенностью, плотным травостоем, красочностью. В Канской и Красноярской лесостепях преобладают простреловые степи, в Ачинской (к северо-западу от г. Ачинска) появляются мезофильные аналогичные луговым степям хребта Арга. Среди луговых можно выделить простреловые, ковыльно-разнотравные и разнотравные степи.

Простреловые степи приурочены к опушкам и березовым колкам, они встречаются также в понижениях, сухих ложках, на склонах южной экспозиции, где происходит накопление снега. В травяном покрове господствует прострел желтеющий (*Pulsatilla flavescens*); к характерным – видам относятся из злаков трищетинник сибирский (*Trisetum sibiricum*), ковыль сибирский (*Stipa sibirica*); из разнотравья – зопник клубненосный, клубника, осока стоповидная, полыни пижмолистная и широколистная, ирис русский и другие лугово-степные и даже луговые виды. Злаки играют небольшую роль, исчезают здесь и настоящие степные виды.

Ковыльно-разнотравные степи разбросаны небольшими пятнами на пологих склонах на всей территории лесостепей. В травяном покрове господствуют перистые ковыли и разнотравье. К основным видам можно причислить ковыль красный, крупную полынь Гмелина (*Artemisia Gmelini*), зопник клубненосный, порезник промежуточный (*Libanotis intermedia*), змееголовники Риуша и поникший (*Dracophaea*)

ruishiana/ D/ nutans), прострел желтеющий и др. Эти степи используются под сенокосы или пастбища [5].

Разнотравные степи (очень красочные) развиты на пологих склонах террас р. Чулыма к северу от г. Ачинска. Травяной покров их высокий и густой (средняя высота 60 см, покрытие 90–100 %). У большинства видов широкие листья, многие растения имеют крупные цветки. Весной цветут прострел желтеющий, ветреница лесная, огоньки, летом – ярко-красный пеон (марьян корень – *Paeonia anomala*), разноцветные крупные венерины башмачки, лилия даурская, лилия саранка, живокость высокая. Злаки в составе травостоя имеют небольшое значение и представлены лесными или луговыми видами. Разнотравные луговые степи слабо используются, между тем, они дают большую растительную массу, богаты бобовыми и представляют ценные сенокосные угодья [5].

Крупнопольнно-ковыльные степи распространены в южной лесостепи и степи центральной части Канской котловины на высоких террасах р. Кана и его притоков, на лессовидных суглинках южных склонов асимметричных водоразделов. На территории Красноярской лесостепи они занимают главным образом выпуклые склоны южной экспозиции [1]. Травяной покров разрежен, покрытие 50–60 %, средняя высота 30–40 см. Основными растениями являются ковыль изменчивый и полынь сизая. К характерным видам относятся типчак ложноовечий, тонконог стройный, вероника беловойлочная; реже встречаются овсец пустынный, астра алтайская, ирис желтый, термопсис ланцетолистный, володушка многонервная и другие растения. Эти степи по видовому составу аналогичны крупнопольнно-ковыльным степям ровных плоских равнин Чулым-Енисейской и Минусинской котловин.

Мелкодерновинные степи широкой полосой протянулись по крутым эродированным склонам южной экспозиции и днищам сухих долин Канской лесостепи. В Красноярской лесостепи они сохранились на выпуклых южных склонах холмов правобережья рек. Травяной покров низкий и разреженный, средняя высота 15–30 см, покрытие 30–50 %. Роль ковылей резко уменьшается, преобладают мелкодерновинные злаки, а также степные осочки, полони и другие представители сухого разнотравья. Основные их виды – типчак ложноовечий, тонконог стройный, ковыль изменчивый или ковыль-тырса, полынь холодная, осочки твердоватая и Коржинского, лапчатка бесстебельная, вероника беловойлочная, астры алтайская и двулетняя. Обычно встречаются полынь сизая, горичник байкальский, володушка козлецоволистная и житняк гребенчатый. Мелкодерновинные степи отличаются значительным многообразием; их можно разделить на тонконоговые, типчаковые, мелкопольные (с полынью холодной), осочковые. Эти степи являются основными пастбищами. Неумеренный выпас приводит к обеднению видового состава – исчезают ковыли, крупные полони, а позже – тонконог и другие растения. Появление мелкопольных и осочковых степей, как указывает Л. М. Черепнин [4], связано в первую очередь с сильным выпасом. Мелко-дерновинные степи аналогичны степям невысоких возвышенностей Хакасии.

Луга лесостепи занимают значительные площади и используются как сенокосные, частично пастбищные угодья. Среди них можно выделить: пойменные луга среднего увлажнения пойм крупных рек; пойменные влажные луга пойм малых рек; солонцеватые и остепненные луга низких надпойменных террас; остепненные луга склонов и высоких надпойменных террас; водораздельные луга (лесные поляны).

Пойменные злаковые и злаково-разнотравные луга развиты в поймах Чулыма, Енисея, Кана, Рыбной. В их составе много хороших кормовых злаков – мятлика лугового, лисохвоста лугового, тимофеевки луговой, костра безостого, пырея ползучего, бобовых – клевера лугового, горошка мышиного и разнотравья. Наличие лютика едкого местами сильно снижает качество травостоя. Эти луга используются как сенокосы [7].

В поймах небольших рек, преимущественно в южной лесостепи и степи, тянутся полосы осоковых лугов, нередко с куртинами ив или берез; микрорельеф их кочковатый, сено грубое. В северной лесостепи, главным образом в Ачинской и Красноярской, в поймах малых рек располагаются влажные ветниковые и ветниковотаволговые луга из ветника Лангсдорфа и таволги вязолистной с зарослями кустарников – спиреи иволистной, рябинника.

Низкие надпойменные террасы рек в южной лесостепи заняты солонцеватыми и остепненными лугами; травостой их сильно выбит. Поверхность лугов мелкобугристая; здесь хорошо выражены бугры вспучивания и блюдцеобразные понижения. Низкий травяной покров, неровный рельеф и засоление делают эти участки часто мало пригодными для использования. Остепненные разнотравные луга склонов водоразделов и высоких надпойменных террас рек имеются в Ачинской лесостепи, где они сменяют степную растительность. Травяной покров лугов высокий, густой, преобладает разнотравье – порезник промежуточный, змееголовник Риуша, лилия даурская, пижма; много бобовых – клевер луговой, горошки – однопарый, мышиный. По составу травостоя остепненные луга представляют хорошие сенокосные угодья.

В *северной лесостепи* имеются большие площади естественных сенокосов, в южной значительные участки лугов, вследствие засоления и бугристого рельефа, не пригодны для сенокосов; пастбища сильно выбиты и требуют коренного улучшения [7].

В *подзоне южной лесостепи* леса занимают небольшую площадь и приурочены к склонам северной экспозиции и сухим ложам. Они образованы березой бородавчатой. Березы – молодые, порослевые; березовые лески обычно повреждены неумеренной пастбищностью скота. Березовые леса южной лесостепи делятся на березняки простреловые, с господством прострела желтеющего, и березняки папоротниковые, с папоротником-орляком. Последние встречаются почти исключительно на склонах северной экспозиции. Кое-где в Красноярской степи на северных склонах останцевых возвышенностей, сложенных породами девона, попадаются участки березняков с зарослями кустарников из акации желтой, кизильника, спиреи средней [8].

В *северной лесостепи* площадь лесов резко увеличивается, они растут на северных склонах и водораз-

делах на серых лесных почвах. Помимо березняков, в Канской и частично Красноярской лесостепи встречаются сосновые, сосново-лиственничные, изредка лиственничные леса. Они аналогичны лесным насаждениям зоны травяных лесов и отличаются от последних сильной изреженностью древостоя, большим остепнением травяного покрова.

Зона светлохвойных и лиственных травяных лесов (подтайга) соответствует зоне серых лесных почв. Довольно распространенный термин подтайга мы считаем неудачным, так как эти леса по структуре, видовому составу, экологии, происхождению совершенно отличны от таежных лесов.

По географическому положению эта зона аналогична зонам широколиственных лесов Русской равнины и березовых лесов Западно-Сибирской низменности. Рельеф и литология пород значительно-однообразнее, чем в лесостепи. Невысокие увалы и плоские равнины тянутся параллельно широким речным долинам. Коренные породы покрыты плащом однородных покровных глин и суглинков. Климат, по сравнению с лесостепью, менее континентальный, увеличивается количество осадков, особенно зимних. На водоразделах и склонах в этой зоне господствуют редкостойные леса, образованные сосной, березой, реже лиственницей сибирской. В долинах рек обычны елово-пихтовые леса. Степные ценозы исчезают [9].

Парковые травяные леса имеют простую структуру. Древостой одноярусный, образован одной, реже двумя породами. Сомкнутость крон незначительна – 0,3–0,5. Для этих лесов характерно слабое развитие подлеска, подроста, полное отсутствие мхов, наличие: высокого и густого травяного покрова [9].

В состав водораздельных и долинных лесов входят различные породы – сосна, лиственница сибирская, береза, осина, ель, пихта, кедр, распределение которых неодинаково в различных районах. Основной древесной породой является сосна. В Канском и Красноярском округах она занимает междуречья и склоны и растет на почвах различного механического состава. В Ачинском округе она приурочена к песчаным террасам рек. Лиственница распространена в восточной части территории, где растет на водоразделах и склонах, образуя сосново-лиственничные леса. На границе с Западно-Сибирской низменностью лиственница исчезает с водоразделов и встречается в долинах, рек в елово-пихтовых лесах. Береза – главная древесная порода лесостепи – произрастает и в лесной зоне, особенно к западу от Енисея. Она растет на выщелоченных черноземах, серых лесных и дерново-подзолистых почвах. Осина встречается главным образом в западной части территории на слабо расчлененных водоразделах и приурочена к блюдцеобразным западинам. Осина здесь отлична от европейской, ствол у нее прямой, кора светлая, почти белая; она мало поражена сердцевинной гнилью. Ель и пихта растут в долинах рек – в пойме и по надпойменным террасам. Только на Кемчугском нагорье, где осадков выпадает около 500 мм, пихтово-еловые леса покрывают вершины и склоны увалов. Кедр попадает на отдельных участках в долинах рек на северо-западе территории (реки Кемь, Кеть, Чулым и другие).

Большое влияние на развитие парковых травяных лесов оказывает сезонная мерзлота. При наличии слоя длительного сезонного промерзания серые лесные почвы под лесами в течение всего вегетационного периода сильно увлажнены; этому способствует также их тяжелый механический состав, что и обуславливает пышный рост трав и редкостойный характер лесов [10].

Травяной покров лесов образован лесными, лугово-лесными и луго-востепными видами; последние встречаются в южной части зоны. В состав его входят восточно-сибирские виды – борщевик рассеченнолистный, реброплодник уральский, какалия копьелистная, вонючка, пеон, сочевник Гмелина, герань голубая, княжик сибирский, борец вьющийся, фиалка одноцветковая и многие другие; алтае-саянские виды – молочай волосистый; некоторую роль играют европейские виды, растения широколиственных и елово-широколиственных лесов – медуница, сочевник весенний, вороний глаз, бор развесистый, будра плющевидная. Количество европейских видов к востоку от Енисея резко уменьшается.

Травяной покров лесов характеризуется большой видовой насыщенностью до 40–50 видов на площади 10 м², тогда как в таежных лесах Енисейского края – 4–5 видов [3].

В лесу можно отметить резкую смену аспектов: весной травяной покров низкий, цветут белые анемоны, позднее яркооранжевые огоньки, лиловый сочевник весенний; в середине июня, когда температура резко повышается, аспект меняется – появляются высокотравье и папоротники. Наблюдается очень быстрый рост трав, у многих из них суточный прирост равен 2–4 см. За полторы-две недели они выгоняют высокие стебли (иногда до 1,0–1,5 м) и начинают цвести. Период цветения сильно растянут. Намечается ряд летних аспектов: раннелетний (начало июля) светло-желтый – лилии даурской; летний (середина-конец июля) – белый аспект зонтичных, сначала цветет борщевик рассеченнолистный, несколько позднее – реброплодник уральский; позднелетний (начало августа) – желтый аспект скерды сибирской, инулы солонцеватой, ястребинок; в лесу цветут лиловые и синие борцы (борец высокий, борец вьющийся). В травяных лесах массовое цветение наблюдается весной и в течение всего летнего периода. Особенно ярко смена аспектов выражена на опушках и полянах. В моховых таежных лесах смены аспектов нет; в широколиственных и елово-широколиственных лесах Русской равнины фазы цветения сдвинуты на весеннее время [3].

В конце августа – начале сентября, при первых заморозках, когда температура воздуха начинает резко снижаться, растения буреют и погибают. В это время степные растения продолжают вегетировать и многие виды цветут. У растений парковых лесов сильно укороченный вегетационный период – около трех месяцев. Растения имеют многолетние мощные корневища (иногда луковицы) с большими запасами питательных веществ; зимующие почки, одетые плотными покровами, прикрыты нередко остатками старых листьев или черешков. У многих видов наблюдается два типа

почек – крупные дифференцированные почки данного года и мелкие недифференцированные, расположенные обычно ниже, которые только через год-два или позже дадут новые побеги и листья. Эти биологические особенности позволяют растениям в течение короткого жаркого лета в условиях хорошего увлажнения дать большую растительную массу, накопить запасы питательных веществ, быстро завершить цикл развития [2].

Перейдем к характеристике основных растительных формаций.

Сосняки водоразделов и склонов представляют редкостойные леса. Насаждения сосны зрелые, повсеместно встречаются сосняки 150–250-летнего возраста. Почти все леса несут следы пожаров. В травяных сосняках подлесок и подрост отсутствуют. Сосна сейчас не возобновляется – нет ни подроста, ни молодых деревьев. Главной причиной отсутствия подроста сосны служит наличие высокого, густого травяного покрова, который препятствует ее возобновлению. В сухих борах на песчаных и скелетных почвах (боры-брусничники) местами можно видеть хороший подрост сосны, часто поврежденный пожарами.

Травяной покров парковых сосняков сходен по видовому составу с покровом березовых и березово-осиновых лесов, но более остепнен; заметно уменьшается количество широколиственных видов. К основным растениям сосновых лесов можно причислить горошек однопарый, сочевичник Гмелина, сочевичник весенний, реброплодник уральский, вейник Лангсдорфа, лилию даурскую, володушку золотистую, герань голубую, василистник малый, борец степной и многие другие. Травяной покров пестрит от массы цветущих видов.

Среди *травяных сосняков водоразделов* можно выделить следующие типы: сосняки простреловые с преобладанием прострела желтеющего, горошка однопарого, соссюреи белойойлочной, зопника клубеносного, полыни пижмолистой и других луго-востепных видов, которые распространены в северной лесостепи и по южной окраине зоны травяных лесов; сосняки вейниковые, в которых помимо вейника тростниковидного, обычных папоротник-орляк, василистник малый, лилия даурская, вонючка, герань голубая, сочевичник Гмелина, эти сосняки встречаются в северной лесостепи и лесной зоне и больших площадей не занимают; сосняки высокотравные, с преобладанием реброплодника уральского, борщевика рассеченнолистного, скерды сибирской, василистника малого, володушки золотистой и т. д. – это основной тип травяных сосняков лесной зоны; сосняки крупнотравные, в них господствует борец высокий, характерны какалия копьелистная, борщевик рассеченнолистный, таволга вязолистная, княжник сибирский, эти сосняки изредка встречаются на пологих склонах в условиях повышенного увлажнения в лесной зоне. Иные типы сосняков появляются на песчаных террасах рек и выходах коренных песчаных пород. Насаждения здесь более сомкнутые, стволы цилиндрической формы с относительно небольшими кронами. В травяном покрове – ряд северных и боровых видов: брусника, ко-

шачья лапка, грушанки однобокая и круглолистная, овсяница овечья, черника, которые придают определенный аспект борам. Среди сосновых боров песчаных отложений преобладают сосняки-брусничники, имеющие, как правило, примесь высокотравья.

Сосновые леса на породах тяжелого механического состава (бурых суглинках и глинах) по видовому составу, типологии отличны от сосняков на песчаных отложениях. Редкостойные сосновые леса водоразделов – типичные насаждения паркового типа. Широкие низкие кроны, горизонтальные ветви, сильно сбежистые конусовидные стволы сосен свидетельствуют о том, что 150–250 лет назад, когда эти территории интенсивно осваивались первыми переселенцами, сосновые леса имели такую же в общем структуру, как в настоящее время, и были парковые. Подтверждением первичного характера травяных сосновых лесов может служить высокое содержание гумуса в верхнем горизонте почвы, связанное с интенсивной биологической аккумуляцией. Частые пожары, вырубки, сенокосы способствовали дальнейшему разреживанию этих светлых лесов [11].

Сосново-лиственничные леса – занимают меньшую площадь по сравнению с сосновыми и сосново-березовыми. Они располагаются в восточной половине территории – по юго-западной и северо-восточной окраинам Канской котловины. В Красноярском округе площадь их невелика, в Ачинском округе их нет совсем. Наличие старых пней и отдельных лиственниц в сосновых лесах свидетельствует о былом, более широком распространении лиственницы. Возможно, что участки сосновых и сосново-березовых лесов в недалеком прошлом были сосново-лиственничными. Сосново-лиственничные леса располагаются на водоразделах и склонах, на породах тяжелого механического состава, на серых лесных почвах. Насаждения светлые, разреженные, одноярусные, подлесок и подрост в них отсутствуют. Травяной покров аналогичен сосновым лесам. Сосново-лиственничные леса можно разделить на простреловые, вейниковые и высокотравные (в настоящее время они мало изучены).

Березовые и березово-осиновые леса расположены в Красноярском и Ачинском округах на широких плоских междуречьях и древних террасах Енисея и Чулыма с ровной или волнистой поверхностью, испещренной округлыми блюдцеобразными западинами. Поверхность равнин не расчленена, современная и древняя эрозийные сети не развиты. В распределении березы и осины наблюдается определенная закономерность – береза занимает ровные или слабоволнистые поверхности осина приурочена к западинам и пониженным участкам рельефа. Почвы серые лесные глееватые (или глеевые) со вторым гумусовым горизонтом на бурых глинах и суглинках, в западинах подзолисто-глеевые или торфянисто-глеевые [1].

Березовые леса водоразделов представляют светлые разреженные насаждения паркового типа с луговыми полянами. Насаждения березы зрелые, местами перестойные, вблизи дорог и трактов – большие площади молодых насаждений. Подлесок и подрост развиты слабо или совсем отсутствуют. Всюду в березняках высокий травяной покров, образованный лес-

ным и лугово-лесным высокотравьем. Заметную роль играют растения широколиственных лесов, имеется небольшая примесь луговых и луговостепных видов. Вследствие однообразия рельефа и большой однородности растительного покрова разделение на ассоциации затруднено. Среди березовых лесов можно выделить березняки высокотравные, вейниково-высокотравные, вейниково-папоротниковые. Березовые и березово-осиновые леса междуречий и высоких террас Енисея и Чулыма по характеру рельефа и растительного покрова близки к западно-сибирским. Насаждения, по видимому, первичные, на что указывают приуроченность их к определенным типам рельефа, общий характер насаждений, семенное происхождение и большой возраст березы и осины. М. Ф. Елизарьева считает лиственные леса вторичными, возникшими на месте хвойных [12; 15].

Елово-пихтовые долинные леса, в северной лесостепи занимают узкие долины рек. В зоне травяных лесов они приурочены как к узким, так и к широким долинам. В состав их входят ель, пихта, береза (бородавчатая и пушистая), осина; на границе с Западно-Сибирской низменностью – лиственница сибирская, местами кедр. Значительным разнообразием характеризуются также травяной покров и подлесок; здесь обычны спиреи иволистная и средняя, рябинник, черная и красная смородина, шиповник иглистый, свидина, реже встречаются жимолость алтайская, рябина сибирская. Травяной покров по видовому составу неоднороден, имеются растения лугово-лесного и лесного высокотравья, лугово-болотные и болотные виды, представители широколистного, мелкотравья.

К югу и востоку структура елово-пихтовых лесов упрощается и площадь их резко сокращается. Долинные леса можно разделить на *елово-пихтовые леса пойм* и *надпойменные террасы*. В поймах малых и больших рек Ачинского и Красноярского округов развиты елово-пихтовые леса с густым подлеском кустарников. Травяной покров разрежен, преобладают вейник Лангсдорфа, таволга вязолистная, вербейник обыкновенный. В Канском округе они сменяются осоковыми елово-пихтовыми лесами с примесью березы и редким подлеском. В травяном покрове господствуют дернистые осоки, образующие крупнокочкватый микрорельеф. Помимо осок, постоянно встречаются хвощ болотный и луговой, таволга вязолистная, подмаренник цепкий и северный.

Темнохвойные леса южнотаяжного типа распространены главным образом в западной части территории, где они занимают надпойменные террасы рек. В Канском округе они встречаются в самой северной части котловины и приурочены к холодным узким долинам и отдельным заболоченным низинам. Под ними формируются темно-серые и серые глееватые и глеевые тяжело суглинистые почвы со вторым гумусовым горизонтом. Древостой состоит из ели, пихты; постоянна примесь лиственницы, осины, изредка кедра. Насаждения здесь сомкнутые, сложные по структуре. Травяной покров отличен от других типов леса. Помимо обычного высокотравья (медуница, будра плющевидная, вороний глаз, адокса), широко представлено таежное мелкотравье: кислица, которая не-

редко создает фон, далее майник двулистный, седмичник европейский, черника, грушанка круглолистная, цирцея альпийская. На почве отдельные куртины зеленых блестящих гипновых мхов. Наличие таежного мелкотравья, лесных мхов отличает эти долинные леса от других формаций. По характеру травяного и напочвенного покровов их можно отнести к южнотаяжному.

Весной развитие осины и березы в долинах западывает примерно на 2–3 недели. В середине июня в долинах у осины и березы отмечается весенняя фаза развития (у осины мелкие розоватые листочки, у березы мелкие зеленые). В это же время на склонах и водоразделах у осины и березы зеленые летние листья – летняя фаза развития. Осенью, наоборот, в долинах раньше наступает осенняя фаза – на водоразделах березы и осины стоят еще зеленые, в долинах деревья и кустарники расцвечены в яркие осенние тона [13; 14; 16]. Таким образом, темнохвойные елово-пихтовые и пихтово-еловые леса, за исключением западной части территории, принадлежащей собственно к Западно-Сибирской низменности, занимают возвышенности или долины рек, их существование связано с особыми условиями увлажнения и температурными инверсиями.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования о роли лесостепной и подтаежной (травяных лесов) растительности на формирование ландшафтов Сибири выделяется несколько растительных комплексов, различных по происхождению.

Комплекс парковых сосновых и березовых высокотравных лесов, сходных по видовому составу, наличию эндемов, ритму развития, экологии с крупнотравными пихтово-еловыми лесами нижнего пояса Восточных Саян и Кузнецкого Алатау. Спустившись на равнину в эпоху, очевидно, соответствующую стадии обводнения Канской котловины, эта растительность приобрела менее мезофитный облик и поселилась под пологом сосны и березы, пришедших с запада, так как темнохвойные породы сохранились до наших дней в долинах рек и на отдельных возвышенностях.

Комплекс темнохвойных елово-пихтовых лесов южнотаяжного типа. В настоящее время эти леса имеют ленточный ареал и приурочены к долинам рек, где их существование связано с температурными инверсиями и особыми условиями увлажнения. Здесь встречается ряд северных и западных видов, например, в Канской лесостепи в холодных, узких долинах много березы пушистой, арктической малины, сныти; эти растения можно рассматривать как реликты – наследие более влажной эпохи.

Комплекс разнотравных луговых степей и березовых колков. Вероятно, это самый молодой комплекс растительности лесостепей, ритм развития которых полностью соответствует современным климатическим условиям.

В истории растительного покрова ясно намечается сухая эпоха, когда широко были распространены настоящие и сухие степи, растительность солончаков, а островные степи и лесостепи не были изолированы.

К этой эпохе, по-видимому, можно отнести образование реликтового гумусового горизонта серых лесных почв. В. В. Ревердатто для территории Средней Сибири отмечает три сухих и холодных и три влажных и теплых эпохи, соответствующие ледниковым и межледниковым периодам. Более вероятно, что эта эпоха относится к послеледниковому ксеротермическому периоду. Позднее наступила влажная эпоха, когда на водоразделах и в долинах рек господствовали леса алтае-саинского типа. К этому времени, очевидно, приурочены следы интенсивного оподзоливания серых лесных почв. Позже снова началась сухая эпоха, когда образовалась сухая сеть долин и балок. В это время на водоразделах господствовали луговые степи и парковые сосново-лиственничные, а также березовые травяные леса. С этой эпохой связаны процессы проградации серых лесных почв.

Растительность зоны травяных лесов развивается в условиях повышенного увлажнения. Наличие в почвах слоя длительного сезонного промерзания, который является аккумулятором влаги, способствует сохранению и накоплению в почве выпадающих осадков. Несмотря на небольшое количество осадков, почвы под лесом характеризуются периодически промывным водным режимом, что обуславливает развитие высокотравья. Высокий травяной покров препятствует нормальному возобновлению древесных пород и здесь сформировались редкостойные травяные леса.

Иные условия водного режима создаются на крутых выпуклых склонах южной экспозиции, где развиты настоящие и каменистые степи. Из-за отсутствия снежного покрова и сильного промерзания почвы имеют непромывной водный режим. Весной и летом они сухие и холодные, лишь в конце лета и осенью – влажные. Ритм развития степей тесно связан с условиями увлажнения. Весной и в течение лета степи однообразные и бескрайние, и только осенью наблюдаются интенсивная вегетация и массовое цветение, на крутых южных склонах сохранились сухие и холодные степи монгольского типа, которые широко были распространены в ксеротермический период.

История формирования растительности, резко континентальный климат, сложный рельеф и литология, своеобразные водный и тепловой режимы почв создали те контрасты растительного покрова лесостепи и подтайги, которые мы наблюдаем в настоящее время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Коляго С. А. К вопросу о происхождении коричнево-бурых глин и других покровных пород Красноярской лесостепи // Вопросы географии Сибири. Томск : изд-во Томск. гос. ун-та, 1953. Сб. 3. С. 13–28.
2. Николаев В. А. Ландшафтно-географические аспекты изучения и оптимизации территориальной структуры сельскохозяйственных земель // Мелиорация ландшафтов. М. : МФ ГО СССР, 1988. С. 18–30.
3. Черепнин Л. М. Растительный покров южной части Красноярского края и задачи, его изучения // Ученые записки. Т. V. Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. пед. ин-та, 1956.

4. Черепнин Л. М. Особенности флоры юга Красноярского края // Ученые записки. Т. X. Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. пед. ин-та, 1957.

5. Черепнин Л. М. Растительный покров южной части Красноярского края и задачи, его изучения // Ученые записки. Т. V. Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. пед. ин-та, 1956.

6. Ревердатто В. В. Некоторые замечания об «островных» степях Сибири // Советская ботаника. 1947. № 6.

7. Красноярский край в цифрах. Красноярск. 2005. С. 10.

8. Средняя Сибирь. М. : Наука, 1964. 226 с.

9. Атлас. География России. М. : Дрофа, 2004. 47 с.

10. Безруких В. А. Геоэкологические особенности лесостепных агроландшафтов Приенисейской Сибири // Вестник Тамбовского ун-та. Т. 14. Вып. 3. 2009. С. 597–600.

11. Безруких В. А. Территориальная организация аграрного природопользования в условиях Приенисейской Сибири : монография / Краснояр. гос. пед. ун-т. Красноярск, 2008. С. 108–145.

12. Сочава Б. В. Тайга как тип природной среды // Южная тайга Приангарья. Л., 1969. С. 31–50.

13. Елизарьева М. Ф. Геоботанические исследования в западной части Красноярского края (от Красноярска к северу до устья р. Кеми) // Ученые записки. Т. X. Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. пед. ин-та, 1957. С. 15–28.

14. Ревердатто В. В. Основные моменты развития послетретичной флоры Средней Сибири // Советская ботаника. 1940. № 2.

15. Иванов К. И. Территориальные системы общественного производства: географические аспекты аграрно-промышленного комплексирования. М. : Мысль, 1975. 269 с.

16. Лысанова Г. И. Ландшафтный анализ аграрного потенциала геосистем. Иркутск : Изд-во Ин-та геогр. СО РАН, 2001, 188 с.

17. Безруких В. А. Природные условия юго-восточной части Западной Сибири и Северо-Минусинских впадин // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Красноярского края. Вып. 8. Красноярск : КНИГИиМС. 2006. С. 133–143.

REFERENCES

1. Kolyago S. A. K voprosu o proiskhozhdenii korichnevo-buryh glin i drugih pokrovnyh porod Krasnoyarskoj lesostepi // Voprosy geografii Sibiri. Tomsk, gos. un-t. Tomsk, 1953. Sb. 3. S. 13–28.
2. Nikolaev V. A. Landshaftno-geograficheskie aspekty izucheniya i optimizacii territorial'noj struktury sel'sko-hozyajstvennyh zemel' // Melioraciya landshaftov. M. : MF GO SSSR, 1988. S. 18–30.
3. Cherepnin L. M. Rastitel'nyj pokrov yuzhnoj chasti Krasnoyarskogo kraya i zadachi, ego izucheniya // Uchenye zapiski. T. V. Krasnoyarsk : Izd-vo Krasnoyarsk. gos. pед. in-ta, 1956.
4. Cherepnin L. M. Osobennosti flory yuga Krasnoyarskogo kraya // Uchenye zapiski. T. X. Krasnoyarsk : Izd-vo Krasnoyarsk. gos. pед. in-ta, 1957.

5. Cherepnin L. M. Rastitel'nyj pokrov yuzhnoj chasti Krasnoyarskogo kraja i zadachi, ego izucheniya // Uchenye zapiski. T. V. Krasnoyarsk : Izd-vo Krasnoyar. gos. ped. in-ta, 1956.
6. Reverdatto V. V. Nekotorye zamechaniya ob "ostrovnyh" stepyah Sibiri // Sovetskiy botanik. 1947. № 6.
7. Krasnoyarskiy kraj v cifrah. Krasnoyarsk. 2005. S.10.
8. Srednyaya Sibir'. M. : Nauka, 1964. 226 s.
9. Atlas. Geografiya Rossii. M. : Drofa, 2004. 47 s.
10. Bezrukih V. A. Geoekologicheskie osobennosti lesostepnyh agrolandshaftov Prienisejskoj Sibiri // Vestnik Tambovskogo un-ta. T. 14. Vyp. 3. 2009. S. 597–600.
11. Bezrukih V. A. Territorial'naya organizaciya agrarnogo prirodopol'zovaniya v usloviyah Prienisejskoj Sibiri : monografiya / Krasnoyar. gos. ped. un-t. Krasnoyarsk, 2008. S. 108–145.
12. Sochava B. V. Tajga kak tip prirodnoj sredy // Yuzhnaya tajga Priangar'ya. L., 1969. S. 31–50.
13. Elizar'eva M. F. Geobotapicheskie issledovaniya v zapadnoj chasti Krasnoyarskogo kraja (ot Krasnoyarska k severu do ust'ya r. Kemi) // Uchenye zapiski. Krasnoyarsk : Izd-vo Krasnoyar. gos. ped. in-ta, 1957. S. 15–28.
14. Reverdatto V. V. Osnovnye momenty razvitiya posletretichnoj flory Srednej Sibiri // Sovetskiy botanik. 1940. № 2.
15. Ivanov K. I. Territorial'nye sistemy obshchestvennogo proizvodstva: geograficheskie aspekty agrarnopromyshlennogo kompleksirovaniya. M. : Mysl', 1975. 269 s.
16. Lysanova G. I. Landshaftnyj analiz agrarnogo potenciala geosistem. Irkutsk : Izd-vo In-ta geogr. SO RAN, 2001, 188 s.
17. Bezrukih V. A. Prirodnye usloviya yugovostochnoj chasti Zapadnoj Sibiri i Severo-Minusinskih vpadin // Problemy ispol'zovaniya i ohrany prirodnyh resursov Krasnoyarskogo kraja. Vyp. 8. Krasnoyarsk : KNIGiMS. 2006. S. 133–143.

© Безруких В. А., Авдеева Е. В., Коротков А. А.,
Лигаева Н. А., Кузнецова О. А., 2025

Поступила в редакцию 10.02.2025
Принята к печати 25.04.2025

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МЕСТООБИТАНИЙ СОСНЫ СИБИРСКОЙ КЕДРОВОЙ НА СКЛОНАХ ХРЕБТА БОРУС ЗАПАДНОГО САЯНА*

Н. В. Пахарькова¹, М. А. Субботин¹, Е. А. Шикалова², И. Г. Гетте¹,
А. А. Калабина¹, И. И. Куппер¹, К. М. Максимова¹, И. В. Масенцова¹

¹Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10
E-mail: nina.pakharkova@yandex.ru

²Объединённая дирекция заповедника «Саяно-Шушенский» и национального парка «Шушенский бор»
Российская Федерация, 662710, Красноярский край, пгт. Шушенское, ул. Заповедная, 7

Аннотация. Формирование верхней границы леса в горах – сложный процесс, который зависит от многих одновременно действующих факторов. В качестве приоритетных обычно рассматривают климатические факторы, например, низкая температура воздуха и почвы и связанный с этим укороченный вегетационный период. Однако в горных районах со сложным расчленённым рельефом часто образуются не климатогенные, а ландшафтогенные границы леса, либо смешанные. На территории Горного лесничества Национального парка «Шушенский бор» была заложена трансекта, включающая три пробные площади, расположенные на высоте от 1347 до 1411 м над уровнем моря, как в типичных лесных фитоценозах с преобладанием сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour), так и на верхнем пределе ее распространения. В ходе исследования выявлено, что при формировании верхней границы продвижения *Pinus sibirica* кедровой на склонах хребта Борус значительное влияние оказывают климатические факторы и особенности рельефа. Среди лимитирующих факторов можно отметить не только снижение температуры по мере увеличения высоты над уровнем моря, но и водный дефицит, связанный со значительной крутизной склонов, что приводит к увеличению поверхностного стока, а маломощные почвы не способны задержать достаточное количество влаги. У деревьев сосны сибирской, произрастающих в таких условиях, отмечено уменьшение длины и массы хвои, а в качестве компенсаторного механизма наблюдается уменьшение размеров устьиц. Устьица большого размера могут увеличивать потерю воды, в то время как маленькие устьица помогают уменьшить её потери, что является важным приспособлением растений для выживания.

Ключевые слова: сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour), верхняя граница леса, хвоя, устьица.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 63–69

CLUSTERING OF SIBERIAN CEDAR PINE HABITATS ON THE SLOPES OF THE BORUS RIDGE OF THE WESTERN SAYAN

N. V. Pakharkova¹, M. A. Subbotin¹, E. A. Shikalova², I. G. Gette¹,
A. A. Kalabina¹, I. I. Cupper¹, K. M. Maksimova¹, I. V. Masentsova¹

¹Siberian Federal University
79/10, Svobodny Av., Krasnoyarsk, Russian Federation
E-mail: nina.pakharkova@yandex.ru

²Joint Directorate of the Sayano-Shushensky Nature Reserve and the Shushensky Bor National Park
7, Zapovednaya str., Shushenskoye village, Krasnoyarsk Territory, 662710, Russian Federation

Annotation. The formation of the timberline in the mountains is a complex process that depends on many simultaneously acting factors. Climatic factors are usually considered as priorities, for example, low air and soil temperatures and the associated shortened growing season. However, in mountainous areas with complex dissected relief, often not climatogenic, but landscape-like forest boundaries are formed, or mixed. A transect was laid on the territory of the Mountain Forestry of the Shushensky Bor National Park, including three test areas located at an altitude of 1347 to 1411 m above sea level, both in typical forest phytocenoses with a predominance of Siberian cedar pine (*Pinus sibirica* Du Tour) and at the upper limit of its distribution. The study revealed that during the formation of the timberline of the *Pinus sibirica* cedar advance on the slopes of the Borus Ridge, climatic factors and terrain features have a significant impact. Among the limiting factors, one can note not only a decrease in temperature as the altitude increases above sea level, but also a water shortage associated with a significant steepness of the slopes, which

* Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 23-24-00251 «Внутрипопуляционная изменчивость экофизиологических признаков деревьев сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в условиях изменения климата».

leads to an increase in surface runoff, and low-power soils are not able to retain enough moisture. Siberian pine trees growing in such conditions have a decrease in the length and weight of needles, and a decrease in the size of stomata is observed as a compensatory mechanism. Large stomata can increase water loss, while small stomata help reduce water loss, which is an important adaptation of plants for survival.

Keywords: Siberian cedar pine (*Pinus sibirica* Du Tour), timberline, needles, stomata.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с тенденцией изменения климата на более тёплый и сухой [16], актуальной задачей является изучение изменений биологических процессов различных экосистем. Верхняя граница древесной растительности особенно чувствительна к климатическим изменениям, поэтому изучение процессов, происходящих в горных лесах, является весьма актуальным [13; 14; 20].

Формирование верхней границы леса в горах – сложный процесс, который зависит от многих одновременно действующих факторов. В качестве приоритетных обычно рассматривают климатические факторы, например, низкая температура воздуха и почвы и связанный с этим укороченный вегетационный период. Однако в горных районах со сложным расчленённым рельефом часто образуются не климатогенные, а ландшафтогенные границы леса, либо смешанные [17]. В литературе при характеристике верхнего предела распространения выделяют границу лесных фитоценозов с сомкнутым древостоем (timberline), границу редколесий и криволесий (krummholz line), границу отдельно стоящих передовых деревьев с типичной стволовой формой (treeline) и предел распространения стланиковых форм древесных видов (scrub line) [2; 10; 11; 19].

Климатические условия в горных экосистемах на относительно небольшом расстоянии меняются достаточно быстро, повышение температуры воздуха на несколько градусов может вызвать сдвиг фитоценологических границ на десятки метров по высоте, что соотносимо с шириной некоторых растительных поясов в горах [5]. С другой стороны, особенности рельефа и почв, несомненно, накладывают свой отпечаток на формирование и структуру растительных сообществ и их отдельных представителей. Древесные растения, произрастающие на верхнем пределе распространения, подвержены действию различных стресс-факторов. В первую очередь, это низкие температуры, сильный ветер и невысокий снеговой покров зимой, высокая интенсивность солнечного излучения и недостаток почвенной влаги (связанный как с маломощностью почв, так и со значительным поверхностным стоком на крутых участках склонов) в летний период. Не только температура, но и осадки могут в разные периоды года являться лимитирующим фактором и приводить к снижению продуктивности хвойных лесов, в частности, сосны сибирской [8].

Труднодоступность горных лесов и, как следствие, отсутствие значительных антропогенных нарушений позволяют использовать их как полигон для изучения адаптационных механизмов экосистем в ответ на изменения климата.

Целью данной работы является изучение морфологических изменений в хвое деревьев *Pinus sibirica* при пересечении верхней границы леса на склонах хребта Борус.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на территории Национального парка «Шушенский бор», который расположен в Алтае-Саянском экорегионе на юге Красноярского края в пределах Шушенского административного района [7].

На территории Горного лесничества на северном склоне хребта Борус (рис. 1) были заложены три пробные площади для изучения распространения сосны сибирской на верхней границе леса, их координаты представлены в табл. 1.

Таблица 1
Расположение пробных площадей

Номер пробной площади	Координаты	Высота над уровнем моря, м
ПП1	N 52°48'21.4" E 091°31'04,6"	1411
ПП2	N 52°48'23.7" E 091°31'06,3"	1369
ПП3	N 52°48'26.2" E 091°31'01,1"	1347

Для среднегорного рельефа (от 1000 до 2000 м н.у.м.) характерны крутые склоны (25–40°), расчленённые водно-эрозионными процессами и покрытые обширными участками курумника [7].

Климатические показатели на территории Горного лесничества меняются с высотой местности, подчиняясь закономерностям высотно-поясной зональности. Средняя температура января у подножия гор –19 °С, в верхнем поясе до –22 °С, средняя температура июля соответственно +17 °С и +14 °С, таким образом, средняя температура с высотой понижается примерно на 3 °С [7].

Территория Горного лесничества по данным геоботанического районирования А. В. Куминовой [4], относится к Ойско-Енисейскому горно-таежному округу с преобладанием темнохвойной полидоминантной и кедровой моховой тайги. Растительный покров образуют темнохвойная полидоминантная и кедровая моховая тайга. Выше расположен подгольцово-субальпийский пояс, который в горах Западного Саяна [3], простирается от верхней границы леса до границы одиночных и куртинных деревьев. Растительный покров сформирован кедровыми, кедрово-еловыми, кедрово-лиственничными редколесьями и субальпийскими высокотравными и мелкотравными лугами; кустарниковыми зарослями.

Пробные площади (см. табл. 1) ПП2 и ПП3 находятся в таежном высотном поясе, а ПП1 – в подгольцово-субальпийском. Объектами исследования являются деревья сосны сибирской кедровой – *Pinus sibirica* Du Tour.

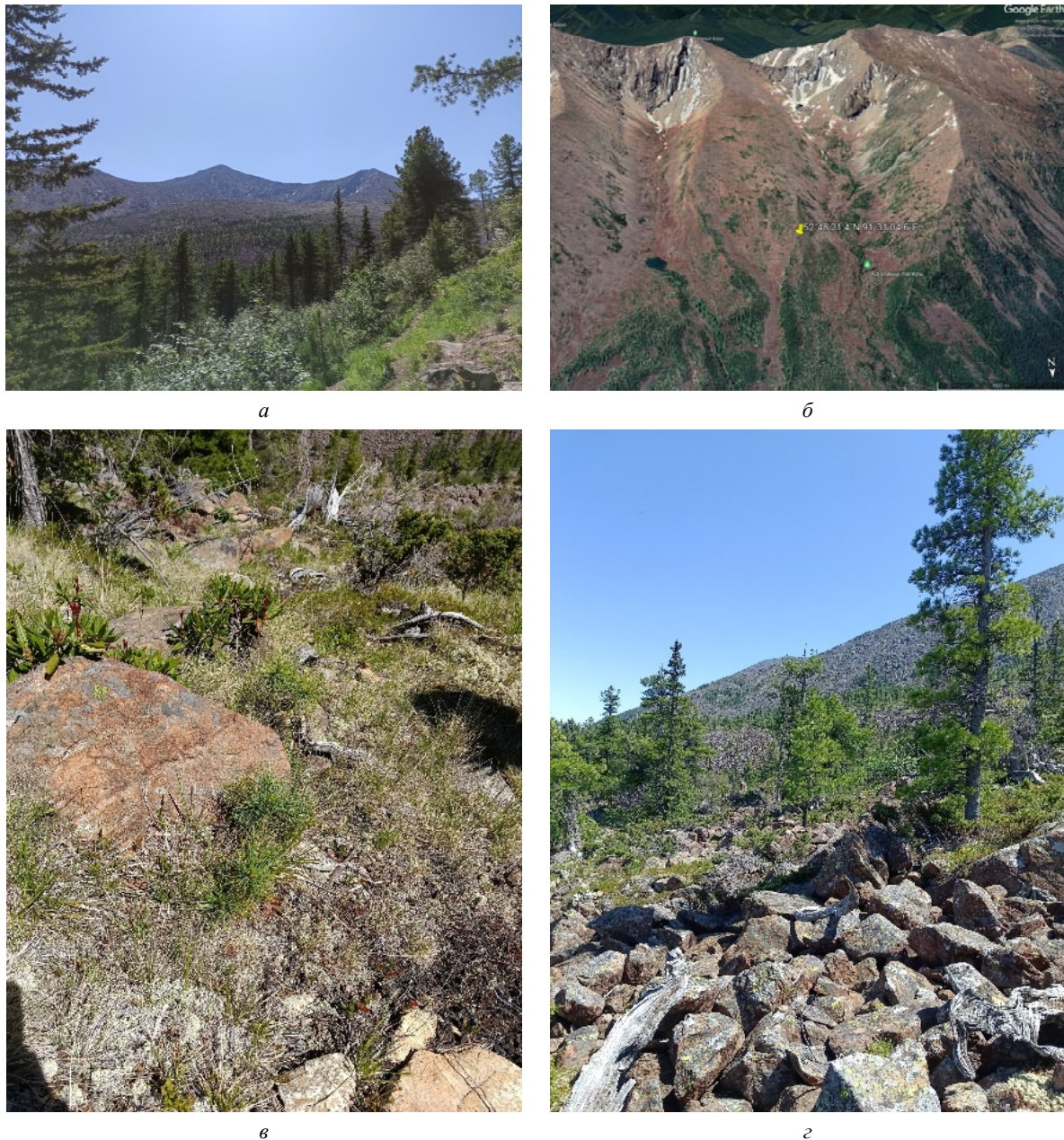


Рис. 1. Хребет Борис:

а – фотография; б – 3d-карта-схема района исследования; в – подрост; г – взрослые деревья на верхнем пределе распространения

На верхней пробной площади (ПП1), расположенной на пологой части склона, преобладало редколесье и искривленные экземпляры сосны сибирской с кроной неправильной формы, часто изреженной. На средней пробной площади (ПП2) деревья с узкими, вытянутыми вверх кронами, произрастали на склоне крутизной около 25° , а подстилающая поверхность по большей мере была представлена курумником и маломощными почвами, подверженными эрозии. Территория нижней пробной площади (ПП3) представляет собой низину склона с деревьями, растущими равномерно и относительно сомкнуто. Нужно отметить, что стланцевые формы *Pinus sibirica*, в отличие от склонов хребта Ергаки [6] на склоне Боруса практически отсутствует из-за большей крутизны верхней части склонов, покрытых курумником (сплошным нагро-

мождением крупных камней), что не позволяет подросу сосны сибирской занимать территории, становящиеся потенциально пригодными в связи с изменением климата.

Для определения возраста особей сосны сибирской и годичного радиального прироста с помощью бурава Пресслера были отобраны керны с 5 деревьев на каждой пробной площади. Определение длины хвои проводили при помощи штангенциркуля «ЭНКОР» с цифровым отсчетным устройством (0–150 мм/ 0,01 мм). С каждого бокового побега второго порядка была измерена длина 50 хвоинок. Определение сырой и абсолютной сухой массы хвои сосны сибирской проводили в лабораторных условиях. Было отобрано по 10 хвоинок с каждого побега, измерение массы проводили на аналитических весах ГОСМЕТР ВЛ-124В-С

с погрешностью $\pm 0,5$ мг. Для определения абсолютно сухой массы хвою сушили в сушильном шкафу при температуре 95 °С.

Для приготовления образцов для подсчета количества устьиц в хвое с побегов сосны сибирской кедровой, взятых с разных пробных площадей, центральные части хвои длиной 1 см были помещены на предметные стекла и зафиксированы. Фотографии поверхности хвои получены с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV100 с широкопольными объективами в отраженном свете при увеличении в 300 раз. Количество устьиц было определено на линейных отрезках 500 мкм и рассчитаны средние значения их количества и размеров для каждой пробной площади.

Снимок для расчета NDVI был взят со спутника Landsat – 8 на сайте: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Данные космоснимка: путь 141, строка 023, дата 03.08.2024, облачность 0–10 %. Расчет и составление карты проводились в программе ArcGIS.

Статистическую обработку полученных данных проводили при помощи программы STATISTICA 12. Для определения характера распределения использован критерий Колмогорова–Смирнова. Оценку различий между группами выполняли при помощи однофакторного дисперсионного анализа с последующим проведением апостериорного теста (тест Тьюки). Результаты представляли в виде $M \pm Sd$ (где M – среднее значение, Sd – стандартное отклонение). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$. Для некоторых параметров проведен иерархический кластерный анализ по методу Варда с Евклидовым расстоянием для определения меры сходства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Верхняя граница леса в горных экосистемах хребта Борус образуется в результате действия не только климатических факторов, но и рельефа, и подстилающей поверхности. Средний возраст деревьев на пробных площадях уменьшается по мере продвиже-

ния вверх по склону: на ПП3 он составляет 205 лет, на ПП2 – 140 лет и на ПП1 – 103 года.

Для обобщенной оценки растительности наиболее известным примером является использование нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), полученного на основе измерений коэффициента оптического отражения солнечного света в красном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн [12]. Как следует из данных, представленных на рис. 2, наибольшие значения NDVI (0,29–0,32) характерны для территории нижней пробной площади (ПП3), заложенной в нижней части склона в типичном фитоценозе горных темнохвойных лесов. На среднюю и верхнюю пробную площадь приходятся значения NDVI 0,23–0,28.

По данным наземных наблюдений на верхней пробной площади значительную долю в эту величину вносит кустарниковый и травяно-кустарниковый ярусы, представленные *Rhododendron aureum*, *Juniperus communis*, *Bergenia crassifolia*, *Cladonia rangiferina* и др. Можно предположить, что лучшие условия для роста и развития сосны сибирской среди исследуемых пробных площадей представлены на нижней пробной площади (ПП3), тогда как на верхней (ПП1) и средней (ПП2) проявляется действие стрессующих факторов.

В целом успешность роста и развития древесных растений можно оценить по приросту вегетативной биомассы. На рис. 3 представлены данные массы и длины хвои деревьев сосны сибирской кедровой, произрастающих на исследуемых пробных площадях.

Значения сырой и абсолютно сухой массы хвои на ПП2, расположенной в средней части трансекты, имеют статистически значимое различие с таковыми на верхней (ПП1) и нижней (ПП3) пробными площадями ($p < 0,05$). Вероятно, это связано с недостатком влаги в летний период из-за большой крутизны склона и, соответственно, значительной долей поверхностного стока.

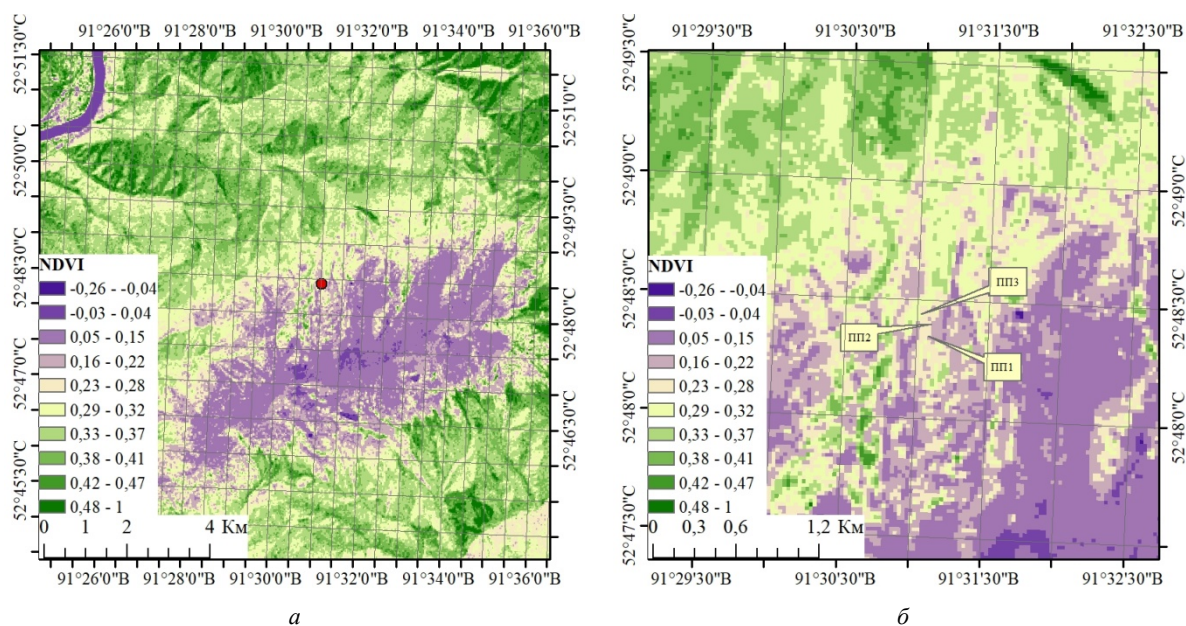


Рис. 2. Значение нормализованного вегетационного индекса (NDVI):

а – Хребет Борус; б – расположение пробных площадей

Соответственно, между деревьями, произрастающими на ПП1 и ПП3 достоверных различий по данному параметру не выявлено. По длине хвои отмечаются статистически значимые различия между всеми пробными площадями. При этом наименьшая длина хвои отмечена также у деревьев со второй пробной площади со значительной крутизной склона. Однако по результатам кластерного анализа данные по длине хвои ПП1 и ПП3 были объединены в одну группу и выделены в отдельный кластер деревья с ПП2 (см. рис. 3, в).

Водный баланс – один из основных параметров, характеризующих жизнедеятельность растений. Обязательное условие для протекания всех физиологических процессов в них – достаточное водообеспечение [1]. Для подтверждения гипотезы о выделении в качестве лимитирующего фактора для произрастания сосны сибирской кедровой на склонах хребта Борус недостаточного количества влаги в почве (на примере ПП2, расположенной в средней части склона с максимальной крутизной 25°), было проведено микроскопирование хвои для подсчета количества и размера устьиц. Данные представлены на рис. 4.

По количеству устьиц статистически достоверных различий между хвоей деревьев, произрастающих на

различной высоте над уровнем моря, не выявлено ввиду значительной вариабельности между деревьями. В целом можно отметить относительно меньшее количество устьиц в хвое с верхней и нижней пробных площадей (ПП1 и ПП3) по сравнению с хвоей со средней пробной площади (ПП2). Длина устьиц, напротив, меньше в хвое деревьев, произрастающих на крутом участке склона на второй пробной площади. Значения длины устьиц хвои на ПП2, расположенной в средней части трансекты, имеют статистически значимое различие с таковыми на верхней (ПП1) и нижней (ПП3) пробными площадями ($p < 0,05$).

Существующие данные о влиянии высоты произрастания хвойных на плотность их устьиц довольно противоречивы. Например, у ели обыкновенной наблюдается как рост, так и снижение плотности устьиц при увеличении высоты произрастания [9; 15]. У сосны обыкновенной и ели Шренка нет четкой связи между количеством устьиц на их листьях и высотой произрастания [21]. У сосны гибкой же с возрастанием высоты произрастания деревьев происходит статистически достоверное снижение количества устьиц на единицу объема хвои [18].

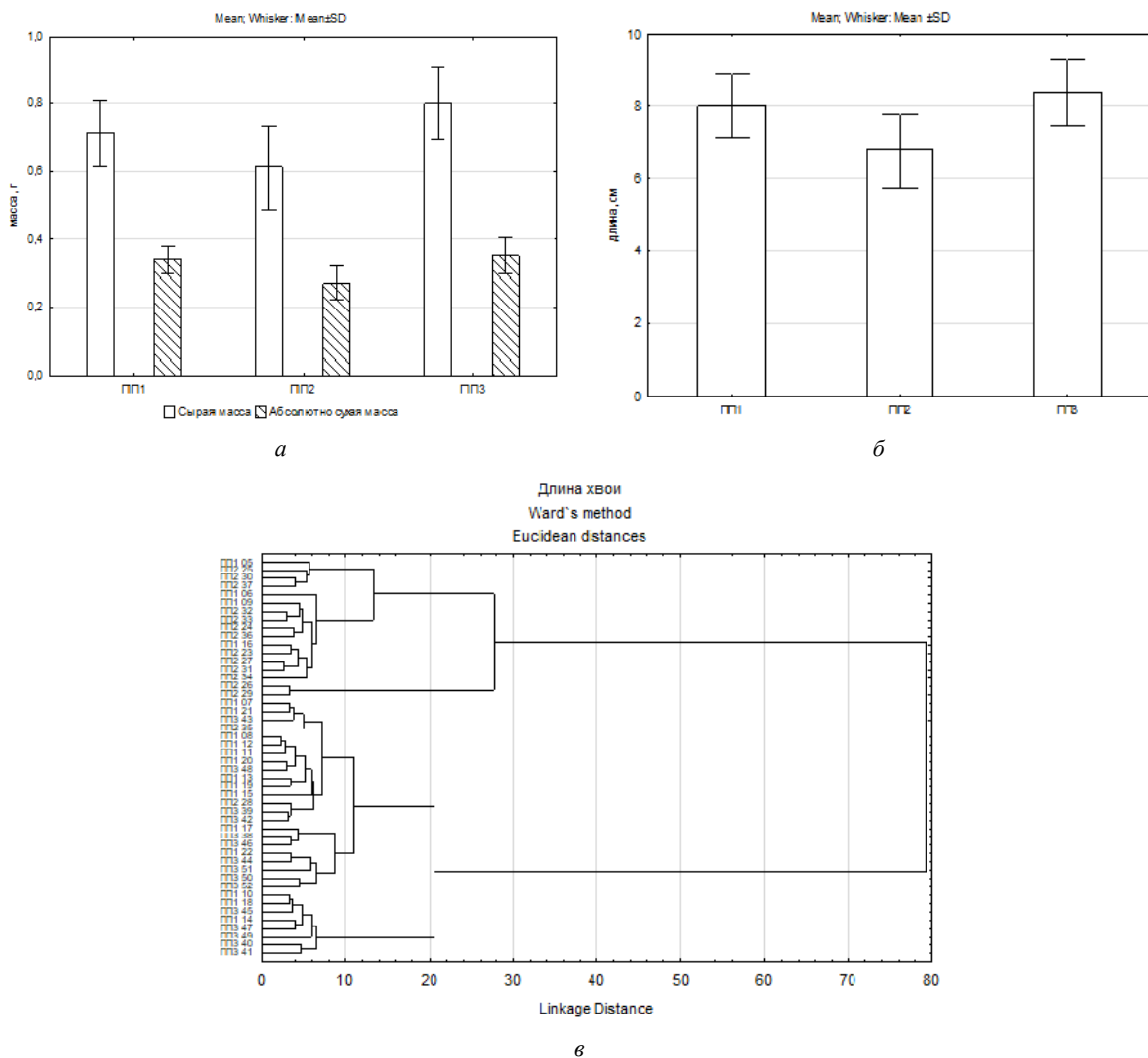


Рис. 3. Масса (а) и длина (б) хвои *Pinus sibirica* на исследуемых пробных площадях и данные кластерного анализа по параметру «длина хвои» (в). ПП1, ПП2, ПП3 – пробные площади

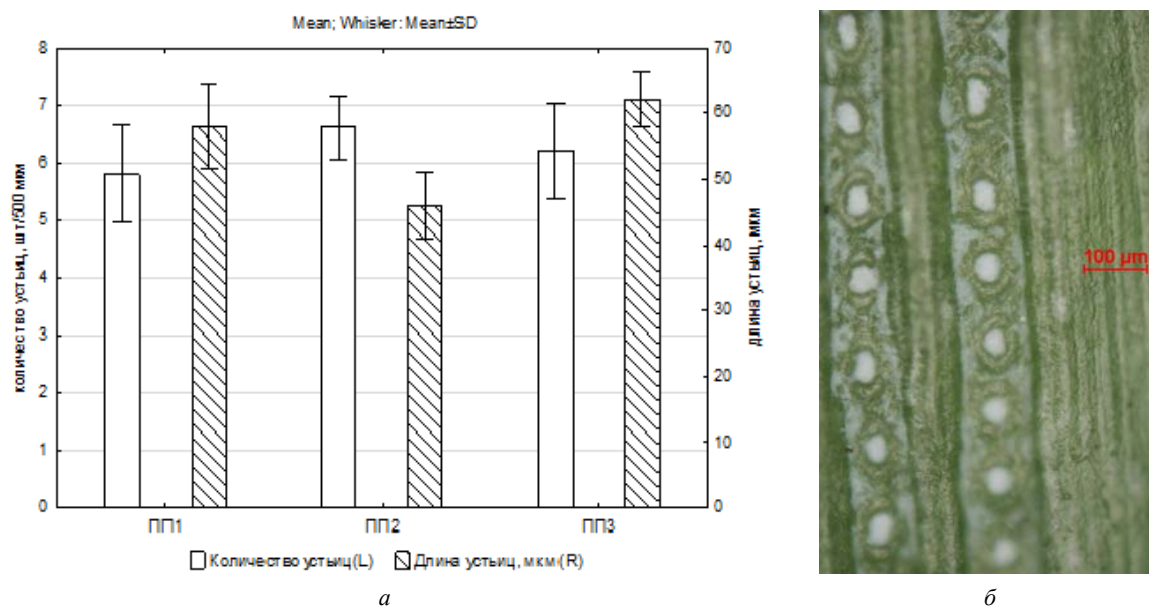


Рис. 4. Количество и длина устьиц в хвое *Pinus sibirica* на исследуемых пробных площадях (а). Пример микрофотографии для подсчёта устьиц (б). ПП1, ПП2, ПП3 – пробные площади

По мере подъема над уровнем моря, где концентрация углекислого газа уменьшается, устьичная плотность у растений, не страдающих от дефицита влаги, либо сохраняется, либо увеличивается для усиления диффузии CO_2 . Однако в условиях постоянного водного дефицита, для растений первостепенной задачей является минимизация потери влаги через транспирацию, а не поглощение углекислого газа, что достигается путем сокращения числа устьиц на единицу поверхности листа либо уменьшение их размеров, что более эффективно. Большие по размеру устьица могут увеличивать потерю воды, в то время как маленькие устьица помогают уменьшить её потери, что является важным приспособлением растений для выживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На склонах хребта Борус при формировании верхней границы распространения сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) значительное влияние оказывают не только климатические факторы, но и особенности рельефа. Среди лимитирующих факторов можно отметить как снижение температуры по мере увеличения высоты над уровнем моря, так и водный дефицит, связанный со значительной крутизной склонов, что приводит к увеличению поверхностного стока, а маломощные почвы не способны задержать достаточное количество влаги. У деревьев сосны сибирской, произрастающих в таких условиях, отмечено уменьшение длины и массы хвои, а в качестве компенсаторного механизма наблюдается уменьшение размеров устьиц, что позволяет выделить такие участки произрастания *Pinus sibirica* в отдельный кластер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Галашева А. М., Павел А. Р. Содержание свободной и связанной воды в листьях сортов яблони на карликовых подвоях // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2016. № 40(4). С. 92–102.

2. Зибзеев Е. Г., Седельников В. П. Структура экотона между лесным и высокогорным поясами гор Южной Сибири // Растит. мир Азиатской России. 2010. № 2. С. 46–49.

3. Красноборов И. М. Высокогорная флора Западного Саяна. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 377 с.

4. Куминова А. В. Геоботанические исследования в Западной и Средней Сибири. Новосибирск, 1987. 160 с.

5. Парфенова Е. И., Чебакова Н. М. Потенциальное распределение лесов в горах Южной Сибири и Серверной Монголии в связи с прогнозируемыми изменениями климата к середине века // Известия РАН. Сер. Географическая. 2023. Т. 87, № 7. С. 1019–1031.

6. Сезонные изменения пигментного комплекса хвои сосны сибирской в условиях высотной поясности Западного Саяна / Н. В. Пахарькова, И. В. Масенцова, Г. А. Сорокина [и др.] // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 22–29.

7. Справочно-информационный портал «Объединённая дирекция заповедника «Саяно-Шушенский» и национального парка «Шушенский бор» [Электронный ресурс]. URL: <http://sayanzapoved.ru/fiziko-geograficheskaja-harakteristika-2>.

8. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Данилин И. М. Прогнозирование биомассы кедровых сосен Северной Азии при изменении климата // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 410–423.

9. Чернышев В. Д., Коляда А. С. Интенсивность транспирации и содержание воды в листьях растений в горах Сихоте-Алиня // Ботанический журнал. 1982. Т. 67, № 9. С. 1276–1280.

10. Arno S. F., Hammerly R. P. Timberline: Mountain and Arctic forest frontiers. Seattle, WA, USA : The Mountaineers, 1984. 304 p.

11. Smith W. K., Johnson D. M., Reinhardt K. Alpine Forest // Ecosystem Ecology. 2009 P. 156–165.

12. Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 / J. R. East-

man, F. Sangermano, J. Rogan [et al.] // Remote Sensing. 2013. Vol. 5, No. 10. P. 4799–4818.

13. Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. Advances in Global Change Research. Springer Netherlands, 2009. 438 pp.

14. Holtmeier F. K., Broll G. Altitudinal and polar treelines in the northern hemisphere causes and response to climate change // Polarforschung. 2009. Vol. 79. P. 139–153.

15. Holzer K. Das Wachstum der Baumes in Seiner Anpassung an Zunehmende Seehöhe // Mit/Forstl. Bundes Versuchsanst. Wien. 1967. Vol. 75, № 5. P. 427–456.

16. IPCC. 2021: Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.]. Eds.; Cambridge University Press : Cambridge, UK, 2021.

17. Körner C. Alpine Treelines: Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits; Springer : Basel, Switzerland, 2012.

18. Schoettle A.W., Rochelle S. G. Morphological variation of *Pinus flexilis* (Pinaceae), a berddispersed pine, across a range of elevations // American Journal of Botany. 2000. Vol. 87, No. 12. P. 1797–1806.

19. Tranquillini W. Physiological ecology of the Alpine timberline: Tree existence at high altitudes with special reference to the European Alps (Ecological Studies, 31). Berlin ; N. Y. : Springer-Verlag, 1979. 137 p.

20. Wieser G. Alpine and Polar Treelines in A Changing Environment // Forest 2020, 11, 254).

21. Zelawski W., Góral I. Seasonal changers in the photosynthesis rate of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedling grown from seed of various provenance // Acta Soc. Bot. Pol. 1966. Vol. 35. P. 587–598.

REFERENCES

1. Galasheva A. M., Pavel A. R. Soderzhanie svobodnoj i svyazannoj vody v list'jah sortov yabloni na karlikovyh podvoyah // Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii. 2016. № 40(4). S. 92–102.

2. Zibzeev E. G. Ctruktura ekotona mezhdru lesnym i vysokogornym poyasami gor Yuzhnoj Sibiri / E. G. Zibzeev, V. P. Sedel'nikov // Rastit. mir Aziatskoj Rossii. 2010. № 2. S. 46–49.

3. Krasnoborov I. M. Vysokogornaya flora Zapadnogo Sayana. Novosibirsk : Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1976. 377 s.

4. Kuminova A. V. Geobotanicheskie issledovaniya v Zapadnoj i Srednej Sibiri. Novosibirsk, 1987. 160 s.

5. Parfenova E. I., Chebakova N. M. Potencial'noe raspredelenie lesov v gorah Yuzhnoj Sibiri i Severnoj Mongolii v svyazi s prognoziruemyimi izmeneniyami klimata k seredine veka // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2023. T. 87, № 7. S. 1019–1031.

6. Sezonnye izmeneniya pigmentnogo kompleksa hvoi sosny sibirskoj v usloviyah vysotnoj poyasnosti Zapadnogo Sayana / Pahar'kova N. V., Masencova I. V., Sorokina G. A. [i dr.] // Hvojnye boreal'noj zony. 2024. T. 42, № 2. S. 22–29.

7. Spravochno-informacionnyj portal "Ob"edinyonnaya direkciya zapovednika "Sayano-Shushenskij" i nacional'nogo parka "Shushenskij bor" [Elektronnyj resurs]. URL: <http://sayanzapoved.ru/fiziko-geograficheskaja-harakteristika-2>.

8. Usol'cev V. A., Cepordej I. S., Danilin I. M. Prognozirovanie biomassy kedrovych sosen Severnoj chasti Azii pri izmenenii klimata // Hvojnye boreal'noj zony. 2022. T. 40, № 5. S. 410–423.

9. Chernyshev V. D., Kolyada A. S. Intensivnost' transpiracii i sodержanie vody v list'yah rastenij v gorah Sihote-Alinya // Botanicheskij zhurnal. 1982. T. 67, № 9. S. 1276–1280.

10. Arno S. F., Hammerly R. P. Timberline: Mountain and Arctic forest frontiers. Seattle, WA, USA : The Mountaineers, 1984. 304 p.

11. Alpine Forest / W. K. Smith, D. M. Johnson, K. Reinhardt // Ecosystem Ecology. 2009 P. 156–165.

12. Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 / J. R. Eastman, F. Sangermano, J. Rogan [et al.] // Remote Sensing. 2013. Vol. 5, No. 10. P. 4799–4818.

13. Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. Advances in Global Change Research. Springer Netherlands, 2009. 438 pp.

14. Holtmeier F. K., Broll G. Altitudinal and polar treelines in the northern hemisphere causes and response to climate change // Polarforschung. 2009. Vol. 79. P. 139–153.

15. Holzer K. Das Wachstum der Baumes in Seiner Anpassung an Zunehmende Seehöhe // Mit/Forstl. Bundes Versuchsanst. Wien. 1967. Vol. 75, № 5. P. 427–456.

16. IPCC. 2021: Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.]. Eds. Cambridge University Press : Cambridge, UK, 2021.

17. Körner C. Alpine Treelines: Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits; Springer: Basel, Switzerland, 2012.

18. Schoettle A. W., Rochelle S. G. Morphological variation of *Pinus flexilis* (Pinaceae), a berddispersed pine, across a range of elevations // American Journal of Botany. 2000. Vol. 87, No. 12. P. 1797–1806.

19. Tranquillini W. Physiological ecology of the Alpine timberline: Tree existence at high altitudes with special reference to the European Alps (Ecological Studies, 31). Berlin ; N. Y. : Springer-Verlag, 1979. 137 p.

20. Wieser G. Alpine and Polar Treelines in A Changing Environment // Forest 2020, 11, 254.

21. Zelawski W., Góral I. Seasonal changers in the photosynthesis rate of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedling grown from seed of various provenance // Acta Soc. Bot. Pol. 1966. Vol. 35. P. 587–598.

© Пахарькова Н. В., Субботин М. А.,
Шикалова Е. А., Гетте И. Г., Калабина А. А.,
Куппер И. И., Максимова К. М.,
Масенцова И. В., 2025

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.093:047

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-2-70-76

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 2. С. 70–76

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАСКРОЯ БРЁВЕН И СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

В. В. Огурцов, А. А. Орлов, Д. В. Дук

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vogurtsov@mail.ru

Аннотация. Гармонизация функционирования поточных линий лесопильного и сушильного цехов является проблемой при создании и эксплуатации предприятий с массовой крупно-поточной технологией. В настоящее время она обостряется тем, что требование «вытеснить не более 8 сечений» практически не выполняется из-за большого количества мелких заказов, которые не поддаются группированию и унификации.

Для синхронизации процессов раскроя брёвен и сушки пиломатериалов система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с ожиданием. Для её описания применён специальный вид разомкнутой марковской цепи «процессов гибели и размножения».

Используя размеченный граф состояний системы, получена матрица для марковских переходов, дифференциальные уравнения Колмогорова и выражения для основных операционных характеристик системы: вероятности полной загрузки сушильных туннелей (коэффициента полезного использования туннелей); ёмкости накопителя штабелей; времени ожидания штабелей в накопителе.

Ключевые слова: распиловка, пиломатериал, накопитель, туннель, синхронизация, сушка.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 70–76

IDENTIFICATION OF THE PROBLEM OF SYNCHRONIZATION OF LOG CUTTING AND SAWN TIMBER DRYING PROCESSES

V. V. Ogurtsov, A. A. Orlov, D. V. Duk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: vogurtsov@mail.ru

Annotation. Harmonization of the flow lines of sawmills and drying shops is a problem in the foundation and operation of enterprises with large-scale mass flow technology. At present, it is aggravated by the fact that the requirement to “cut no more than 8 sections” is practically not met due to a large number of small orders that cannot be grouped and unified.

To synchronize the processes of cutting logs and drying lumber, the “stack accumulator – drying tunnels” system is presented as a multi-channel mass service system with waiting. A special type of open Markov chain of “death and reproduction processes” is used to describe it.

Using the marked graph of system states, a matrix for Markov transitions, Kolmogorov differential equations and expressions for the main operational characteristics of the system are obtained: the probability of full loading of drying tunnels (the efficiency of tunnels); the capacity of the stack accumulator; the waiting time of stacks in the accumulator.

Keywords: sawing, lumber, storage unit, tunnel, synchronization, drying.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее остро проблема гармонизации функционирования отдельных поточных линий, образующих единый производственный процесс лесопиления, стоит при создании и эксплуатации предприятий с массовой крупно-поточной технологией [1–4]. Её реше-

ние обеспечивается введением участков накопления партий запуска (межлинейных запасов) обрабатываемых материалов (рис. 1).

Традиционно считается, что гармонизация производственного процесса лесопиления в основном обеспечивается оптимизацией партии запуска пиломате-

риалов перед участком окончательной обработкой пиломатериалов после сушки. Для эффективной работы этого участка настраиваются соответствующим образом все предшествующие цеха и участки, начиная от участка подготовки пиловочника к раскрою и заканчивая операцией окончательной обработки сухих пиломатериалов. Оптимизируется дробность сортировки брёвен по толщине [3; 4; 14–17], количество сечений пиломатериалов в поставе [2], а также градация длин досок [1; 3]. В частности, рекомендуется выпиливать в рамках технологического периода не более 8 сечений [3]. При этом считается, что вопросы формирования партии запуска штабелей пиломатериалов перед камерной сушкой не требуют специального рассмотрения, так как они автоматически решаются при реализации мероприятий по минимизации партии запуска перед линией окончательной обработкой пиломатериалов

после сушки. Это объясняется тем, что в сушильный штабель помещают доски разных ширин, снижая в 3–5 раз количество сорторазмеров пиломатериалов, напрямую влияющих на объём партии запуска штабелей перед камерной сушкой. Учитывая это и минимизируя затраты на производства и эксплуатацию цеха сушки пиломатериалов, перед камерами непрерывного действия (туннелями), как правило, предусматривают участок накопления штабелей, ёмкость которого достигает суммарной ёмкости всех туннелей. Предполагается, что буферный задел штабелей такой ёмкости обеспечивает бесперебойную работу сушильных туннелей при выполнении условий выработки не более 8 сечений пиломатериалов в течение технологического периода. На рис. 2 представлена структура цеха камерной сушки пиломатериалов крупно-поточного лесопильного производства [3; 5].

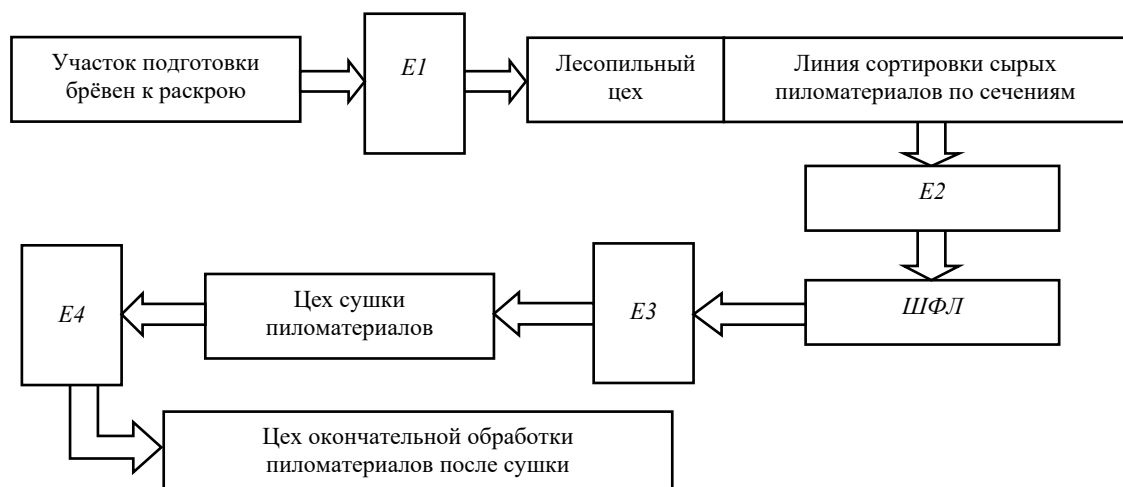


Рис. 1. Схема размещения межлинейных запасов:

E1 – партия запуска брёвен; *E2* – партия запуска пакетов (пачек) пиломатериалов перед штабелеформирующей линией (ШФЛ); *E3* – партия запуска штабелей (накопитель штабелей) перед камерной сушкой; *E4* – партия запуска пиломатериалов перед окончательной обработкой пиломатериалов

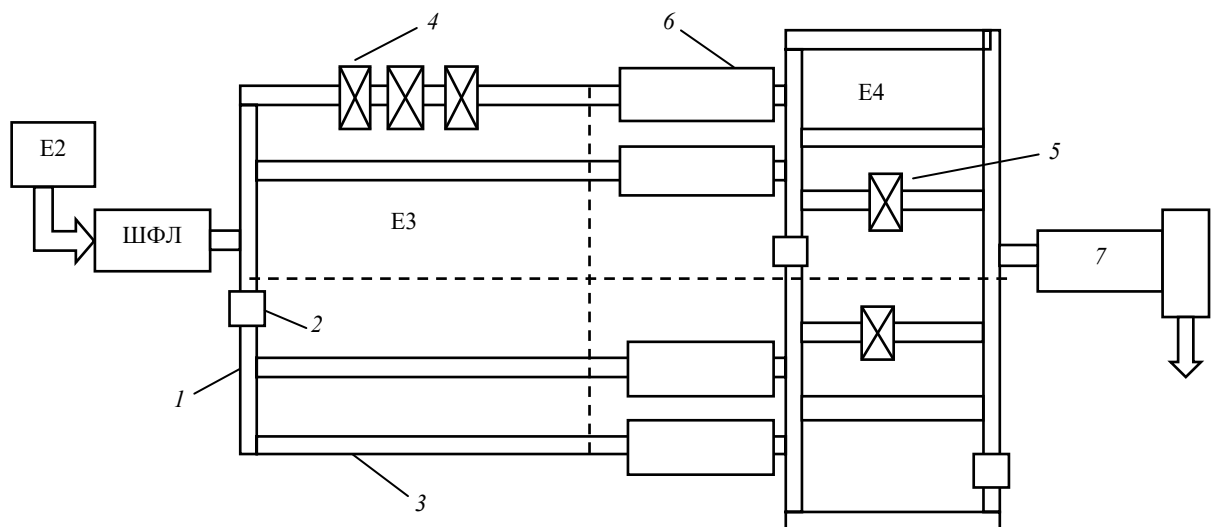


Рис. 2. Структура цеха камерной сушки пиломатериалов:

1 – траверсный путь; 2 – траверсная тележка; 3 – рельсовый путь перед туннелем; 4 – штабеля сырых пиломатериалов; 5 – штабеля сухих пиломатериалов; 6 – сушильные камеры непрерывного действия (туннели); 7 – цех окончательной обработки пиломатериалов после сушки

В настоящее время на крупно-поточных предприятиях практически не выполняется требование «выпиливать не более 8 сечений» из-за большого количества мелких заказов со специфическими сечениями пиломатериалов, которые не поддаются группированию и унификации. Встаёт вопрос ёмкости буферного накопителя штабелей для обеспечения оптимального функционирования сушильных туннелей при реально существующем количестве сечений пиломатериалов и закономерностях их поступления из лесопильного цеха. Для ответа на этот вопрос необходимо иметь общие закономерности: накопления штабелей пиломатериалов перед сушильными туннелями; полной загрузки туннелей штабелями; времени ожидания штабелей в накопителе при различных характеристиках процессов распиловки брёвен и сушки пиломатериалов.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим задачу определения ёмкости буферного накопителя перед блоком сушильных туннелей как типовую задачу теории массового обслуживания [7]. Воспользуемся унифицированной терминологией и обозначениями, общепринятыми в теории массового обслуживания и называемыми обозначениями Кендалла [8].

В качестве обслуживающей системы принимаем часть буферного накопителя штабелей $EЗ$ и сушильные туннели, выделенные для пиломатериалов данной толщины. Дисциплина очереди (порядок выбора штабелей из очереди) – случайная. Механизм обслуживания – мультиканальный с параллельным функционированием c туннелей (каналов) и единичный, так как в туннель загружаются штабеля «по одному».

Интервал времени, через который штабелеформирующая линия ($ШФЛ$) выдаёт очередной штабель, является случайной величиной, а входной поток штабелей на буферный накопитель является пуассоновским [6–10] (стационарным, ординарным и не обладающим памятью), поскольку $ШФЛ$ выдаёт по одному штабелю и процесс формирования очередного штабеля не зависит от «шкалы времени». Такие процессы называют марковскими цепями (M -процессами) [6; 7; 13], так как будущее состояние системы «буферный накопитель – сушильные туннели» зависит от настоящего состояния системы и не зависит от предыдущего. Плотность распределения времени t между любой парой смежных поступлений штабелей для такого потока описывается экспоненциальным законом [6–8]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

со средним значением $1/\lambda$ и дисперсией $1/\lambda^2$; где λ – среднее число штабелей, поступающих в систему в сутки; $1/\lambda$ – среднее значение времени между поступлениями штабелей.

С позиций функционирования рассматриваемой обслуживающей системы имеет принципиальное значение состояние только загрузочной части туннеля, а именно, свободна или занята первая позиция туннеля. То есть, для системы массового обслуживания состояние туннеля, когда занята только первая позиция туннеля и состояние, когда заняты все его позиции – эквивалентны. Обязательной характеристикой функционирования системы является средняя интенсивность μ , с которой освобождается первая позиция туннеля. Следует отметить, что в стационарном режиме среднее число штабелей, прошедших через первую позицию одного туннеля в сутки, равно среднему числу выгруженных штабелей сухих пиломатериалов за сутки из этого туннеля. Поэтому можно считать, что μ является средней интенсивностью сушки пиломатериалов. Процессы такого рода называются процессами чистой гибели [7].

Процесс продвижения штабелей через туннели также считается пуассоновским, а плотность распределения времени t нахождения штабелей на первых позициях туннелей также имеет экспоненциальный вид:

$$l(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad (2)$$

где μ – среднее число штабелей, прошедших через первую позицию одного туннеля в сутки.

Коэффициент загрузки первой позиции туннеля (трафик интенсивности) определяется выражением:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3)$$

Таким образом, рассматриваемый процесс массового обслуживания описывается типовой моделью $M/M/S$, где первый символ M обозначает экспоненциальное распределение интервалов времени между моментами поступления штабелей в буферный накопитель $EЗ$, а второй символ M – экспоненциальное распределение интервалов времени между моментами их загрузки в сушильные туннели.

Для описания причинно-следственных связей состояний системы «накопитель штабелей – сушильные туннели» воспользуемся специальным видом разомкнутой марковской цепи, который применяется в теории массового обслуживания для «процессов гибели и размножения» [10–12]. Размеченный (с указанием интенсивностей переходов) граф состояний системы представлен на рис. 3.

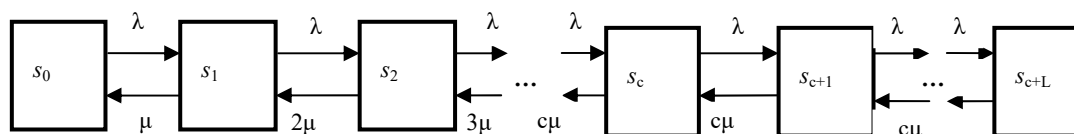


Рис. 3. Граф состояний системы:

S_0 – все туннели свободны для загрузки штабелей; S_1 – занят один туннель; S_2 – занято два туннеля; ... S_c – заняты все c туннелей и нет очереди в накопителе; S_{c+1} – заняты c туннелей и один штабель находится в накопителе; S_{c+L} – заняты c туннелей и L штабелей – в накопителе

Из рис. 3 видно, что средняя интенсивность λ поступления штабелей в систему не зависит от состояния системы, а средняя интенсивность μ освобождения туннелей для загрузки возрастает между состояниями $S_0, S_1, S_2, \dots S_c$ от μ до $c\mu$, а затем не меняется, так как μ пропорциональна количеству занятых туннелей.

Используя размеченный граф состояний системы, получаем матрицу Λ для марковских переходов, опи-

сывающих поведение системы в моменты времени, разделённые интервалом $1/\mu$. При формировании данной матрицы учитывается, что сумма элементов каждой строки равна нулю. Это свойство [7] используется для определения диагональных элементов матрицы. Для упрощения и наглядности примем, что количество туннелей $c = 4$.

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & -(\lambda+\mu) & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & -(\lambda+2\mu) & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & -(\lambda+3\mu) & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\mu & -(\lambda+4\mu) & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu & -(\lambda+4\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu & -(\lambda+4\mu) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_c \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{P}_1 = {}_{\Lambda} \bar{P} \quad (6)$$

где $\bar{P}_1$ – система дифференциальных уравнений Колмогорова; P_0 – вероятность того, что в системе нет штабелей (во всех c туннелях есть свободные для загрузки места); P_1 – вероятность того, что один туннель занят штабелями; P_2 – вероятность того, что два туннеля заняты штабелями; P_c – вероятность того, что все c туннелей заняты штабелями; P_n – вероятность того, что в системе находятся n штабелей.

Тогда систему уравнений Колмогорова имеет вид [7]:

$$\begin{aligned} dP_0 / dt &= -\lambda P_0 + \mu P_1, \\ dP_1 / dt &= \lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2, \\ dP_2 / dt &= \lambda P_1 - (\lambda + 2\mu) P_2 + 3\mu P_3, \\ dP_3 / dt &= \lambda P_2 - (\lambda + 3\mu) P_3 + 4\mu P_4, \\ dP_4 / dt &= \lambda P_3 - (\lambda + 4\mu) P_4 + 4\mu P_5, \\ dP_5 / dt &= \lambda P_4 - (\lambda + 4\mu) P_5 + 4\mu P_6, \\ dP_6 / dt &= \lambda P_5 - (\lambda + 4\mu) P_6 + 4\mu P_7. \end{aligned} \quad (7)$$

Обобщая дифференциальные уравнения, получаем:

$$\begin{aligned} dP_n / dt &= \lambda P_{n-1} - (\lambda + n\mu) P_n + (n+1)\mu P_{n+1} \text{ при } n < C, \\ dP_n / dt &= \lambda P_{n-1} - (\lambda + c\mu) P_n + c\mu P_{n+1} \text{ при } n \geq C. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как все состояния рассматриваемой системы существенные (в каждую можно вернуться) и сообщающиеся (соединены разнонаправленными ориентированными рёбрами), то состояния марковской цепи являются предельными (финальными). Для нахождения предельных вероятностей, соответствующих стационарному режиму функционирования системы, положим $dP_i/dt = 0$, $i = \overline{1, n}$. В результате получим систему алгебраических уравнений с бесконечным множеством решений [7]:

$$\begin{aligned} -\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0, \\ \lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2 &= 0, \\ \lambda P_1 - (\lambda + 2\mu) P_2 + 3\mu P_3 &= 0, \\ \lambda P_2 - (\lambda + 3\mu) P_3 + 4\mu P_4 &= 0, \\ \lambda P_3 - (\lambda + 4\mu) P_4 + 4\mu P_5 &= 0, \\ \lambda P_4 - (\lambda + 4\mu) P_5 + 4\mu P_6 &= 0, \\ \lambda P_5 - (\lambda + 4\mu) P_6 + 4\mu P_7 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Для преодоления неопределённости в выборе решений полученной системы уравнений используется условие [7]:

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1. \quad (10)$$

Из выражений (9) находим:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0. \quad (11)$$

Видим, что вероятность состояния системы S_1 получается из вероятности предыдущего состояния S_0 путём умножения на интенсивность входного потока λ и деления на интенсивность μ освобождения туннеля. Тогда, применяя метод математической индукции [7] и учитывая, что интенсивность освобождения мест в туннелях возрастает от μ до 4μ , а затем не изменяется, получаем:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{\lambda}{2\mu} P_1 = \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0, \\ P_3 &= \frac{\lambda}{3\mu} P_2 = \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0, \end{aligned}$$

$$P_4 = \frac{\lambda}{4\mu} P_3 = \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0,$$

$$P_5 = \frac{\lambda}{4\mu} P_4 = \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0,$$

$$P_6 = \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} \frac{\lambda}{\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0. \quad (12)$$

Учитывая, что $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, получаем:

$$P_1 = \frac{\rho}{1!} P_0, \quad P_2 = \frac{\rho^2}{2!} P_0, \quad P_3 = \frac{\rho^3}{3!} P_0,$$

$$P_4 = \frac{\rho^4}{4!} P_0, \quad P_5 = \frac{\rho^5}{4!*4} P_0,$$

$$P_6 = \frac{\rho^6}{4!*4*4} P_0, \quad P_7 = \frac{\rho^7}{4!*4*4*4} P_0. \quad (13)$$

Из выражения (10) следует, что $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots = 1$, тогда

$$\begin{aligned} P_0 + \frac{\rho}{1!} P_0 + \frac{\rho^2}{2!} P_0 + \frac{\rho^3}{3!} P_0 + \frac{\rho^4}{4!} P_0 + \frac{\rho^5}{4!*4} P_0 + \\ + \frac{\rho^6}{4!*4*4} P_0 + \frac{\rho^7}{4!*4*4*4} P_0 + \dots = 1, \\ P_0 \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} + \frac{\rho^5}{4!*4} + \frac{\rho^6}{4!*4^2} + \frac{\rho^7}{4!*4^3} + \dots \right) = 1, \\ P_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} + \left(1 + \frac{\rho}{4} + \frac{\rho^2}{4^2} + \frac{\rho^3}{4^3} + \dots \right) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Нетрудно видеть, что выражение в скобке является геометрической прогрессией со знаменателем $\frac{\rho}{4} < 1$.

Поэтому справедливо равенство:

$$1 + \frac{\rho}{4} + \frac{\rho^2}{4^2} + \frac{\rho^3}{4^3} + \dots = \frac{1}{1 - \frac{\rho}{4}}. \quad (15)$$

Обобщая полученные результаты и переходя от конкретных четырёх туннелей к любому их количеству (c), получаем выражения для вероятностей состояний системы «накопитель штабелей – сушильные туннели»:

$$P_n = \frac{\rho^n}{n!} P_0 \text{ при } c > n > 0,$$

$$P_n = \frac{\rho^n}{C! C^{n-C}} P_0 \text{ при } n \geq c,$$

$$P_0 = \left(\sum_{j=0}^{c-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^c}{C! \left(1 - \frac{\rho}{C} \right)} \right)^{-1}. \quad (16)$$

Полученные выражения соответствуют типовым [7–10] выражениям. Это подтверждает то, что рассматриваемая система относится к мультиканальным системам массового обслуживания с параллельным функционированием c каналов и ожиданием [6].

Имея выражение для P_0 , находим с помощью алгебраических действий [7] важнейшие операционные характеристики для рассматриваемой системы массового обслуживания:

$$P_{\text{пз}} = \frac{\rho^c}{C! \left(1 - \frac{\rho}{C}\right)} P_0, \quad (17)$$

$$L_q = \frac{\rho^{c+1}}{(C-1)!(C-\rho)^2} P_0, \quad (18)$$

$$L_q = P_{\text{пз}} \frac{\rho}{c-\rho}, \quad (19)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}, \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{Q_{\text{сут}}^{\text{пм}} \Delta_{\text{тол}}^j}{K_{\text{тол}}^j H_{\text{шт}} B_{\text{шт}} L_{\text{шт}} K_{\text{шт}}^j}, \quad (21)$$

$$\mu = \frac{24E_{\text{тон}}}{\tau_{\text{суш}}^j}, \quad (22)$$

где $P_{\text{пз}}$ – вероятность полной загрузки туннелей; L_q – среднее количество штабелей в накопителе; W_q – среднее время нахождения штабеля в накопителе, сутки; $Q_{\text{сут}}^{\text{пм}}$ – объём пиломатериалов, м³ в сутки; $\Delta_{\text{тол}}^j$ – доля пиломатериалов J -й группы толщин: тонких ($j = 1$) или толстых ($j = 2$); $K_{\text{тол}}^j$ – количество толщин J -й группы толщин; $H_{\text{шт}} B_{\text{шт}} L_{\text{шт}}$ – габаритные размеры сушильного штабеля, м; $K_{\text{шт}}^j$ – коэффициент объёмного заполнения штабеля пиломатериалами j -й толщины; $E_{\text{тон}}$ – ёмкость туннеля, количество штабелей; $\tau_{\text{суш}}^j$ – время сушки пиломатериалов j -й толщины, час.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гармонизация функционирования поточных линий лесопильного и сушильного цехов является проблемой при создании и эксплуатации предприятий с массовой крупно-поточной технологией.

2. При синхронизации процессов раскря брёвен и сушки пиломатериалов система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с ожиданием.

3. Для описания системы «накопитель штабелей – сушильные туннели» применён специальный вид разомкнутой марковской цепи для «процессов гибели и размножения».

4. Используя размеченный граф состояний системы, получена матрица для марковских переходов, дифференциальные уравнения Колмогорова и выражения для основных операционных характеристик системы: вероятности полной загрузки сушильных туннелей (коэффициента полезного использования туннелей); ёмкости накопителя штабелей; времени ожидания штабелей в накопителе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Турушев В. Г. Технологические основы автоматизированного производства пиломатериалов. М. : Лесная пром-сть, 1975. 208 с.
2. Калитеевский Р. Е. Технология лесопиления. М. : Лесная пром-сть, 1986. 264 с.
3. Калитеевский Р. Е. Лесопиление в 21 веке. Технология, оборудование, менеджмент. 2-е изд., испр. и доп. СПб. : ПрофиКС, 2008. 496 с.
4. Огурцов В. В. Теория брусо-развальной распиловки брёвен : монография. Красноярск : СибГТУ, 2013. 233 с.
5. Калитеевский Р. Е., Артеменко А. М., Тамби А. А. Информационные технологии в лесопилении. СПб. : Профи, 2010. 191 с.
6. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 3. М. : Мир, 1973. 501 с.
7. Таха Х. Введение в исследование операций. Т. 2. М. : Мир, 1985. 496 с.
8. Трухан А. А., Кудряшев Г. С. Теория вероятностей в инженерных приложениях. Иркутск : «ООО Форвард», 2009. 364 с.
9. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М. : Машиностроение, 1979. 432 с.
10. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М. : Наука, 1988. 480 с.
11. Новиков Д. А. Сетевые структуры и организационные системы. М. : ИПУ РАН, 2003. 102 с.
12. Оре О. Теория графов. М. : Наука, 1968. 352 с.
13. Введение в общие цепи Маркова : учеб.-метод. пособие / А. В. Зорин, В. А. Зорин, Е. В. Пройдакова, М. А. Федоткин. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2013. 51 с.
14. Огурцов В. В., Каргина Е. В., Матвеева И. С. Двухкритериальная математическая модель оптимизации дробности сортировки брёвен по толщине // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. XLII, № 4. С. 89–94.
15. Makkonen M. Renewing the sawmill industry: studies on innovation, customer value and digitalization. Academic Dissertation. Helsinki, Finland, University of Helsinki, 2019. 65 p.
16. Johansson J. Mechanical processing for improved products made from Swedish hardwood // Acta Wexionensia 2008. Vol. 157. P. 58.
17. Chang S. J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced // Forest Products Journal. 2009. 59 (11-12). P. 56–59. DOI: 10.13073/0015-7473-59.11.56.

REFERENCES

1. Turushev V. G. Tekhnologicheskie osnovy avtomatizirovannogo proizvodstva pilomaterialov. M. : Lesnaya promyshlennost', 1975. 208 s.
2. Kaliteevskij R. E. Tekhnologiya lesopileniya. M. : Lesnaya promyshlennost', 1986. – 264 s.
3. Kaliteevskij R. E. Lesopilenie v 21 veke. Tekhnologiya, oborudovanie, menedzhment. Izdanie vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe. SPb. : ProfiKS, 2008. 496 s.

4. Ogurcov V. V. Teoriya bruso-razval'noj raspilovki bryoven: monografiya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2013. 233 s.

5. Informacionnye tekhnologii v lesopilenii / R. E. Kaliteevskij, A. M. Artemenko, A. A. Tambi. Sankt-Peterburg : Profi, 2010. 191 s.

6. Vagner G. Osnovy issledovaniya operacij. T. 3. M. : Mir, 1973. 501 s.

7. Taha H. Vvedenie v issledovanie operacij. T. 2. M. : Mir, 1985. 496 s.

8. Truhan A. A., Kudryashev G. S. Teoriya veroyatnostej v inzhenernyh prilozheniyah. Irkutsk : "ООО Forward", 2009. 364 s.

9. Klejnrok L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. M. : Mashinostroenie, 1979. 432 s.

10. Ventcel'E. S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostej i eyo inzhenernye prilozheniya. M. : Nauka, 1988. 480 s.

11. Novikov D. A. Setevye struktury i organizacionnye sistemy. M. : IPU RAN, 2003. 102 s.

12. Ore O. Teoriya grafov. M. : Nauka, 1968. 352 s.

13. Vvedenie v obshchie cepi Markova : uchebno-metodicheskoe posobie / A. V. Zorin, V. A. Zorin, E. V. Projdakova, M. A. Fedotkin. Nizhnij Novgorod : Nizhegorodskij gosuniversitet, 2013. 51 s.

14. Ogurcov V. V., Kargina E. V., Matveeva I. S. Dvuhkriterial'naya matematicheskaya model' optimizacii drobnosti sortirovki bryoven po tolshchine // Hvojnye boreal'noj zony. 2024. T. XLII, № 4. S. 89–94.

15. Makkonen M. Renewing the sawmill industry: studies on innovation, customer value and digitalization. Academic Dissertation. Helsinki, Finland, University of Helsinki, 2019. 65 p.

16. Johansson J. Mechanical processing for improved products made from Swedish hardwood // Acta Wexionensia 2008. Vol. 157. P. 58.

17. Chang S. J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced // Forest Products Journal. 2009. 59 (11-12). P. 56–59. DOI: 10.13073/0015-7473-59.11.56.

© Огурцов В. В., Орлов А. А., Дук Д. В., 2025

Поступила в редакцию 20.02.2025
Принята к печати 25.04.2025

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАСС ДВИЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАШИН
НА СКЛОНЕ ОТТАИВАЮЩЕГО ПОЧВОГРУНТА
С УЧЕТОМ МАНЕВРИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ***

**В. Я. Шапиро¹, М. С. Новиков², И. В. Григорьев², П. Н. Перфильев³,
Е. А. Тихонов⁴, В. П. Друзьянова⁵**

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Российская Федерация, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., 5

²Арктический государственный агротехнологический университет
Российская Федерация, 677007, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3

³Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17

⁴Петрозаводский государственный университет
Российская Федерация, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. Ленина, 33

⁵Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Российская Федерация, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58

Аннотация. На производительность трелевочных систем большее влияние оказывает среднее расстояние трелевки, которое определяется размерами лесосеки, местом расположения верхнего склада (погрузочного пункта), принятой схемой разработки лесосеки, и несущей способностью почвогрунтов. Данный показатель оказывает влияние на коэффициент удлинения пути за счет маневрирования. При прочих равных условиях, чем ниже несущая способность почвогрунтов, тем больше приходится маневрировать, тем больше становится среднее расстояние трелевки, тем меньше производительность и больше удельная энергоемкость работ. Известно, что при работе на слабонесущих почвогрунтах трелевочные тракторы вынуждены идти галсами до 70 % всего времени грузового хода. Вместе с тем, вопросам влияния маневрирования лесных машин и трелевочных систем на склонах на многолетней мерзлоте пока еще не было уделено должного внимания, хотя очевидно, что это существенным образом сказывается на их экологической и эксплуатационной эффективности. В статье показано, что особое внимание к выбору направлений трелевочных волоков и технологических коридоров с точки зрения возможных маневров движителя должно быть уделено условиям работ на крутых и очень крутых склонах, регламентирующих минимальные отклонения от магистрального направления движения лесной машины или трелевочной системы. Доказано, что при планировании лесозаготовительных работ на склонах оттаивающих почвогрунтов гидрогеологическим и техническим службам лесопромышленных предприятий и лесохозяйственных организаций необходимо произвести районирование участков по критерию влажности и составить их классификацию. Кроме этого установлено, что для каждой категории участков необходимо произвести оценку работоспособности трасс движения – трелевочных волоков и технологических коридоров с указанием допустимых диапазонов глубины колеи и угла маневрирования лесных машин или трелевочных систем.

Ключевые слова: леса на склонах, леса на многолетней мерзлоте, лесозаготовки, лесные машины, трелевочные системы, деформация почвогрунта, колеобразование, маневрирование лесных машин.

* Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative developments in the field of the logging industry and forestry” of the Arctic State Agrotechnological University. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

ASSESSMENT OF FOREST MACHINE TRACKS OPERABILITY ON THE SLOPE OF THAWING SOIL TAKING INTO ACCOUNT MANOEUVRING OF THE VEHICLE

V. Ya. Shapiro¹, M. S. Novikov², I. V. Grigorev², P. N. Perfiliev³, E. A. Tikhonov⁴, V. P. Druzyanova⁵

¹St.Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov

5, Institutskiy lane, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

²Arctic State Agrotechnological University

3, Sergelyakhskoye highway, 3 km, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation

³Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov

17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

⁴Petrozavodsk State University

33, Lenina str., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation

⁵Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov

58, Belinsky St., Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677000, Russian Federation

Annotation. The productivity of skidding systems is greatly influenced by the average skidding distance, which is determined by the size of the cutting area, the location of the upper warehouse (loading point), the accepted scheme for the development of the cutting area, and the bearing capacity of soils. This indicator affects the coefficient of track lengthening due to maneuvering. All other things being equal, the lower the bearing capacity of the soils, the more maneuvering is required, the greater the average skidding distance becomes, the lower the productivity and the greater the specific energy intensity of the work. It is known that when working on low-bearing soils, skidding tractors are forced to tack up to 70 % of the entire cargo runtime. At the same time, the impact of maneuvering forest vehicles and skidding systems on slopes on permafrost has not yet been given due attention, although it is obvious that this significantly affects their environmental and operational efficiency. The article shows that special attention to the choice of the directions of the skidding lines and technological corridors in terms of possible maneuvering of the vehicle should be paid to the working conditions on steep and very steep slopes, regulating the minimum deviations from the main direction of movement of the forest machine or skidding system. It is proved that when planning logging operations on the slopes of thawing soils, the hydro geological and technical services of forestry enterprises and forestry organizations need to zone the sites according to the moisture criterion and classify them. In addition, it has been established that for each category of sites it is necessary to assess the operability of traffic routes-skidding lines and technological corridors, indicating the permissible ranges of track depth and maneuvering angle of forest vehicles or skidding systems.

Keywords: forests on slopes, forests on permafrost, logging, forest machinery, skidding systems, soil deformation, rutting, maneuvering of forest machinery.

ВВЕДЕНИЕ

Маневрирование лесных машин при выполнении работ на склонах является нежелательным, но неизбежным [1]. Наиболее нежелательным маневрирование лесных машин на склонах считается с точки зрения безопасности машин и персонала [2–5]. Несмотря на то, что при выполнении технологической подготовки стараются оптимизировать расположение трасс движения лесных машин (трелевочных волоков и технологических коридоров) избежать необходимости маневрирования, в большинстве случаев не удается. Кроме того, по мере износа ездовой поверхности трасс движения лесных машин и трелевочных систем (увеличении глубины колеи) необходимость в маневрировании возрастает, и нередко можно наблюдать ситуацию, когда первые 1–3 рейса трелевочные тракторы проходят практически по прямой, а затем все больше и больше начинают идти галсами [6]. Чем больше влажность почвогрунта, тем меньше его несущая способность, тем больше интенсивность образования колеи, и тем больше маневрирование [7]. В свою очередь, тем меньше производительность лесных машин и трелевочных систем, и больше удельная энергоёмкость их работы [8–10].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Обоснование необходимости типизации трасс движения лесных машин и трелевочных систем по их несущей способности на склонах на многолетней мерзлоте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использованы справочные данные о физико-механических свойствах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов. Расчёты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности выполнения лесосечных и лесохозяйственных работ при помощи лесных машин с различными видами движителей на склонах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов в условиях криолитозоны изучены в работах [11–13], в которых установлены количественные связи между геотехническими параметрами трелевки и глубиной образованной колеи h_k как критерия работоспособности трелевочного волока или технологического коридора.

При работе на склоне мерзлого почвогрунта его несущая способность p_s достаточно высокая (более 70 кПа) и обеспечить работоспособность трасс движения лесных машин – трелевочных волоков или технологических коридоров удастся при достаточно большой нагрузке на поверхность склона даже от колесных движителей.

Однако в процессе оттаивания мерзлого почвогрунта происходят существенные изменения его физико-механических свойств, в первую очередь, деформационных и прочностных. Проблемы при перемещении лесных машин, и, особенно, трелевочных систем, возникают и при перемещении малообъемных грузов, как вниз по склону, так и особенно к его вершине.

Как установлено в результате исследований [14], циклическое промерзание и оттаивание краевой части массива почвогрунта существенно ослабляет связи между его агрегатами, что повышает сжимаемость почвогрунта, его фильтрационные способности и водопроницаемость. Способность почвогрунта накапливать и удерживать влагу в этом случае увеличивается.

Учитывая результаты данных исследований, можно предположить, что прочностные характеристики почвогрунта, а именно величина p_s , существенно снижается, достигая значений 30 кПа и менее, что сопоставимо с величиной давления q движителя на почвогрунт.

Поскольку массив оттаивающего грунта граничит с водонепроницаемым слоем мерзлого грунта (многолетней мерзлоты), в результате реализации отмеченных геомеханических процессов на склонах имеет место дифференцированное распределение влаги на различных участках трасс движения лесных машин, что обуславливает вариативность состояния показателя общей влажности W почвогрунта.

Наиболее высокие показатели W установлены в нижней части склона у его подошвы, наименьшие – у вершины, причем отличия достигают 30–50 и более процентов.

Влияние влажности на параметры паспорта прочности – величину сцепления C и угол внутреннего трения φ – установлено в работе [15] при обработке опытных данных для двух грунтов – суглинка и песка пылеватого.

При увеличении W с 20 до 36 % величина C для суглинка снизилась с 51 до 8 кПа, для песка – с 26 до 10 кПа, а угол φ – соответственно с 32° до 10° и с 36° до 33° .

Показатель влажности влияет и на динамические деформационные свойства мерзлых и оттаивающих почвогрунтов (слоев многолетней и сезонной мерзлоты), что необходимо учитывать при движении лесной машины или трелевочной системы по склону с выраженным рельефом и неровностями, например, по раздробленному склону.

Так, на рис. 1 представлено на основании опытных данных [16], влияние показателя W , % на величину динамического модуля сдвига G мерзлой коалиновой глины ($\text{Па} \cdot 10^9$). Для оттаивающей глины при положительных температурах характер связи аналогичный, но абсолютные значения G ниже в 1,5–2 раза до $1,3 \cdot 10^9$ Па.

Анализ данных рис. 1 показывает, что с ростом влажности W вплоть до своего предела текучести $W_T = 40\text{--}45\%$, возникающие деформации в почвогрунте под воздействием движителя приводят к более высоким показателям касательных напряжений сдвига τ , что нарушает целостность массива почвогрунта и способствует росту глубины колеи.

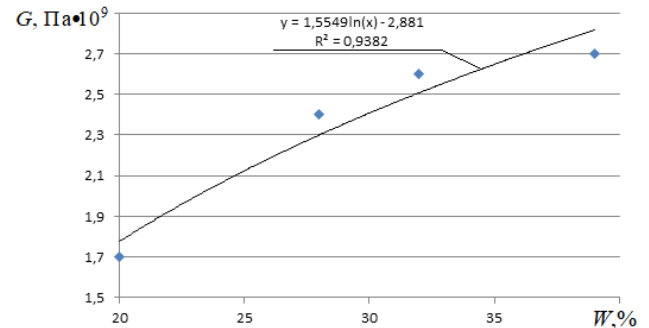


Рис. 1. Влияние влажности на динамический модуль сдвига

Следуя положениям [15], будем считать, что лесная машина на поверхности склона с углом наклона α к линии горизонта расположена от его подошвы на расстоянии L .

Тогда коэффициент влажности K_W , равный отношению W к W_T , определяется с помощью соотношения:

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{OT}}, \quad (1)$$

где H_{OT} – мощность оттаивающего слоя почвогрунта, граничащего с мерзлым слоем.

С учетом коэффициента влажности K_W параметры паспорта прочности для суглинка определяются как:

$$\begin{aligned} C &= C_c(-1,091 K_W + 1,3189), \quad \varphi = \\ &= \varphi_c(-0,904 K_W + 1,3693), \\ \tau &= C + q \cdot \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где нижний индекс «с» соответствует показателям почвогрунта в сухом состоянии (менее 20 %); q – нормальное (вертикальное) давление движителя на почвогрунт в пределах пятна контакта площадью $S = \pi a^2$ с радиусом a , τ – предельное касательное напряжение (сопротивление сдвигу) на кривой огибающей Мора.

В дополнении к сказанному, в процессе перемещения лесные машины, и, особенно, трелевочные системы (трактор + пачка лесоматериалов) совершают маневрирование, отклоняясь на угол θ от осевого направления движения в границах волока, что оказывает влияние на возникновение дополнительных касательных напряжений, увеличивающих объем разрушения краевой части массива и приводит к увеличению показателя h_k .

В работе [15], на основании моделирования процесса разрушения почвогрунта с учетом маневрирования движителя на равнинной местности, установлено соотношение для определения h_k :

$$h_k = a \left[\frac{q}{2\tau} (1-\gamma)(1+\sin 2\theta) \right]^{1/n}. \quad (3)$$

Коэффициент n в показателе степени $1/n$ зависит от геометрической формы k пятна контакта движителя и коэффициента Пуассона ν и выражается как:

$$n = k - \gamma/2, \quad \gamma = \nu / (1 - \nu), \quad (4)$$

где $k = 3, 2, 1$ устанавливают в зависимости от формы контакта – соответственно сферического, цилиндрического или плоского.

В дальнейших расчетах в силу того, что при работе на склонах в большей части случаев используют тракторы с гусеничным движителем или колесные тракторы с оснащением их tandemных мостов моногусеницами, будем считать пятно контакта плоским и принимаем коэффициент $k = 1$.

Коэффициент Пуассона ν в моделях разрушения почвогрунтов с внутренним трением является параметром связи между радиальными σ_r и тангенциальными σ_θ компонентами плоского поля напряжений:

$$\sigma_\theta = \gamma \sigma_r, \quad (5)$$

приращение которых формирует величину напряженного сдвига в процессе деформирования почвогрунта.

Как следует из соотношений (4) и (5) при влажности, стремящийся к своему пределу текучести, т. е. когда в почвогрунте проявляется эффект солифлюкции, коэффициент Пуассона $\nu \rightarrow 0,5$. В этом случае коэффициент $\gamma \rightarrow 1$, компоненты тензора напряжений в силу (5) совпадают, что приводит к состоянию всестороннего сжатия оттаивающего почвогрунта. Как отмечалось выше, в этом состоянии концентрация влаги в почвогрунте максимальная.

Таким образом, коэффициент Пуассона является одним из наиболее важных параметров в моделях деформирования переувлажненных оттаивающих почвогрунтов с внутренним трением применительно к работам на склонах с дифференцированным распределением влаги на отдельных его участках.

Расчетным путем определить ν представляет весьма трудную задачу, в связи с чем, коэффициент Пуассона определяют в лабораторных условиях на образцах. Очевидно, что данные в образцах и в натурных условиях отличаются значительно.

На рис. 2 представлена зависимость ν от W , %, где кривая 1 – данные аппроксимации в ходе исследований [12] лабораторных испытаний на образцах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов, полученных в [17]. С высоким коэффициентом детерминации связь описывается логарифмической зависимостью.

Прямая 2 на рис. 2 получена на основании определения коэффициента Пуассона ν как $1/100$ от показателя общей влажности W в процентах. Оценки показали, что относительная погрешность при таком определении ν не выходит за пределы 3–5 %.

Поскольку определить влажность почвогрунта в натурных условиях можно оперативно и достоверно с помощью различных способов, в частности, с использованием откалиброванных влагомеров, то и оценить коэффициент Пуассона на склоне оттаивающего почвогрунта можно с достаточно высокой точностью.

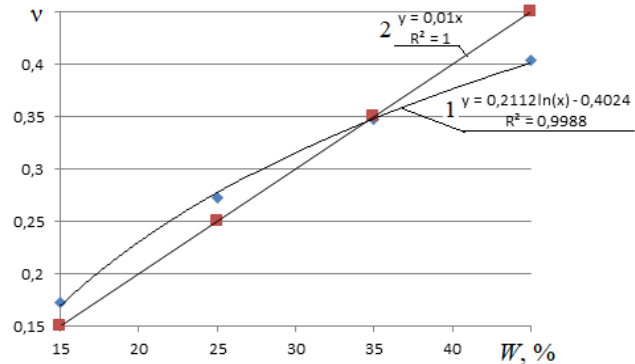


Рис. 2. Зависимость коэффициента Пуассона от влажности

Этот вывод заслуживает особого внимания, поскольку существенное (в ряде случаев, кратное) отличие влажности W вблизи подошвы склона и его вершины обусловит адекватное отличие напряженно-деформированных состояний краевой части массива почвогрунта и реализации механизма его разрушения на различных участках трелевочного волока или технологического коридора.

Сделаем вывод. При высокой влажности оттаивающего почвогрунта на склоне на многолетней мерзлоте под воздействием статической и динамической нагрузки от лесной машины или трелевочной системы его сжимаемость существенно возрастает, что способствует росту деформаций, увеличению объема разрушения, образованию более глубокой колеи и, в конечном счете, снижению работоспособности ездовой поверхности трелевочного волока или технологического коридора.

Дополнительные деформации возникают и при осуществлении маневра движителя.

Выразим угол поворота θ из соотношения (3):

$$\theta = 0,5 \arcsin \left[2\tau \frac{(h_k/a)^n}{q(1-\gamma)} - 1 \right]. \quad (6)$$

С учетом связей (1) и (2), величина τ , входящая в (6), и коэффициенты n и γ зависят от параметров склона через коэффициент влажности K_W .

Это позволяет при определении угла маневрирования θ учесть свойства оттаивающего почвогрунта на различных участках склона и основные геотехнические параметры перемещения лесной машины или трелевочной системы.

Рассмотрим наиболее сложные условия выполнения лесосечных и лесохозяйственных работ, когда показатель влажности W может достигать своего предела текучести W_T , что требует применения специальных средств перемещения груза общим весом Q как в направлении вершины склона так и к его подошве с использованием гусеничных движителей и, при необходимости, лебедки (самоходной или интегрированной в трансмиссию) с минимизацией мощности силы тяги N движителя.

В [18] установлено соотношение на ограничение N :

$$N \leq S \nu \left[p_s \sqrt{\frac{h_k}{a}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right], \quad (7)$$

где v – скорость движения лесной машины или трелевочной системы; χ – коэффициент трения гусеницы о влажный почвогрунт.

Из (7) выразим относительную величину глубины колеи:

$$\frac{h_k}{a} = \left\{ \frac{1}{p_s} \left[\frac{N}{vS} + q(\sin\alpha + \chi\cos\alpha - \operatorname{tg}\varphi) - C \right] \right\}^2, \quad (8)$$

которую будем использовать в (6) при определении угла маневрирования θ .

Расчеты выполнялись при следующих параметрах и переменных:

- используется трактор John Deer 9RT с номинальной мощностью $N_m = 419,2$ кВт (570 л.с.), весом 5,8 т с максимальной нагрузкой до 9,072 т. Таким образом, суммарный вес Q в расчетах изменялся от 5,8 до 14,872 т, $S = 5,3884$ м², $v = 1$ м/с, $\chi = 0,05$.

- угол наклона склона α изменялся от 0 до 35°, параметры L и H_{OT} – переменные и варьировались в диапазоне соответственно от 3 до 25 м и от 5–20 м;

- почвогрунт представлял собой оттаивающий суглинок с характеристиками в сухом состоянии: $C_c = 20$ кПа, $\varphi_c = 24^\circ$, $p_{sc} = 96$ кПа.

Коэффициент влажности K_W варьировался от 0,39 ($W = 18\%$) до 0,94 ($W = 42\%$), при этом величина несущей способности уточнялась по формуле

$$p_s = p_{sc}(-1,1579 K_W + 1,3689). \quad (9)$$

На рис. 3 показано влияние коэффициента K_W на величину угла θ° .

Данные рис. 3 получены при фиксированных значениях: $\alpha = 15^\circ$, $Q = 14$ т, $q = 25,95$ кПа.

Параметры размещения лесной машины на склоне устанавливались таким образом, что коэффициент влажности K_W у подошвы склона достигал 0,8 ($W = 36\%$), а на вершине – 0,39 ($W = 18\%$).

Для того чтобы диапазон изменения глубины колеи находился в нормативных границах, с помощью соотношения (8) установлено, что мощность силы тяги движителя лежит в границах $N = 100,6$ –155,1 кВт. Коэффициент мощности силы тяги $K_N = N/N_m$ снижается с 0,37 до 0,24 по мере увеличения влажности с 18 до 36 %.

Как видим из анализа данных рис. 3, влажность является существенным фактором ограничения маневрирования лесной машины или трелевочной системы на склоне оттаивающего почвогрунта при необходимости поддержания работоспособности ездовой поверхности трелевочного волока или технологического коридора.

Как показали расчеты, при дальнейшем росте W до уровней 40–42 % ($K_W = 0,88$ –0,94) и проявлении эффекта солифлюкции почвогрунта, выдержать значения глубины колеи в пределах $h_k \leq 0,1$ м при фиксированных параметрах Q и q не представляется возможным.

Так, при $W = 40\%$ при снижении K_N до 0,22 и предельном угле $\theta = 15$ –16° глубина колеи достигает $h_k = 0,20$ м.

Дальнейший рост W до 42 % обуславливает необходимость снижения K_N до 0,21, существенного снижения допустимого угла θ до уровня 6–7°, при этом глубина колеи возрастает до $h_k = 0,35$ м.

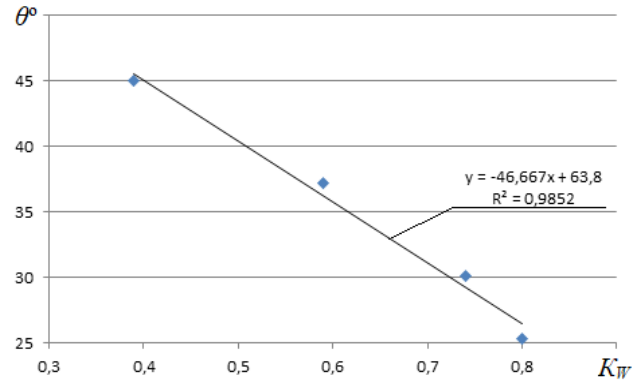


Рис. 3. Влияние коэффициента влажности на величину угла маневрирования

Данные рис. 4 и 5 иллюстрируют эти выводы.

Так, на рис. 4 отражено влияние коэффициента K_W на h_k , м. Экспоненциальная зависимость содержит две ветви – асимптотическую (пологую) при $K_W \leq 0,75$ –0,8 и крутую при $K_W > 0,8$.

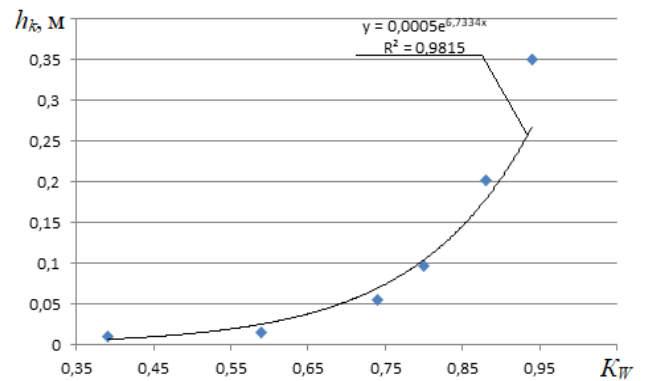


Рис. 4. Влияние влажности на глубину колеи

Это означает, что с приближением показателя влажности к своему пределу текучести, необходимы специальные технические возможности по стабилизации показателей перемещения по склону лесных машин и трелевочных систем на их базе.

К числу таких возможностей следует отнести снижение веса трелевочных систем, применение колесных движителей с низким давлением в шинах, оснащение тандемных мостов моногусеницами. Если колесная лесная машина не имеет тандемных мостов, или не все мосты тандемные, то в этом случае колеса часто оснащают цепями противоскольжения, особенно в зимнее время года, в сырую погоду, на крутых склонах.

Следует отметить и практику использования при работе лесных машин на склонах отдельных самоходных лебедок, или лебедок, интегрированных в трансмиссию лесных машин, которые существенно повышают эффективность и безопасность работ [19–22]. В этом случае, необходимо ограничить мощность силы тяги движителя в пользу большего использования силы тяги лебедки.

На рис. 5 показано влияние состояния влажности почвогрунта на склоне (коэффициент K_W) на допустимый уровень использования мощности N (коэффициент K_N).

В отличие от выводов по рис. 4, экспоненциальная кривая на рис. 5 более пологая и явного сопряжения ниспадающей и асимптотической ветвей не наблюдается.

Тем не менее, анализ и сопоставление абсолютных значений K_N в этом случае позволяют заключить, что основное снижение параметра мощности N имеет место при влажности с коэффициентом $K_W \leq 0,6-0,65$, т. е. при переходе состояния влажности почвогрунта от сухого до своего предела пластичности $W_n = 25-27\%$ ($K_W \leq 0,60-0,65$).

Как показали результаты исследований (рис. 6) при фиксированных параметрах Q , q , N , v и W и изменении только угла наклона склона α величина допустимого угла θ маневрирования существенно меняется, причем наибольшее снижение угла θ наблюдается при увеличении угла α более $15-20^\circ$.

Зависимость угла θ от веса лесной машины или трелевочной системы Q через величину давления на почвогрунт q определяется зависимостью (6), в соответствии с которой $\theta \sim \arcsin(1/q)$.

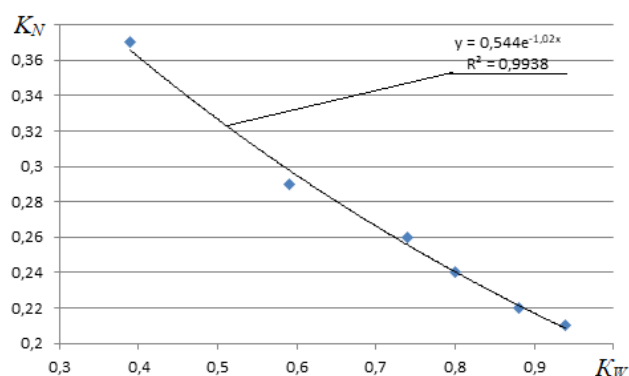


Рис. 5. Влияние влажности на мощность силы тяги движителя

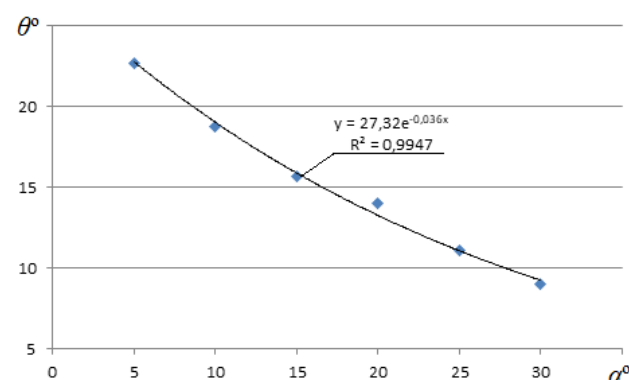


Рис. 6. Зависимость угла маневрирования от угла наклона склона

Так при снижении Q с 14 до 8 т и q с 26 до 14,85 кПа (на 75,2 %) величина θ допускает увеличения практически на те же 75,1 % с 9 до 15,75°, т. е. имеет место линейная обратно пропорциональная зависимость.

Если обратиться к классификации геотехнических условий лесозаготовительных работ, то принято подразделять склоны на пологие с уклоном наклона до 10° , покатые – $\alpha = 10-20^\circ$, крутые – $\alpha = 21-30^\circ$, и очень крутые с показателем α более 30° [23].

Данные рисунка 6 позволяют заключить, что особое внимание к выбору направлений трелевочных волоков и технологических коридоров с точки зрения возможных маневров движителя должно быть уделено условиям работ на крутых и очень крутых склонах, регламентирующих минимальные отклонения от магистрального направления движения лесной машины или трелевочной системы.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сделать ряд выводов и сформулировать конкретные практические рекомендации:

1. При планировании лесозаготовительных работ на склонах оттаивающих почвогрунтов гидрогеологическим и техническим службам лесопромышленных предприятий и лесохозяйственных организаций необходимо произвести районирование участков по критерию влажности и составить их классификацию.

2. Для каждой категории участков необходимо произвести оценку работоспособности трасс движения – трелевочных волоков и технологических коридоров с указанием допустимых диапазонов глубины колеи и угла маневрирования лесных машин или трелевочных систем.

3. При проявлении эффекта солифлюкции почвогрунтов выбор типа движителя, предельного веса груза и величины давления на почвогрунт, а также меры соотношения использования мощности силы тяги движителя и специальных лебедок должны базироваться на предварительных оценках особенностей процесса образования колеи и маневрирования движителя в краевой части массива оттаивающего почвогрунта.

4. Унификация отмеченных выше геотехнических условий является основой разработки нормативного документа в виде «Альбома технологических схем лесозаготовки на склонах криолитозоны» с методическими указаниями по его использованию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Обоснование целесообразности использования бесчokerных трелевочных тракторов на лесосечных работах / А. И. Помигуева, О. А. Куницкая, А. С. Швецов [и др.] // Вестник АГАТУ. 2024. № 3 (15). С. 44–102.
2. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 51–56.
3. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 60–69.
4. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Исследование динамических нагрузок, действующих на кабину лесной машины при различных вариантах возникновения аварийных ситуаций // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 3. С. 28–39.

5. Основные правила безопасной эксплуатации универсальных лесозаготовительных машин / О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев, А. С. Швецов [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 6. С. 33–42.
6. Экологическая безопасность лесных машин на полугусеничном ходу / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 5. С. 44–51.
7. Рябухин П. Б., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 2 (392). С. 88–105.
8. Перспективы использования колесных тракторов малого и среднего класса для тяги для выполнения лесохозяйственных работ / И. С. Должиков, О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев [и др.] // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Девятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2023. С. 75–76.
9. Обоснование параметров тракторов с колесно-гусеничным двигателем для малообъемных лесозаготовок / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 6 (18). С. 44–53.
10. Повышение эффективности лесозаготовительного производства за счет использования сборно-разборных дорожных покрытий на транспортных операциях / М. В. Зорин, Д. В. Новгородов, А. М. Юдилевич [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 6 (18). С. 33–43.
11. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116–128.
12. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101–117.
13. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 6(384). С. 121–134.
14. Царапов М. Н., Калабина М. В. Определение угла внутреннего трения слабодистого мерзлого грунта при оттаивании // Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы II Всероссийской конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 132–146.
15. Геотехническое обоснование работоспособности трелевочных волоков и технологических коридоров на склонах оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колесным и полугусеничным двигателем / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 15–31.
16. Мирный А. Ю., Идрисов И. Х., Мосина А. С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 1. Испытания в резонансной колонке // Геоинфо. 2024. Т. 6, № 1/2. С. 28–35.
17. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М. : Высшая школа, 1983. 228 с.
18. Формирование колеи двигателем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3 (399). С. 140–152.
19. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах / В. А. Каляшов, Т. А. До, О. И. Григорьева [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 2. С. 11–25.
20. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, А. До Туан, Е. Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 2. С. 1–47.
21. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 3. С. 1–29.
22. Оценка тягово-сцепных свойств двигателя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78–84.
23. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным двигателем на почвогрунты на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 4. С. 64–84.

REFERENCES

1. Obosnovanie ce-lesoobraznosti ispol'zovaniya beschokernykh trelevochnykh traktorov na lesosechnykh rabotah / A. I. Pomigueva, O. A. Kunickaya, A. S. Shvecov [et al.] // Vestnik AGATU. 2024. № 3 (15). С. 44–102.
2. Skobcov I. G., Kunickaya O. A. Trebovaniya standartov po bezopasnosti pri rabote na lesnykh mashinah // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 1. С. 51–56.
3. Skobcov I. G., Kunickaya O. A. Obzor konstruktivnykh reshenij zashchitnykh ustroystv kabin lesnykh mashin // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 1. С. 60–69.
4. Skobcov I. G., Kunickaya O. A. Issledovanie dinamicheskikh nagruzok, dejstvuyushchih na kabinu lesnoj mashiny pri razlichnykh variantah vznikoventiya avarijnykh situacij // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevo-obrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 3. С. 28–39.
5. Osnovnye pravila bezopasnoj ekspluatatsii universal'nykh lesozagotovitel'nykh mashin / O. A. Kunickaya, A. A. Krivosheev, A. S. Shvecov [et al.] // Bezopasnost' i

ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2023. № 6. S. 33–42.

6. Ekologicheskaya bezopasnost' lesnyh mashin na polugusenichnom hodu / A. S. Dmitriev, I. S. Dolzhikov, O. A. Kunickaya [et al.] // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2023. № 5. S. 44–51.

7. Ryabuhin P. B., Kunickaya O. A., Grigor'eva O. I. Obosnovanie tekhnologicheskikh processov i sistem mashin dlya lesosechnykh rabot // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2023. № 2 (392). S. 88–105.

8. Perspektivy ispol'zovaniya kolesnykh traktorov malogo i srednego klassa dlya tyagi dlya vypolneniya lesohozyajstvennykh rabot / I. S. Dolzhikov, O. A. Kunickaya, A. A. Krivosheev [et al.] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa : materialy Devyatoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Petrozavodsk, 2023. S. 75–76.

9. Obosnovanie parametrov traktorov s kolesno-gusenichnym dvizhitelem dlya maloob'emnykh lesozagotovok / A. S. Dmitriev, I. S. Dolzhikov, O. A. Kunickaya [et al.] // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2024. № 6(18). S. 44–53.

10. Povyshenie effektivnosti lesozagotovitel'nogo proizvodstva za schet ispol'zovaniya sbornorazbornykh dorozhnykh pokrytij na transportnykh operacijah / M. V. Zorin, D. V. Novgorodov, A. M. Yudilevich [et al.] // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2024. № 6 (18). S. 33–43.

11. Osobennosti ucheta sostoyaniya massiva merzlykh gruntov pri ciklicheskom vzaimodejstvii s trelevochnoj sistemoj / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2019. T. 9, № 1(33). S. 116–128.

12. Issledovanie processa razrusheniya merzlykh i ottaivayushchih pochvogruntov pri vozdejstvii trelevochnoj sistemy / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2020. № 2 (374). S. 101–117.

13. Modelirovanie vzaimodejstviya lesnyh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonah / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2021. № 6(384). S. 121–134.

14. Carapov M. N., Kalabina M. V. Opredelenie ugla vnutrennego treniya slabol'distogo merzlogo grunta pri

ottaivanii // Fundamenty glubokogo zalozeniya i problemy geotekhniki territorij : materialy II Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Perm', 2021. S. 132–146

15. Geotekhnicheskoe obosnovanie rabotosposobnosti trelevochnykh volokov i tekhnologicheskikh koridorov na sklonah ottaivayushchih pochvogruntov pri rabote lesnyh mashin s kolesnym i polugusenichnym dvizhitelem / V. A. Kalyashov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Resources and Technology. 2023. T. 20, № 3. S. 15–31.

16. Mirnyj A. Yu., Idrisov I. H., Mosina A. S. Dinamicheskie svoystva merzlykh gruntov. Chast' 1. Ispytaniya v rezonansnoj kolonke // Geoinfo. 2024. T. 6, № 1/2. S. 28–35.

17. Cytovich N. A. Mekhanika merzlykh gruntov. M. : Vysshaya shkola, 1983. 228 s.

18. Formirovanie kolei dvizhitelem lesnoj mashiny na sklone ottaivayushchego pochvogrunta kriolitozony s uchedom efekta soliflyukcii / V. A. Kalyashov, V. Ya., Shapiro I. V. [Grigor'ev et al.] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2024. № 3(399). S. 140–152.

19. Sovremennye tekhnicheskie resheniya dlya obespecheniya bezopasnoj raboty lesnyh mashin na gornyx sklonah // V. A. Kalyashov, T. A. Do, O. I. Grigor'eva [et al.] Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 2. S. 11–25.

20. Sovremennye sistemy mashin i tekhnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyakh gornyx lesosek / V. A. Kalyashov, A. Do Tuan, E. G. Hitrov [et al.] // Resources and Technology. 2022. T. 19. № 2. S. 1–47.

21. T. A. Do, G. V. Grigor'ev, V. A. Kalyashov [et al.] Teoreticheskie issledovaniya raboty lesnyh mashin s guse-nichnym dvizhitelem na sklonah // Resources and Technology. 2022. T. 19, № 3. S. 1–29.

22. Ocenka tyagovo-scepykh svoystv dvizhitelya lesnoj guse-nichnoj mashiny, rabotayushchej na sklone / T. A. Do, G. V. Grigor'ev, V. A. Kalyashov [et al.] // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2022. № 2 (54). S. 78–84.

23. Metodika i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy vozdejstviya lesnyh mashin s gusenichnym dvizhitelem na pochvogrunty na sklonah / Do T. A., Grigor'ev G. V., Kalyashov V. A. [et al.] // Resources and Technology. 2022. T. 19. № 4. S. 64–84.

© Шапиро В. Я., Новиков М. С.,
Григорьев И. В., Перфильев П. Н.,
Тихонов Е. А., Друзьянова В. П.. 2025

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 579.64+581.526.42+504.054

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-2-85-91

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 2. С. 85–91

БАКТЕРИАЛЬНЫЙ МИКРОБИОМ ФИЛЛОСФЕРЫ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ (*LARIX SIBIRICA* LEDEB.) В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЭМИССИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА*

К. А. Мирошникова^{1,4}, Ю. А. Литовка^{1,2,3}, И. И. Джалолов^{2,3}, И. Н. Павлов^{2,3}

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

²Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение

ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

⁴Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82А

E-mail: mixe96@mail.ru

Аннотация. Исследовано бактериальное сообщество филлосферы лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), произрастающей в условиях сильного техногенного загрязнения Норильского промышленного района. С применением современного метода метабаркодинга проведен анализ микробного состава хвои, что позволило идентифицировать доминирующие таксоны бактерий и оценить их роль в адаптации растений к экстремальным условиям окружающей среды. Основными доминирующими отделами бактерий в образцах хвои лиственницы оказались *Proteobacteria*, *Actinobacteriota*, *Firmicutes* и *Bacteroidota*, что согласуется с их широким распространением в различных экосистемах и их важной ролью в функционировании микробных сообществ. Среди выявленных родов наиболее распространенными были *Cutibacterium*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium* и *Klebsiella*.

Ключевые слова: микробиом, Арктика, Норильский промышленный район.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 85–91

BACTERIAL MICROBIOME OF THE PHYLLOSPHERE OF SIBERIAN LARCH (*LARIX SIBIRICA* LEDEB.) IN THE ZONE OF INFLUENCE OF INDUSTRIAL EMISSIONS FROM THE NORILSK INDUSTRIAL REGION

К. А. Miroshnikova^{1,4}, Yu. A. Litovka^{1,2,3}, I. I. Jalolov^{2,3}, I. N. Pavlov^{2,3}

¹Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center”, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

50, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS – a separate division of the FRC KCS SB RAS (IF SB RAS)

50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

⁴Siberian Federal University,

82A, Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

E-mail: mixe96@mail.ru

Annotation. The bacterial community of the phyllosphere of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) growing under conditions of severe technogenic pollution in the Norilsk industrial region has been studied. Using metabarcoding

* Работа выполнена в рамках государственных заданий ФИЦ КНЦ СО РАН № FWES-2025-0015 и № FWES-2024-0029. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ».

methods, the microbial composition of the needles was analyzed, which made it possible to identify the dominant bacterial taxa and assess their role in the adaptation of plants to extreme environmental conditions. The main dominant bacterial phyla in the larch needle samples were Proteobacteria, Actinobacteriota, Firmicutes, and Bacteroidota, which is consistent with their widespread distribution in various ecosystems and their important role in the functioning of microbial communities. Among the identified genera, the most common were Cutibacterium, Staphylococcus, Streptococcus, Corynebacterium, and Klebsiella.

Keywords: *microbiome, Arctic, Norilsk industrial region.*

ВВЕДЕНИЕ

Микробные сообщества филлосферы отличаются высокой сложностью и включают как культивируемые, так и некультивируемые виды, образуя разнообразные группы из-за множества микросред обитания [Müller, Ruppel, 2014]. Микроорганизмы филлосферы приспособлены к экстремальным условиям, таким как перепады температуры, УФ-излучение, дефицит воды и питательных веществ, что напрямую влияет на их состав и разнообразие [Vorholt, 2012]. На эти взаимодействия также воздействуют вид растения и присутствие патогенов, которые могут менять характер отношений между микроорганизмами и растением-хозяином [Lindow, Brandl, 2003]. Исследования микробиома филлосферы пока менее многочисленны по сравнению с изучением микробиома корневой зоны, а усиление антропогенной нагрузки продолжает изменять структуру и разнообразие микрофлоры филлосферы. Микробиом филлосферы, то есть сообщество микроорганизмов, обитающих на поверхности и внутри листьев растений, может играть ключевую роль в адаптации растений к стрессовым условиям, включая техногенное загрязнение. В условиях промышленных эмиссий, микроорганизмы филлосферы могут способствовать, как повышению устойчивости растений к стрессу, так и привести к гибели растения, что делает их важным объектом исследований в контексте экологической устойчивости [Sivakumar и др., 2020; De Mandal, Jeon, 2023].

На уровне макромира, внутри микробного сообщества происходят непрерывные взаимодействия, биологические процессы одних микроорганизмов могут изменять среду, делая её более привлекательной либо, наоборот, непригодной, для существования других микробов. Микроорганизмы, сосуществующие с растениями, влияют на усвоение питательных веществ, устойчивость к засухе, выработку фитогормонов и процессы газообмена и воздухообмена. Во многих случаях эти ассоциации между растениями и микроорганизмами имеют основополагающее значение для здоровья и приспособленности растений и имеют прочную коэволюционную основу [Lyu и др., 2021]. Фундаментальный взгляд на растительно-микробные ассоциации смещается в сторону восприятия растений и их микробиомов как единого экологического целого [Cordovez и др., 2019]. Это объединение растений с сообществом микроорганизмов проявляется в том, что генетические факторы растений способствуют отбору микробиома, поддерживают структуру микробного сообщества и взаимодействуют с ним. Поскольку листья находятся в открытой среде и постоянно подвергаются микробному воздействию, для поддержания стабильного и функционального микро-

биома необходимы эффективные механизмы отбора [Xiong и др., 2021]. Исследования, посвященные изучению различных компартментов микробиома растений, показывают, что эндосфера листа испытывает наиболее сильное селективное влияние со стороны растения-хозяина [Addison и др., 2023].

Лиственничные леса являются ключевым фактором для экологического равновесия систем Заполярья, благодаря высокой биологической устойчивости и способностью расширять ареал даже в экстремальных климатических условиях [Абаимов и др., 1997; Бенькова, Бенькова, 2015; Fakhrutdinova, Benkova, Shashkin, 2017]. Однако высокие темпы изменения климата совместно с высокой техногенной нагрузкой приводят к расширению ареалов фитопатогенов, ранее не встречавшихся на этой территории [Литовка и др., 2017; Pavlov и др., 2018]. Агрессивные фитопатогенные организмы приводят к деградации лесов Арктики, значительно снижая устойчивость и выживаемость деревьев лиственницы, в том числе и за счет изменения микробиома хвои. Наша задача была выяснить какие представители бактериального сообщества характерны для лиственницы сибирской, произрастающей под влиянием техногенной нагрузки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования микробиома лиственницы сибирской было отобрано 11 образцов хвои с деревьев, произрастающих в Норильском промышленном районе (НПР). Хвоя собиралась 1–2 августа 2018 г. с деревьев (30–50 лет) по факториальной схеме: control – фоновый уровень загрязнения воздуха и при отсутствии в древесине ствола дереворазрушающих фитопатогенных грибов (район озера Боганидское, в 50 км от г. Норильска), infected – также в условиях фонового техногенного загрязнения воздуха, но пораженные *Porodaedalea niemelaei* M. Fisch; techno – в условиях высокого техногенного загрязнения воздуха и при отсутствии в древесине ствола фитопатогенного гриба *P. niemelaei*. Наличие поражения *P. niemelaei* выявлено взятием кернов у предварительно отобранных деревьев по наличию сердцевидной гнили и выделением чистой культуры гриба. Всего в исследование было включено 11 деревьев.

Далее проводили выделение ДНК с помощью набора MACHEREY-NAGEL NucleoSpin Soil, с помощью электрофореза в 1%-ном агарозном геле проверяли качество выделенной ДНК. Амплификация проводилась с универсальными праймерами F515/R806 (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA/ GGACTACVSGGGTA TCTAAT) на переменный участок гена 16S rRNA. Эти праймеры являются специфичными для большинства организмов бактерий и архей [Bates и др.,

2011]. ПЦР проводили в 15 мкл реакционной смеси, содержащей 0,5–1 единицу Q5® High-Fidelity DNA Polymerase (NEB, США), 5 пМ каждого прямого и обратного праймера, 10 нг ДНК-матрицы и 2 мМ каждого dNTP (Life Technologies). Все праймеры включали служебные последовательности, содержащие линкеры и штрихкоды, необходимые для секвенирования с технологией Illumina. Смесь денатурировали при 94 °C в течение 1 минуты, затем проводили 35 циклов при 94 °C в течение 30 секунд, при 50 °C в течение 30 секунд и при 72 °C в течение 30 секунд. Финальную элонгацию проводили при 72 °C в течение 3 минут. Продукты ПЦР очищали в соответствии с протоколом Illumina с использованием AMPure XP (Beckman Coulter, США). Подготовку библиотеки проводили в соответствии с Руководством по подготовке набора реагентов MiSeq (Illumina). Библиотеки секвенировали в соответствии с инструкциями производителя на приборе Illumina MiSeq с использованием набора реагентов MiSeq® Reagent Kit v3 (600 циклов) с парным считыванием концов (2×300 п.н.).

Данные секвенирования обрабатывались в RStudio с использованием пакета DADA2 [Callahan и др., 2016] версии 1.28.0. Удаление праймеров выполнялось с помощью программы cutadapt версии 1.15 [Martin, 2011], после чего из чтений удалялись неоднозначные основания (Ns). Были проанализированы профили качества, и применена фильтрация последовательностей по качеству с параметрами truncLen=c(240,240), maxN=0, maxEE=2, truncQ=2, rm.phix=TRUE, minLen=50. Последовательности были очищены от химер, и таксономия была определена с использованием метода assignTaxonomy с базой данных 16S rRNA SILVA [Quast и др., 2013] версии 138.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате секвенирования было получено 576 036 сырых последовательностей 16S рРНК (v3–v4). После фильтрации, удаления шума, объединения парных чтений и удаления химер, остались 366 733 прочтения, которые прошли фильтры, что составило более 65 % для всех образцов. С помощью алгоритмов

dada2 были получены 2826 вариантов последовательностей ампликонов, которым была назначена таксономия. Прочтения, не принадлежащие к бактериям (митохондриальные и хлоропластные), были отфильтрованы, в результате осталось 286453 последовательности, сгруппированные в 2794 варианта последовательностей ампликонов, относящихся к бактериальным таксонам (табл. 1).

Основными отделами бактерий, обнаруженными в образцах хвои лиственницы сибирской, являются Proteobacteria, Actinobacteriota, Firmicutes и Bacteroidota (рис. 1). Эти отделы широко распространены в различных экосистемах и играют важную роль в функционировании микробных сообществ. Наиболее распространенными родами были *Cutibacterium*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium* и *Klebsiella* (рис. 2).

Отдел Proteobacteria является одним из наиболее разнообразных и широко распространенных отделов бактерий, включающий как патогенные, так и полезные для растений микроорганизмы. Протеобактерии способны к азотфиксации, деградации органических веществ и вступают в симбиотические взаимодействия с растениями [Bruto и др., 2014; Orellana и др., 2022]. Представители родов *Klebsiella*, *Xanthomonas*, *Methylobacterium*–*Methylobacterium*, *Neisseria*, *Acinetobacter*, *Pantoea*, *Stenotrophomonas* были обнаружены в образцах хвои лиственницы (рис. 2). Наиболее распространенный род *Klebsiella* включает полезные микроорганизмы растений, которые способны усилить их устойчивость к солевому стрессу [Singh, Jha, Jha, 2015; Sapre, Gontia-Mishra, Tiwari, 2018]. Виды рода *Xanthomonas* охватывают широкий спектр фитопатогенов, которые обладают многочисленными факторами вирулентности для проявления высокого уровня фитопатогенности и механизмами приспособления к растению-хозяину [Ryan и др., 2011; Timilsina и др., 2020]. Группа *Methylobacterium*–*Methylobacterium* относится к хорошо изученным микробам филлосферы, которые обладают потенциальной способностью ускорения роста и увеличения урожайности растений [Zhang и др., 2024].

Таблица 1

Количество последовательностей на каждом этапе обработки и итоговое количество вариантов последовательностей ампликонов, полученных из образцов хвои лиственницы сибирской

Образец	Количество сырых прочтений	Количество прочтений после фильтрации	%	Объединенные прочтения	%	Нехимерные прочтения	%	Количество вариантов последовательностей ампликонов
L1	77967	59236	75.98	56956	73.05	55899	71.7	376
L3	53863	39263	72.89	36957	68.61	35938	66.72	404
L4	32470	23501	72.38	22326	68.76	22119	68.12	285
L5	40731	31211	76.63	29896	73.4	29267	71.85	261
L6	48659	36768	75.56	34513	70.93	33041	67.9	355
L7	54317	41779	76.92	39175	72.12	37692	69.39	472
L8	47713	37678	78.97	33916	71.08	31350	65.71	362
L9	33653	26921	80	25289	75.15	24156	71.78	530
L10	39482	30791	77.99	28127	71.24	27473	69.58	490
L11	30228	23534	77.85	22484	74.38	22266	73.66	432
L12	26084	20060	76.91	19363	74.23	19230	73.72	318

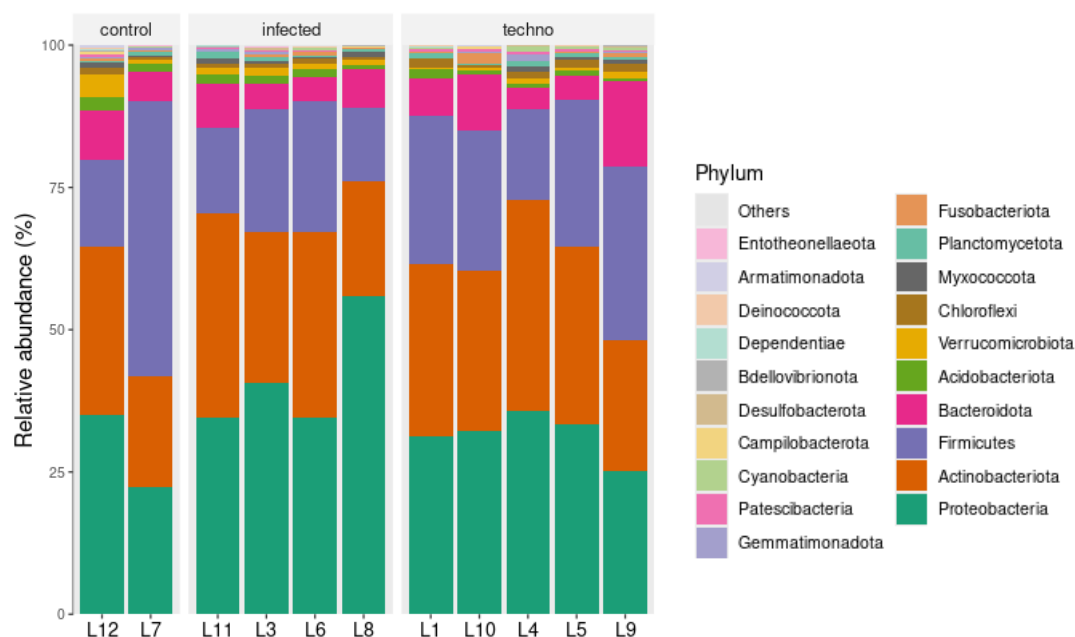


Рис. 1. Столбчатая диаграмма основных отделов бактерий, идентифицированных в образцах хвои лиственницы сибирской, произрастающей в Норильском промышленном районе

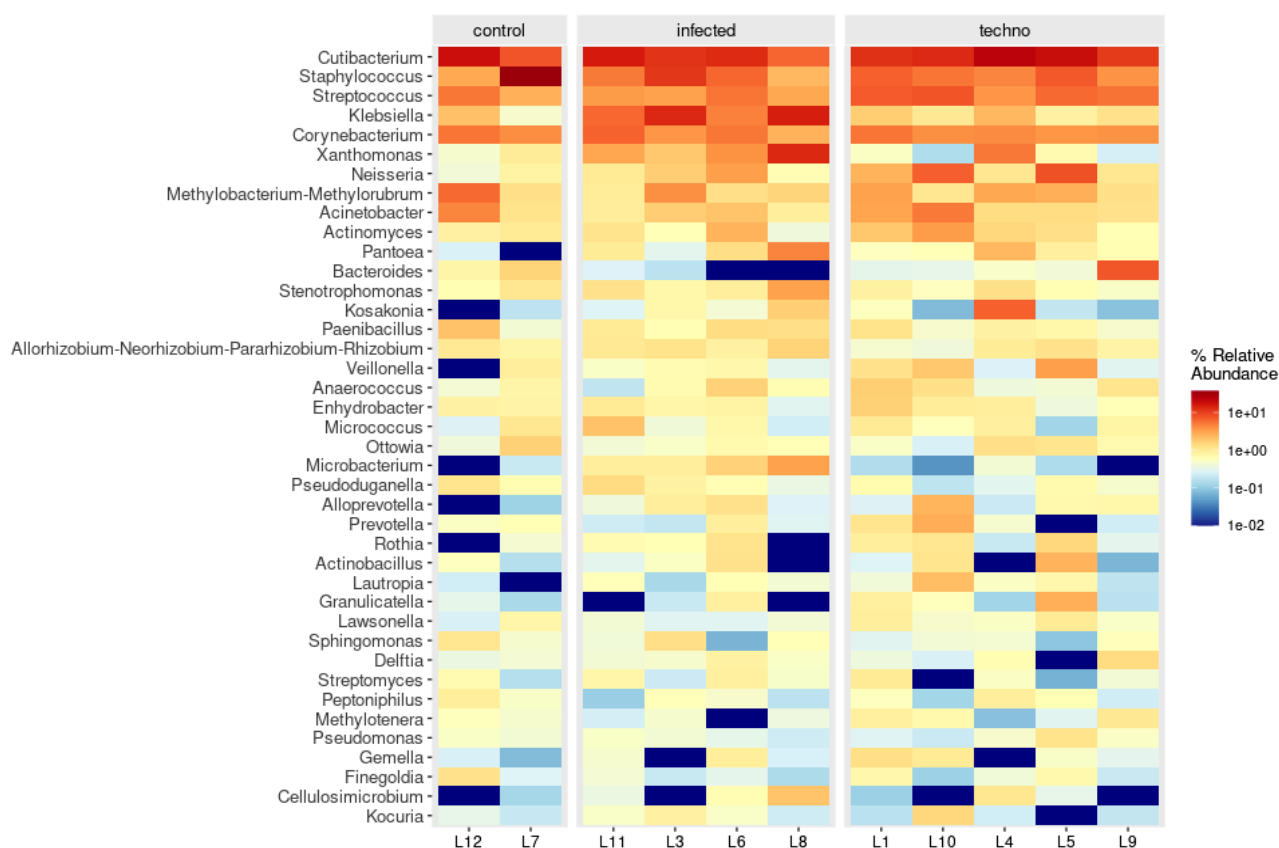


Рис. 2. Тепловая карта основных родов бактерий, идентифицированных в образцах хвои лиственницы сибирской, произрастающей в Норильском промышленном районе

Представители отдела Actinobacteriota известны своей способностью продуцировать биологически активные соединения, включая антибиотики. Они играют важную роль в минерализации сложных органических веществ, таких как целлюлоза и хитин

[Roda-Garcia, Haro-Moreno, López-Pérez, 2023]. Некоторые представители рода *Cutibacterium* были обнаружены у *Ziziphus lotus*, находящихся под подавляющим воздействием паразита *Cuscuta epithymum*, а также обнаружены как эндофиты цитрусовых

и винограда [Aleynova и др., 2022; Sinha и др., 2023; Radouane и др., 2024]. Род *Corynebacterium* включает патогенные и сапрофитные виды; некоторые представители имеют огромное промышленное значение [Hartmann и др., 2020]. Среди *Corynebacterium* существуют растительные патогены, поражающие пшеницу и кукурузу [Carlson, Vidaver, 1982].

Бактерии отдела Firmicutes характеризуются многослойной пептидогликановой клеточной стенкой и способностью образовывать эндоспоры, что делает их устойчивыми к неблагоприятным условиям окружающей среды. Они часто встречаются в почве, воде и на поверхности растений. Среди представленных родов выделяются *Staphylococcus* и *Streptococcus* (рис. 2). Хотя представители *Staphylococcus* являются известными патогенами человека и животных, было показано, что *Staphylococcus aureus* вызывал типичные симптомы бактериального заболевания у растений *A. thaliana in vitro* и в почве при искусственной инокуляции корней и листьев [Prithiviraj и др., 2005]. Среди представителей *Streptococcus* также существуют фитопатогенные бактерии, способные инфицировать живые ткани растений и вызывать различные заболевания [Kers и др., 2005; Li и др., 2019].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование микробиома хвои лиственницы сибирской методом секвенирования 16S рРНК (v3-v4) позволило выявить основные таксоны бактерий, ассоциированных с деревьями лиственницы в НПР. После обработки данных и фильтрации было получено 366 733 высококачественных последовательностей, которые были сгруппированы в 2794 варианта ампликонов, относящихся к бактериальным таксонам. Доминирующими отделами бактерий в образцах хвои лиственницы оказались Proteobacteria, Actinobacteriota, Firmicutes и Bacteroidota, что согласуется с их широким распространением в различных экосистемах и важной ролью в функционировании микробных сообществ. Среди выявленных родов наиболее распространенными были *Cutibacterium*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium* и *Klebsiella*. Выявленные таксоны бактерий играют важную роль в экологических взаимодействиях, включая симбиоз, патогенез и участие в биогеохимических процессах. Исследование вносит значительный вклад в изучение механизмов, обеспечивающих устойчивость лесных экосистем к антропогенным и биотическим воздействиям, а также углубляет понимание биоразнообразия и экологических функций микроорганизмов, обитающих в филлосфере хвойных растений. Полученные результаты имеют практическую ценность для разработки подходов к мониторингу и восстановлению лесных территорий, пострадавших от промышленных выбросов в экстремальных условиях Арктики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Абаимов А. П. и др. Леса Красноярского Заполярья. Наука. Новосиб. отд-ние, 1997. С. 208.

2. Бенькова В. Е., Бенькова А. В. Особенности строения древесины северных популяций сибирских видов лиственницы // Лесоведение. 2015. № 4. С. 28–36.

3. Дереворазрушающие свойства арктических штаммов *Porodaedalea niemelaei* M. Fischer и *Trichoderma atroviride* Bissett / Ю. А. Литовка [и др.] // Химия растительного сырья. 2017. № 1. С. 145–150.

4. What matters most? Assessment of within-canopy factors influencing the needle microbiome of the model conifer, *Pinus radiata* / S. Addison [et al.] // Environ Microbiome. 2023. Т. 18. С. 45.

5. The Biodiversity of Grapevine Bacterial Endophytes of *Vitis amurensis* Rupr. / О. А. Aleynova [et al.] // Plants. 2022. Т. 11, № 9. С. 1128.

6. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil / S. T. Bates [et al.] // ISME J. 2011. Т. 5, № 5. С. 908–917.

7. Analysis of genes contributing to plant-beneficial functions in plant growth-promoting rhizobacteria and related Proteobacteria / M. Bruto [et al.] // Sci Rep. 2014. Т. 4, № 1. С. 6261.

8. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data / B. J. Callahan [et al.] // Nat Methods. 2016. Т. 13, № 7. С. 581–583.

9. Carlson R. R., Vidaver A. K. Taxonomy of *Corynebacterium* Plant Pathogens, Including a New Pathogen of Wheat, Based on Polyacrylamide Gel Electrophoresis of Cellular Proteins† // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 1982. Т. 32, № 3. С. 315–326.

10. Ecology and Evolution of Plant Microbiomes / V. Cordovez [et al.] // Annu Rev Microbiol. 2019. Т. 73. С. 69–88.

11. De Mandal S., Jeon J. Phyllosphere Microbiome in Plant Health and Disease // Plants. 2023. Т. 12, № 19. С. 3481.

12. Fakhrutdinova V. V., Benkova V. E., Shashkin A. V. Variability of the tree-rings structure of Gmelin's larch at northern tree line (peninsula of Taymyr) // Siberian Journal of Forest Science. 2017. Т. 4, № 2. С. 62–69.

13. The Industrial Organism *Corynebacterium glutamicum* Requires Mycothiol as Antioxidant to Resist Against Oxidative Stress in Bioreactor Cultivations / F. S. F. Hartmann [et al.] // Antioxidants (Basel). 2020. Т. 9, № 10. С. 969.

14. A large, mobile pathogenicity island confers plant pathogenicity on *Streptomyces* species / J. A. Kers [et al.] // Molecular Microbiology. 2005. Т. 55, № 4. С. 1025–1033.

15. Li Y. и др. Virulence mechanisms of plant-pathogenic *Streptomyces* species: an updated review // Microbiology. 2019. Т. 165, № 10. С. 1025–1040.

16. Lindow S. E., Brandl M. T. Microbiology of the Phyllosphere // Appl Environ Microbiol. 2003. Т. 69, № 4. С. 1875–1883.

17. Plant Holobiont Theory: The Phytomicrobiome Plays a Central Role in Evolution and Success / D. Lyu [et al.] // Microorganisms. 2021. Т. 9, № 4. С. 675.

18. Martin M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads // EMBnet journal. 2011. Т. 17, № 1. С. 10–12.

19. Müller T., Ruppel S. Progress in cultivation-independent phyllosphere microbiology // FEMS Microbiol Ecol. 2014. Т. 87, № 1. С. 2–17.

20. Plant-growth promotion by proteobacterial strains depends on the availability of phosphorus and iron in *Arabidopsis thaliana* plants / D. Orellana [et al.] // *Front Microbiol.* 2022. T. 13. C. 1083270.

21. Pavlov I. N. [et al.] Phylogenetic Relationships, Pathogenic Traits, and Wood-Destroying Properties of *Porodaedalea niemelaei* M. Fischer Isolated in the Northern Forest Limit of *Larix gmelinii* Open Woodlands in the Permafrost Area. 2018.

22. *Staphylococcus aureus* pathogenicity on *Arabidopsis thaliana* is mediated either by a direct effect of salicylic acid on the pathogen or by SA-dependent, NPR1-independent host responses / B. Prithiviraj [et al.] // *The Plant Journal.* 2005. T. 42, № 3. C. 417–432.

23. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools / C. Quast [et al.] // *Nucleic Acids Research.* 2013. T. 41. C. D590–D596.

24. Potential Plant-To-Plant Transmission: Shared Endophytic Bacterial Community Between *Ziziphus lotus* and Its Parasite *Cuscuta epithymum* / N. Radouane [et al.] // *Microb Ecol.* 2024. T. 87, № 1. C. 119.

25. Roda-Garcia J. J., Haro-Moreno J. M., López-Pérez M. Evolutionary pathways for deep-sea adaptation in marine planktonic Actinobacteriota // *Front. Microbiol.* 2023. T. 14.

26. Pathogenomics of *Xanthomonas*: understanding bacterium – plant interactions / R. P. Ryan [et al.] // *Nat Rev Microbiol.* 2011. T. 9, № 5. C. 344–355.

27. Sapre S., Gontia-Mishra I., Tiwari S. *Klebsiella* sp. confers enhanced tolerance to salinity and plant growth promotion in oat seedlings (*Avena sativa*) // *Microbiological Research.* 2018. T. 206. C. 25–32.

28. Singh R. P., Jha P., Jha P. N. The plant-growth-promoting bacterium *Klebsiella* sp. SBP-8 confers induced systemic tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) under salt stress // *Journal of Plant Physiology.* 2015. T. 184. C. 57–67.

29. Plant growth-promoting traits of culturable seed microbiome of citrus species from Purvanchal Himalaya / S. Sinha [et al.] // *Front. Plant Sci.* 2023. T. 14.

30. Phyllospheric Microbiomes: Diversity, Ecological Significance, and Biotechnological Applications / N. Sivakumar [et al.] // *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture.* 2020. T. 25. C. 113–172.

31. *Xanthomonas* diversity, virulence and plant–pathogen interactions / S. Timilsina [et al.] // *Nat Rev Microbiol.* 2020. T. 18, № 8. C. 415–427.

32. Vorholt J. A. Microbial life in the phyllosphere // *Nat Rev Microbiol.* 2012. T. 10, № 12. C. 828–840.

33. Host selection shapes crop microbiome assembly and network complexity / C. Xiong [et al.] // *New Phytol.* 2021. T. 229, № 2. C. 1091–1104.

34. Phosphoribosylpyrophosphate synthetase as a metabolic valve advances *Methylobacterium*/ *Methylobacterium* phyllosphere colonization and plant growth / C. Zhang [et al.] // *Nat Commun.* 2024. T. 15, № 1. C. 5969.

REFERENCES

1. Abaimov A. P. i dr. *Lesa Krasnoyarskogo Zapolyar'ya*. Nauka. Novosibirskoe otdelenie, 1997. C. 208.

2. Ben'kova V. E., Ben'kova A. V. Osobennosti stroeniya drevesiny severnykh populyacij sibirskih vidov listvennic // *Lesovedenie.* 2015. № 4. C. 28–36.

3. Litovka Yu. A. i dr. Derevorazrushayushchie svoystva arkticheskikh shtammov *Porodaedalea niemelaei* M. Fischer i *Trichoderma atroviride* Bissett // *Himiya rastitel'nogo syr'ya.* 2017. № 1. S. 145–150.

4. Addison S. i dr. What matters most? Assessment of within-canopy factors influencing the needle microbiome of the model conifer, *Pinus radiata* // *Environ Microbiome.* 2023. T. 18. C. 45.

5. Aleynova O. A. i dr. The Biodiversity of Grapevine Bacterial Endophytes of *Vitis amurensis* Rupr. // *Plants.* 2022. T. 11, № 9. C. 1128.

6. Bates S. T. i dr. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil // *ISME J.* 2011. T. 5, № 5. C. 908–917.

7. Bruto M. i dr. Analysis of genes contributing to plant-beneficial functions in plant growth-promoting rhizobacteria and related Proteobacteria // *Sci Rep.* 2014. T. 4, № 1. C. 6261.

8. Callahan B. J. i dr. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data // *Nat Methods.* 2016. T. 13, № 7. C. 581–583.

9. Carlson R. R., Vidaver A. K. Taxonomy of *Corynebacterium* Plant Pathogens, Including a New Pathogen of Wheat, Based on Polyacrylamide Gel Electrophoresis of Cellular Proteins† // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.* 1982. T. 32, № 3. C. 315–326.

10. Cordovez V. i dr. Ecology and Evolution of Plant Microbiomes // *Annu Rev Microbiol.* 2019. T. 73. C. 69–88.

11. De Mandal S., Jeon J. Phyllosphere Microbiome in Plant Health and Disease // *Plants.* 2023. T. 12, № 19. C. 3481.

12. Fakhrutdinova V. V., Benkova V. E., Shashkin A. V. Variability of the tree-rings structure of Gmelin's larch at northern tree line (peninsula of Taymyr) // *Siberian Journal of Forest Science.* 2017. T. 4, № 2. C. 62–69.

13. Hartmann F. S. F. и др. The Industrial Organism *Corynebacterium glutamicum* Requires Mycothiol as Antioxidant to Resist Against Oxidative Stress in Bioreactor Cultivations // *Antioxidants (Basel).* 2020. T. 9, № 10. C. 969.

14. Kers J. A. i dr. A large, mobile pathogenicity island confers plant pathogenicity on *Streptomyces* species // *Molecular Microbiology.* 2005. T. 55, № 4. C. 1025–1033.

15. Li Y. i dr. Virulence mechanisms of plant-pathogenic *Streptomyces* species: an updated review // *Microbiology.* 2019. T. 165, № 10. C. 1025–1040.

16. Lindow S. E., Brandl M. T. Microbiology of the Phyllosphere // *Appl Environ Microbiol.* 2003. T. 69, № 4. C. 1875–1883.

17. Lyu D. i dr. Plant Holobiont Theory: The Phytomicrobiome Plays a Central Role in Evolution and Success // *Microorganisms.* 2021. T. 9, № 4. C. 675.

18. Martin M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads // *EMBnet. journal.* 2011. T. 17, № 1. C. 10–12.

19. Müller T., Ruppel S. Progress in cultivation-independent phyllosphere microbiology // *FEMS Microbiol Ecol.* 2014. T. 87, № 1. C. 2–17.

20. Orellana D. i dr. Plant-growth promotion by proteobacterial strains depends on the availability of phosphorus and iron in *Arabidopsis thaliana* plants // *Front Microbiol.* 2022. T. 13. C. 1083270.
21. Pavlov I. N. i dr. Phylogenetic Relationships, Pathogenic Traits, and Wood-Destroying Properties of *Porodaedalea niemelaei* M. Fischer Isolated in the Northern Forest Limit of *Larix gmelinii* Open Woodlands in the Permafrost Area. 2018.
22. Prithviraj B. i dr. *Staphylococcus aureus* pathogenicity on *Arabidopsis thaliana* is mediated either by a direct effect of salicylic acid on the pathogen or by SA-dependent, NPR1-independent host responses // *The Plant Journal.* 2005. T. 42, № 3. C. 417–432.
23. Quast C. i dr. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools // *Nucleic Acids Research.* 2013. T. 41. C. D590–D596.
24. Radouane N. i dr. Potential Plant-To-Plant Transmission: Shared Endophytic Bacterial Community Between *Ziziphus lotus* and Its Parasite *Cuscuta epithymum* // *Microb Ecol.* 2024. T. 87, № 1. C. 119.
25. Roda-Garcia J. J., Haro-Moreno J. M., López-Pérez M. Evolutionary pathways for deep-sea adaptation in marine planktonic Actinobacteriota // *Front. Microbiol.* 2023. T. 14.
26. Ryan R. P. i dr. Pathogenomics of *Xanthomonas*: understanding bacterium–plant interactions // *Nat Rev Microbiol.* 2011. T. 9, № 5. C. 344–355.
27. Sapre S., Gontia-Mishra I., Tiwari S. *Klebsiella* sp. confers enhanced tolerance to salinity and plant growth promotion in oat seedlings (*Avena sativa*) // *Microbiological Research.* 2018. T. 206. C. 25–32.
28. Singh R. P., Jha P., Jha P. N. The plant-growth-promoting bacterium *Klebsiella* sp. SBP-8 confers induced systemic tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) under salt stress // *Journal of Plant Physiology.* 2015. T. 184. C. 57–67.
29. Sinha S. i dr. Plant growth-promoting traits of culturable seed microbiome of citrus species from Purvanchal Himalaya // *Front. Plant Sci.* 2023. T. 14.
30. Sivakumar N. i dr. Phyllospheric Microbiomes: Diversity, Ecological Significance, and Biotechnological Applications // *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture.* 2020. T. 25. C. 113–172.
31. Timilsina S. i dr. *Xanthomonas* diversity, virulence and plant – pathogen interactions // *Nat Rev Microbiol.* 2020. T. 18, № 8. C. 415–427.
32. Vorholt J. A. Microbial life in the phyllosphere // *Nat Rev Microbiol.* 2012. T. 10, № 12. C. 828–840.
33. Xiong C. i dr. Host selection shapes crop microbiome assembly and network complexity // *New Phytol.* 2021. T. 229, № 2. C. 1091–1104.
34. Zhang C. i dr. Phosphoribosylpyrophosphate synthetase as a metabolic valve advances *Methylobacterium/ Methylobacterium* phyllosphere colonization and plant growth // *Nat Commun.* 2024. T. 15, № 1. C. 5969.

© Мирошникова К. А., Литовка Ю. А.,
Джалолов И. И., Павлов И. Н., 2025

Поступила в редакцию 21.02.2025
Принята к печати 25.04.2025

АВТОРСКАЯ ССЫЛКА

Авдеева Е. В., см. Безруких В. А.
 Андропова А. А., см. Вайс А. А.
 Арефьева М. А., см. Раздымахо А. А.
 Безруких В. А. Роль лесостепной и подтаежной (травяных лесов) растительности в формировании ландшафтов бореальной зоны Приенисейской Сибири, с. 55–62
 Буторова О. Ф., см. ²Матвеева Р. Н.
 Вайс А. А. Шкала оценки процесса лесовосстановления и интенсивности роста молодняка сосны на залежных землях Красноярской лесостепи, с. 14–19
 Гетте И. Г., см. Пахарькова Н. В.
 Григорьев И. В., см. Шапиро В. Я.
 Гришлова М. В., см. ¹Матвеева Р. Н.
 Джалолов И. И., Мирошникова К. А.
 Друзянова В. П., см. Шапиро В. Я.
 Дук Д. В., см. Огурцов В. В.
 Залесов С. В., см. Предеина И. В.
 Итешина Н. М., см. Предеина И. В.
 Калабина А. А., см. Пахарькова Н. В.
 Комаров И. В., см. ¹Матвеева Р. Н.
 Коростелев А. С., см. ²Матвеева Р. Н.
 Коротков А. А., см. Безруких В. А.
 Кузнецова О. А., см. Безруких В. А.
 Куппер И. И., см. Пахарькова Н. В.
 Лигаева Н. А., см. Безруких В. А.
 Литовка Ю. А., Мирошникова К. А.
 Максимова К. М., см. Пахарькова Н. В.
 Мамедова С. К., см. Вайс А. А.
 Масенцова И. В., см. Пахарькова Н. В.
¹Матвеева Р. Н. Отсементированные 20-летние деревья сосны кедровой сибирской по интенсивности роста и раннему репродуктивному развитию, с. 35–39
²Матвеева Р. Н. Репродуктивное развитие полусубов 38-летнего возраста сосны кедровой сибирской в дендрарии СибГУ им. М. Ф. Решетнева, с. 40–45
 Мирошникова К. А. Бактериальный микробиом филлосферы лиственницы сибирской (*larix sibirica* ledeb.) в зоне влияния техно-

генных эмиссий предприятий Норильского промышленного района, с. 85–91

Мотырев Н. О., см. Вайс А. А.
 Новиков М. С., см. Шапиро В. Я.
 Огурцов В. В. Идентификация проблемы синхронизации процессов раскря брёвен и сушки пиломатериалов, с. 70–76
 Орлов А. А., см. Огурцов В. В.
 Павлов И. Н., Мирошникова К. А.
 Пахарькова Н. В. Кластеризация местообитаний сосны сибирской кедровой на склонах хребта Борус Западного Саяна, с. 63–69
 Перфильев П. Н., см. Шапиро В. Я.
 Попов А. С., см. Предеина И. В.
 Предеина И. В. Снижение возраста спелости как способ повышения продуктивности лесов и минимизации рисков при выращивании еловых насаждений, с. 27–34
 Раздымахо А. А. Методические подходы по формированию банка генетических данных деревьев основных лесообразующих пород на территории Российской Федерации, с. 7–13
 Савченкова В. А., см. Раздымахо А. А.
 Семенова М. Е., см. Предеина И. В.
 Слипец А. А., см. Раздымахо А. А.
 Сомов Е. В. Расчетная оценка линейного разрешения на местности цифровой беспилотной аэрофотосъемочной системы для задач таксационного дешифрирования (состояние вопроса, проблематика, модели), с. 20–26
 Субботин М. А., см. Пахарькова Н. В.
 Терехов Г. Г., см. Усольцев В. А.
 Тихонов Е. А., см. Шапиро В. Я.
 Усольцев В. А. Аллометрические модели биомассы и морфологии деревьев кедров сибирского на Урале и проблема мультиколлинеарности факторов, с. 46–54
 Шапиро В. Я. Оценка работоспособности трасс движения лесных машин на склоне оттаивающего почвогрунта с учетом маневрирования движителя, с. 77–84
 Шевелев С. Л., см. Сомов Е. В.
 Шенмайер Н. А., см. ²Матвеева Р. Н.
 Шикалова Е. А., см. Пахарькова Н. В.

AUTHOR'S LINK

Andronova A. A., see Vais A. A.
 Arefeva M. A., see Razdymaho A. A.
 Avdeeva E. V., see Bezrukikh V. A.
 Bezrukikh V. A. The role of forest-steppe and sub-taiga (grass forests) vegetation in the formation of landscapes of the boreal zone of Yenisei Siberia, p. 55–62
 Butorova O. F., see ²Matveeva R. N.
 Cupper I. I., see Pakharkova N. V.
 Druzyanova V. P., see Shapiro V. Ya.
 Duk D. V., see Ogurtsov V. V.
 Gette I. G., see Pakharkova N. V.
 Grigorev I. V., see Shapiro V. Ya.
 Grishlova M. V., see Matveeva R. N.
 Iteshina N. M., see Predeina I. V.
 Jalolov I. I., see Miroshnikova K. A.
 Kalabina A. A., see Pakharkova N. V.
 Komarov I. V., see Matveeva R. N.
 Korostelev A. S., see ²Matveeva R. N.
 Korotkov A. A., see Bezrukikh V. A.
 Kuznetsova O. A., see Bezrukikh V. A.
 Ligaeva N. A., see Bezrukikh V. A.
 Litovka Yu. A., see Miroshnikova K. A.
 Maksimova K. M., see Pakharkova N. V.
 Mamedova S. K., see Vais A. A.
 Masentsova I. V., see Pakharkova N. V.
¹Matveeva R. N. 20-year-old pinus sibirica trees selected by growth intensity and early reproductive development, p. 25–39
²Matveeva R. N. Reproductive development of 38-year-old siberian cedar pine semis in the arboretum of Reshetnev University, p. 40–45
 Miroshnikova K. A. Bacterial microbiome of the phyllosphere of siberian larch (*larix sibirica* ledeb.) in the zone of influence of industrial emissions from the Norilsk industrial region, p. 85–91
 Motyrev N. O., see Vais A. A.
 Novikov M. S., see Shapiro V. Ya.
 Orlov A. A., see Ogurtsov V. V.

Ogurtsov V. V. Identification of the problem of synchronization of log cutting and sawn timber drying processes p. 70–76
 Pakharkova N. V. Clustering of siberian cedar pine habitats on the slopes of the borus ridge of the Western Sayan, p. 63–69
 Pavlov I. N., see Miroshnikova K. A.
 Perfiliev P. N., see Shapiro V. Ya.
 Popov A. S., see Predeina I. V.
 Predeina I. V. Reducing the age of maturity as a way to increase forest productivity and minimize risks in growing spruce stands, p. 27–34
 Razdymaho A. A. Methodological approaches to the formation of a bank of genetic data of trees of the main forest-forming species in the territory of the Russian Federation, p. 7–13
 Savchenkova V. A., see Razdymaho A. A.
 Semenova M. E., see Predeina I. V.
 Shapiro V. Ya. Assessment of forest machine tracks operability on the slope of thawing soil taking into account manoeuvring of the vehicle, p. 77–84
 Shenmayer N. A., see ²Matveeva R. N.
 Shevelyov S. L., see Somov E. V.
 Shikalova E. A., see Pakharkova N. V.
 Slipets A. A., see Razdymaho A. A.
 Somov E. V. Calculated estimation of the linear resolution on the ground of a digital unmanned aerial photography system for taxation decryption tasks (issue status, problematics, models), p. 20–26
 Subbotin M. A., see Pakharkova N. V.
 Terekhov G. G., see Usoltsev V. A.
 Tikhonov E. A., see Shapiro V. Ya.
 Usoltsev V. A. Allometric models of biomass and morphology of *pinus sibirica* Du Tour trees in the Urals and the problem of multicollinearity of factors, p. 46–54
 Vais A. A. Assessment scale of reforestation process and growth intensity of young pine trees on fallow lands of the Krasnoyarsk forest-steppe, p. 14–19
 Zalesov S. V., see Predeina I. V.

