

ISSN 1993-0135

ХВОЙНЫЕ



БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

2026

Том XLIV
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 XLIV
№ 2

Красноярск
2026

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLIV, № 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 агромеханический 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 Zufar 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)
Хамитов Ренат Салимович, д.с.-х.н., доцент (РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва)
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 XLIV, 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)
Kazakov Yakov V., Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Khamitov Renat S., Dr. Sc. in Agriculture, Docent (Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow)
Kobayashi Ryosuke, Cand. Sc. in Agriculture (North Field Biosphere Research Center (Hokkaido University)
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)
Ogurtsov 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)
Storojenko 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)
Verkhovets 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) 222-73-58, 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) 222-73-58, 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 20.05.2026. Дата выхода в свет 29.05.2026. Формат 70×108/8.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 16,9. Тираж 700 экз.
Заказ 3691. С 1281/26. 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

Мантулина А. В., Коновалова Д. А., Братилова Н. П. Особенности роста и формирования фитомассы сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой зимнего срока посева	7
Сомов Е. В., Шевелев С. Л. Разрешающий потенциал цифровых беспилотных аэрофотосъёмочных систем на российских VTOL-платформах для дешифровочной таксации	13
Усольцев В. А., Часовских В. П. Обнаружение лесных пожаров с использованием технологий глубокого обучения (обзор зарубежной литературы)	22
Тарасов П. А., Тарасова А. В. Сравнительные исследования лесной подстилки коренного елового и производного осинового насаждений	52
Демина Н. А., Файзулин Д. Х. Оценка признака трёххвойности сосны обыкновенной в качестве раннего диагностического критерия скорости роста деревьев	60
Копылова Г. А. Молекулярно-генетическая диагностика посадочного материала, выращиваемого в лесных питомниках Архангельской области	65
Вараксин Г. С., Валетчик М. Е., Вайс А. А. Опыт выращивания кедра сибирского в подтаежной зоне Сибири	71
Татарников Д. В. Особенности формирования второго поколения ели в старовозрастных березняках	76
Мельник П. Г., Насыпайко Н. Ю., Мерзленко М. Д. Динамика роста смешанных хвойных культур К. Ф. Тюрмера	82
Авдеева Е. В., Ровных Н. Л., Кочанкина А. Б. Изменчивость ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) на объектах озеленения города Красноярска	89

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Криворотова А. И., Эскин В. Д., Эскина В. Р., Литвин Р. Р. Исследование свойств плитного материала различной плотности из коры лиственных пород древесины	95
---	----

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Кох Ж. А. Разработка производственных показателей для аналитического контроля процесса экстракции вторичного сырья переработки кедровых шишек	105
---	-----

Авторская ссылка	111
------------------------	-----

Contents

BIOLOGY AND ECOLOGY, FORESTRY

Mantulina A. V., Konovalova D. A., Bratilova N. P. Features of growth and formation of phytomass of seedlings of siberian cedar pine with a closed root system of the winter sowing period	7
Somov E. V., Shevelyov S. L. The resolution potential of digital unmanned aerial photography systems on russian VTOL platforms for decryption taxation	13
Usoltsev V. A., Chasovskikh V. P. Forest fire detection using deep learning technologies (review of foreign literature)	22
Tarasov P. A., Tarasova A. V. Comparative studies of the forest litter of native spruce and derived aspen plantings	52
Demina N. A., Fayzulin D. Kh. Evaluation of the three-needle trait of scots pine as an early diagnostic criterion of tree growth rate	60
Kopylova G. A. Molecular genetic diagnostics of planting material grown in forest nurseries of the Arkhangelsk region	65
Varaksin G. S., Valetchik M. Ye., Vais A. A. Experience of cultivating siberian cedar pine in the subtaiga zone of Siberia	71
Tatarnikov D. V. Features of the second generation of spruce in old-aged birch forests	76
Melnik P. G., Nasypayko N. Yu., Merzlenko M. D. Dynamics of growth of mixed coniferous crops by K. F. Tyurmer	82
Avdeeva E. V., Rovnych N. L., Kochankina A. B. Variability of the assimilation apparatus of scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) at landscaping sites in Krasnoyarsk	89

TECHNOLOGY OF HARVESTING AND MECHANICAL PROCESSING OF WOOD

Krivorotova A. I., Eskin V. D., Eskina V. R., Litvin R. R. Investigation of the properties of hardwood bark board material with various densities	95
--	----

CHEMICAL PROCESSING TECHNOGY

Kokh Zh. A. Development of production indicators for analytical quality control of the extraction process of secondary raw materials from siberian pine cones processing	105
Author's link	112

ОСОБЕННОСТИ РОСТА И ФОРМИРОВАНИЯ ФИТОМАССЫ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ ЗИМНЕГО СРОКА ПОСЕВА*

А. В. Мантулина, Д. А. Коновалова, Н. П. Братилова

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

Аннотация. Определена всхожесть семян сосны кедровой сибирской при зимнем посеве в кассеты на субстратах в различных сочетаниях на основе верхового торфа. Определены показатели надземной и подземной фракций сеянцев после четырех месяцев выращивания при зимнем посеве, в том числе в зависимости от варианта субстрата. Проведен анализ индексов качества сеянцев, выращиваемых с закрытой корневой системой, таких, как индекс компактности, индекс здоровья и индекс качества Диксона в зависимости от состава субстрата. С помощью регрессионного анализа подобраны уравнения для описания формируемой сеянцами фитомассы с учетом ее фракционного состава (корни и надземная часть).

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, сеянцы с ЗКС, субстрат, фитомасса, индексы качества, зимний посев.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 7–12

FEATURES OF GROWTH AND FORMATION OF PHYTOMASS OF SEEDLINGS OF SIBERIAN CEDAR PINE WITH A CLOSED ROOT SYSTEM OF THE WINTER SOWING PERIOD

A. V. Mantulina, D. A. Konovalova, N. P. Bratilova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Abstract. The germination rate of Siberian stone pine seeds sown in trays on various combinations of high-moor peat-based substrates was determined. The aboveground and belowground fractions of seedlings were determined after four months of cultivation using winter sowing, including their dependence on the substrate type. Quality indices of seedlings grown with closed root systems, such as the compactness index, health index, and Dixon quality index, were analyzed depending on the substrate composition. Regression analysis was used to develop equations for describing the phytomass formed by seedlings, taking into account its fractional composition (roots and aboveground portion).

Keywords: Siberian cedar pine, seedlings with closed root system, substrate, phytomass, quality indices, winter sowing.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется созданию лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой (ЗКС). Изучением особенностей выращивания посадочного материала сосны кедровой сибирской с ЗКС в СибГУ им. М. Ф. Решетнева занимаются Н. П. Братилова, А. А. Коротков, Д. А. Коновалова и др. [3; 4; 8]. Было установлено, что на рост и развитие сеянцев в течение первого

вегетационного периода оказывает влияние состав субстрата. Добавление к торфу вермикулита или коксового волокна влияло на увеличение линейных размеров надземной части сеянцев сосны кедровой сибирской [7; 9].

На Дальнем Востоке изучали выращивание сеянцев сосны кедровой корейской с ЗКС, отмечая их лучшую приживаемость при увеличении объема кома до 200–250 см³ [13]. Было отмечено, что верховой торф

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» проекта «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)» (№ FEFE-2024-0013).

низкой степени разложения является более предпочтительным в сравнении с субстратом питательным «Фаско» и торфом нейтрализованным [14]. По данным Т. А. Зоткиной с соавтором [5] посадочный материал сосны кедровой корейской в условиях юга Дальнего Востока не может достигнуть размеров, соответствующим действующим правилам лесовосстановления. Был представлен проект организации питомника для выращивания сеянцев хвойных пород, в том числе сосны кедровой корейской, с закрытой корневой системой в условиях Хабаровского края [11].

В теплицах ООО «Прибайкальское лесохозяйственное предприятие» изучали выращивание саженцев сосны кедровой сибирской с применением крезацина – искусственного стимулятора роста. При этом отмечался ускоренный набор растениями фитомассы [1]. Встречаются рекомендации по использованию гетероауксина для ускоренного развития корней кедровых сеянцев [15]. Имеются исследования по формированию надземной и подземной частей растений у посадочного материала сосны кедровой сибирской при разных условиях выращивания. Отмечается, что при выращивании с ЗКС формируется большее количество мелких корней, в соотношении с крупными как 1:0,17 [10].

Однако остаются нераскрытыми вопросы особенностей формирования надземной и подземной фитомассы сеянцев, выращиваемых с закрытой корневой системой в зависимости от агротехники выращивания.

Определение особенностей роста и накопления фитомассы растениями сосны кедровой сибирской в зависимости от вида посадочного материала (с открытой и закрытой корневой системой), сроков посадки, агротехники выращивания может внести весомый вклад в решение важных задач лесохозяйственного производства.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являлись сеянцы сосны кедровой сибирской, выращиваемые с закрытой корневой системой в оранжерее СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Семена для посева были собраны в Тюхтетском лесничестве Красноярского края и простратифицированы в зимней непромерзающей траншее. Высев семян производился в январе в кассеты Plantek-81F.

В качестве основы для субстратов использовали верховой нейтрализованный торф.

В качестве дополнительных компонентов для смесей применяли перлит, вермикулит или кокосовое волокно (табл. 1).

Для определения фитомассы отбирали модельные сеянцы. Их высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С в сушильном шкафу ШС-

80-01СПУ. Взвешивание проводили на электронных весах МН-100 100g/0,01g.

Обработка результатов наблюдений проводилась с помощью программы Microsoft Excel. Уравнения, описывающие ряд зависимостей, подбирали в программе CurveExpert1.3.

Для сеянцев были подсчитаны комплексные показатели качества, включающие индекс качества Диксона, индекс компактности, индекс здоровья [6; 14; 16; 17].

$$DQI = TDW / HDR + 100SRR, \quad (1)$$

$$CP = SDW/H, \quad (2)$$

$$SHI = (D/H \times RDW/SDW) \times TDW, \quad (3)$$

где DQI – индекс качества Диксона сеянцев; CP – индекс компактности сеянцев; SHI – индекс здоровья сеянцев; TDW – сухая масса сеянцев, г; HDR – отношение высоты сеянца к диаметру у корневой шейки, см/мм; SRR – отношение сухой массы надземной части к массе подземной части, г; SDW – сухая масса надземной части сеянца, г; RDW – сухая масса подземной части, г; H – высота сеянца, см; D – диаметр сеянца, мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционными сроками посева семян сосны кедровой сибирской в условиях юга Средней Сибири являются конец весны – начало летнего периода после проведенной стратификации или осенью после сбора. Считается, что при использовании посадочного материала с закрытой корневой системой в условиях теплицы можно расширить период посева кедровых семян для высадки на лесохозяйственные площади в течение всего вегетационного периода [2; 12].

При посеве простратифицированных семян сосны кедровой сибирской II класса качества в кассеты с субстратом в январе их средняя всхожесть составила 43,5 %. В зависимости от состава субстрата всхожесть варьировала от 35,2 до 53,7 %. Большая всхожесть отмечена на варианте с торфом без добавок (рис. 1).

Первые всходы появились на 12 день, массовые отмечались на 19–26 дни.

Через 4 месяца выращивания сеянцы имели среднюю длину гипокотили 5,8±0,08 см, диаметр стволика у шейки корня – 1,5±0,01 см, длину первичной хвои – 0,9±0,02 см. Средняя длина центрального корня, определенная по модельным сеянцам, равнялась 11,8±0,95 см. Масса корней одного сеянца в среднем составила 0,06±0,003 г, средняя масса надземной части равнялась 0,11±0,007 г, а суммарная масса сеянца – 0,17±0,01 г в абсолютно сухом состоянии. На долю корней в среднем приходилось около 35 % общей фитомассы (табл. 2).

Таблица 1
Экспериментальные варианты субстратов

Номер варианта	Обозначение варианта	Основа субстрата, %	Добавочный компонент субстрата, %
1	T ₁₀₀	торф, 100	–
2	T ₅₀ P ₅₀	торф, 50	перлит, 50
3	T ₅₀ B ₅₀	торф, 50	вермикулит, 50
4	T ₅₀ K ₅₀	торф, 50	кокосовое волокно, 50

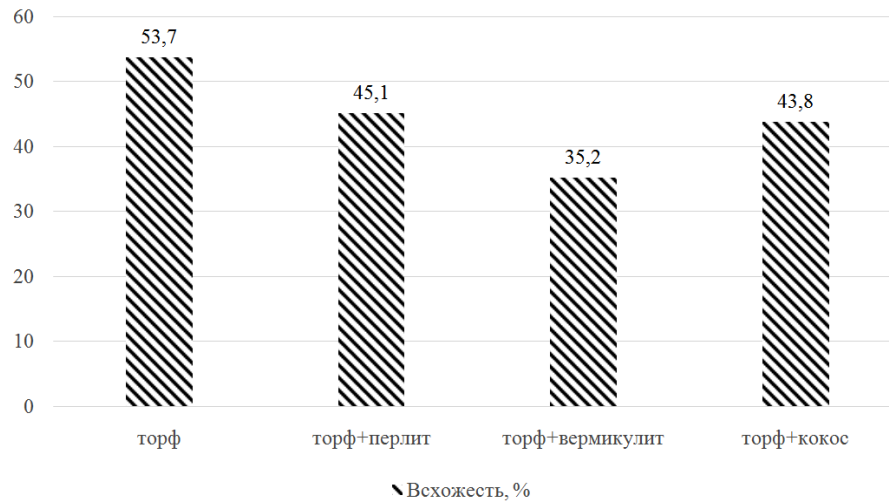


Рис. 1. Всхожесть семян на субстратах разного состава, %



Рис. 2. Появление всходов

Таблица 2
Показатели сеянцев с ЗКС

Показатель	$\bar{X}_{\text{ср.}}$	m	$\pm\sigma$	V, %	P, %	Уровень изменчивости
Длина гипокотиля, см	5,8	0,08	1,72	29,7	1,3	повышенный
Диаметр стволика, см	1,5	0,01	0,19	12,8	0,6	средний
Длина первичной хвои, см	0,9	0,02	0,34	37,2	1,7	высокий
Длина корня, см	11,8	0,95	5,59	47,5	8,0	очень высокий
Фитомасса корней, г в а.с.с.	0,06	0,003	0,020	30,9	5,2	высокий
Фитомасса надземной части, г в а.с.с.	0,11	0,007	0,044	38,0	6,0	высокий
Общая фитомасса, г в а.с.с.	0,17	0,010	0,063	36,5	5,8	высокий

Отмечается высокий уровень изменчивости всех фракций фитомассы, очень высокий – по длине корней сеянцев.

Установлено влияние состава субстрата на формирование фитомассы сеянцев (рис. 3).

Общая масса сеянцев в зависимости от субстрата варьировала от 0,15 до 0,21 г в абсолютно сухом состоянии. Масса надземной части сеянцев составила от 0,09 г (торф без добавок) до 0,14 г на субстрате из торфа с вермикулитом. Масса корней колебалась от 0,04 г (торф с перлитом в равных пропорциях) до 0,07 г на смеси торфа и вермикулита. Добавка к торфу кокосово-

го волокна в соотношении 1:1 не повлекла значительных изменений в формируемой фитомассе сеянцев.

Проведен анализ индексов качества сеянцев, выращиваемых с ЗКС. Выявлено, что индекс компактности сеянцев (CP) равнялся в среднем 0,023, а индекс здоровья (SHI) – 0,018. Индекс качества Диксона (DQI) в среднем составил 2,32, варьируя для разных субстратов от 2 до 2,8. Наименьшее значение DQI соответствовало субстрату из торфа с добавлением перлита ($T_{50P_{50}}$), наивысшее значение – при выращивании сеянцев на субстрате с примесью вермикулита ($T_{50B_{50}}$) (табл. 3).

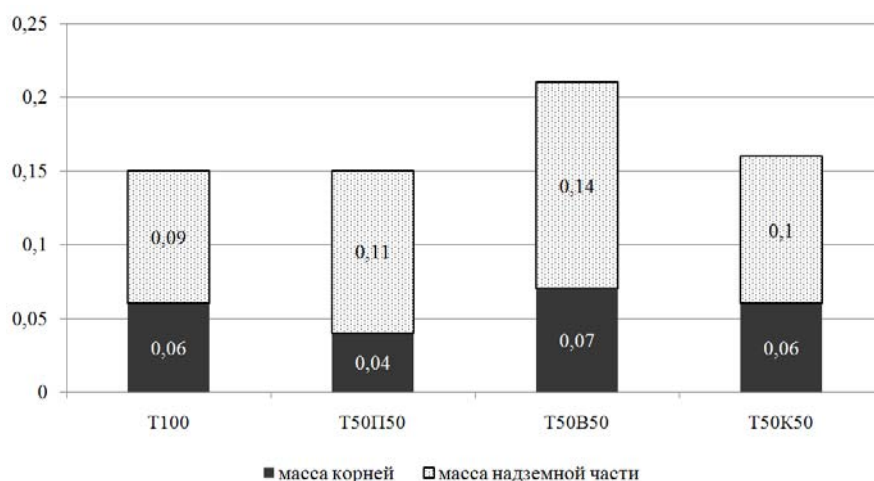


Рис. 3. Фракционный состав фитомассы сеянцев на субстратах разного состава, г в а.с.с.

Таблица 3
Индексы качества сеянцев с ЗКС

Обозначение субстрата	DQI	CP	SHI
T ₁₀₀	2,3	0,02	0,02
T ₅₀ П ₅₀	2,0	0,02	0,01
T ₅₀ В ₅₀	2,8	0,03	0,02
T ₅₀ К ₅₀	2,2	0,02	0,02
Среднее	2,32	0,023	0,018

Проведен регрессионный анализ накопления фитомассы сеянцами сосны кедровой сибирской, выращиваемых с закрытой корневой системой в кассетах.

Формирование фитомассы надземной части сеянцев в течение четырех месяцев выращивания в кассетах при зимнем посеве аппроксимируется уравнением:

$$Y = 0,0453 + 0,0018X - 0,1260/X^2,$$

где Y – фитомасса надземной части, г в а.с.с.; X – высота сеянца, см.

Накопление фитомассы подземной части сеянцев можно описать уравнением:

$$Y = 1 / (17,712 - 1,964X^{0,788}),$$

где Y – фитомасса подземной части, г в а.с.с.; X – длина корня, см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определена всхожесть семян сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных субстратах с верховым торфом. Лучшая всхожесть семян при зимнем посеве в условиях оранжереи была отмечена на субстратах с чистым торфом (53,7 %).

Определены показатели надземной и подземной частей сеянцев после четырех месяцев выращивания. Выявлено, что в этом возрасте масса корневой системы составила около 35 % от общей массы сеянца. Корни меньшей длины и массы отмечены у растений, выращиваемых на смеси торфа и перлита в равных пропорциях. Большее накопление всех фракций фитомассы отмечено у сеянцев, выращиваемых на торфяном субстрате в равном сочетании с вермикулитом.

Анализируя показатели роста и формирования фитомассы сеянцев с закрытой корневой системой на разных составах субстратов, установлено изменение индекса качества Диксона сеянцев от 2 до 2,8. Меньший индекс качества отмечается у сеянцев на субстратах из торфа с перлитом. При выращивании сеянцев сосны кедровой сибирской на субстрате из торфа и вермикулита в равных долях индекс качества Диксона сеянцев повышается, что свидетельствует о перспективности подобной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Белых О. А., Лукиячук Л. П. Влияние синтетического стимулятора роста на развитие саженцев сосны кедровой // Балтийский морской форум : материалы XI Междунар. Балтийского морского форума. Калининград, 25–30 сентября 2023 года. 2023. С. 19–20.
2. Биометрические показатели саженцев хвойных пород с открытой и закрытой корневой системой / Р. А. Третьякова, О. В. Паркина, О. Е. Якубенко, А. А. Якубенко // Лесохозяйственная информация. 2023. № 2. С. 136–145.
3. Выращивание сосны кедровой сибирской с закрытой и открытой корневой системой : монография / Н. П. Братилова, Д. А. Коновалова, А. А. Коротков, А. В. Мантулина / СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, 2025. 176 с.
4. Братилова Н. П., Коротков А. А., Коновалова Д. А. Влияние субстрата на рост и развитие сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. 40, № 5. С. 347–352.
5. Зоткина Т. А., Усов В. Н. Применение ЭМ-препаратов для выращивания сеянцев кедр корейского

с закрытой корневой системой // Аграрный вестник Приморья. 2023. № 3(31). С. 23–26.

6. Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена / А. И. Новиков, С. В. Ребко, Т. П. Новикова, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 1 (49). С. 23–36.

7. Рост сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных субстратах / Д. А. Коновалова, Н. П. Братилова, А. В. Мантулина, А. А. Коротков // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 5. С. 55–67.

8. Коновалова Д. А., Братилова Н. П., Мантулина А. В. Рост однолетних сеянцев сосны кедровой сибирской с открытой и закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 3. С. 41–50.

9. Коновалова Д. А., Братилова Н. П., Мантулина А. В., Щерба Ю. Е. Развитие сеянцев с закрытой корневой системой сосны кедровой сибирской зимнего срока посева // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 5. С. 29–33.

10. Матвейчук О. С., Третьякова Р. А., Паркина О. В. Динамика развития саженцев сосны кедровой сибирской с разным типом корневой системы // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : материалы VIII Всерос. (нац.) науч. конф. с междунар. участием. 20 декабря 2023 г. Новосибирск, 2023. С. 85–88.

11. Меньшиков А. В., Бессонова Н. В., Выводцев Н. В. Проект организации лесного питомника с целью выращивания сеянцев хвойных и лиственных пород с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43, № 1. С. 68–72.

12. Оплетев А. С., Жигулин Е. В., Залесов С. В. Опыт многоротационного выращивания контейнерного посадочного материала для искусственного лесовосстановления в теплицах с регулируемым микроклиматом // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41, № 2. С. 152–157.

13. Перевейтайло И. И. Первые итоги и перспективы применения технологии создания лесных культур с использованием ПМЗК // Лесные ресурсы Дальнего Востока и их использование, 2001. С. 117–119.

14. Приходько О. Ю. Выращивание сеянцев основных лесобразующих пород с закрытой корневой системой на различных субстратах в условиях Приморского края // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В. Р. Филиппова, 2024. № 2 (75). С. 107–113.

15. Рунова Е. М., Денисенко А. В. Некоторые особенности роста и развития сеянцев сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в условиях теплицы // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2022. № 62. С. 204–207.

16. Identification of Appropriate Light Intensity and Daytime Temperature for Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Seedlings in a Plant Factory with Artificial Lighting for Use as Grafting Material / H.-C. Yang, Y.-H. Kim, H.-J. Byun et al. // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 5. P. 4481.

17. Saha R., Ginwal H. S., Chandra G., Barthwal S. Integrated assessment of adventitious rhizogenesis in *Eucalyptus*: root quality index and rooting dynamics //

Journal of Forestry Research. 2020. Vol. 31, № 6. P. 2145–2161.

REFERENCES

1. Belyh O. A., Lukiyanchuk L. P. Vliyanie sinteticheskogo stimulyatora rosta na razvitie sazhencev sosny kedrovoj // Baltijskij morskoy forum : Mater. XI Mezhdunar. Baltijskogo morskogo foruma. Kalininograd, 25–30 sentyabrya 2023 goda. 2023. S. 19–20.

2. Biometricheskie pokazateli sazhencev hvojnyh porod s otkrytoj i zakrytoj kornevoj sistemoy / R. A. Tret'yakova, O. V. Parkina, O. E. Yakubenko, A. A. Yakubenko // Lesohozyajstvennaya informatsiya. 2023. № 2. S. 136–145.

3. Bratilova N. P., Konovalova D. A., Korotkov A. A., Mantulina A. V. Vyrashchivanie sosny kedrovoj sibirskoy s zakrytoj i otkrytoj kornevoj sistemoy : monografiya / SibGU im. M. F. Reshetneva Krasnoyarsk, 2025. 176 s.

4. Bratilova N. P., Korotkov A. A., Konovalova D. A. Vliyanie substrata na rost i razvitie seyanцев sosny kedrovoj sibirskoy s zakrytoj kornevoj sistemoy // Hvojnye boreal'noj zony, 2022. Т. 40, № 5. S. 347–352.

5. Zotkina T. A., Usov V. N. Primenenie EM-preparatov dlya vyrashchivaniya seyanцев kedra korejskogo s zakrytoj kornevoj sistemoy // Agrarnyj vestnik Primor'ya. 2023. № 3(31). S. 23–26.

6. Indeks kachestva Diksona: svyaz' s tekhnologicheskimi vozdeystviem na lesnye semena / A. I. Novikov, S. V. Rebko, T. P. Novikova, E. P. Petrishchev // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2023. Т. 13. № 1 (49). S. 23–36.

7. Konovalova D. A., Bratilova N. P., Mantulina A. V., Korotkov A. A. Rost seyanцев sosny kedrovoj sibirskoy s zakrytoj kornevoj sistemoy na eksperimental'nykh substratakh // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 5. S. 55–67.

8. Konovalova D. A., Bratilova N. P., Mantulina A. V. Rost odnoletnih seyanцев sosny kedrovoj sibirskoy s otkrytoj i zakrytoj kornevoj sistemoy // Hvojnye boreal'noj zony. 2024. Т. 42, № 3. S. 41–50.

9. Konovalova D. A., Bratilova N. P., Mantulina A. V., Shcherba Yu. E. Razvitie seyanцев s zakrytoj kornevoj sistemoy sosny kedrovoj sibirskoy zimnego poseva // Hvojnye boreal'noj zony. 2024. Т. 42, № 5. S. 29–33.

10. Matvejchuk O. S., Tret'yakova R. A., Parkina O. V. Dinamika razvitiya sazhencev sosny kedrovoj sibirskoy s raznym tipom kornevoj sistemy // Rol' agrarnoy nauki v ustojchivom razvitii sel'skih territorij : Mater. VIII Vseros. (nac.) nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem. 20 dekabrya 2023 g. Novosibirsk, 2023. S. 85–88.

11. Men'shikov A. V., Bessonova N. V., Vyvodcev N. V. Projekt organizatsii lesnogo pitomnika s cel'yu vyrashchivaniya seyanцев hvojnykh i listvennykh porod s zakrytoj kornevoj sistemoy // Hvojnye boreal'noj zony. 2025. Т. 43, № 1. S. 68–72.

12. Opletaev A. S., Zhigulin E. V., Zalesov S. V. Opyt mnogorotatsionnogo vyrashchivaniya kontejnernogo posadochnogo materiala dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya v teplicah s reguliruemym mikroklimatom // Hvojnye boreal'noj zony. 2023. Т. 41, № 2. S. 152–157.

13. Perevejtajlo I. I. Pervye itogi i perspektivy primeneniya tekhnologii sozdaniya lesnykh kul'tur

s ispol'zovaniem PMZK // Lesnye resursy Dal'nego Vostoka i ih ispol'zovanie, 2001. S. 117–119.

14. Prihod'ko O. Yu. Vyrashchivanie seyancev osnovnyh lesoobrazuyushchih porod s zakrytoj kornevoj sistemoy na razlichnyh substratah v usloviyah Primorskogo kraya // Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii imeni V. R. Filippova, 2024. № 2 (75). S. 107–113.

15. Runova E. M., Denisenko A. V. Nekotorye osobennosti rosta i razvitiya seyancev sosny sibirskoj (*Pinus sibirica* Du Tour) v usloviyah teplicy // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa, 2022. № 62. S. 204–207.

16. Identification of Appropriate Light Intensity and Daytime Temperature for Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Seedlings in a Plant Factory with Artificial Lighting for Use as Grafting Material / H.-C. Yang, Y.-H. Kim, H.-J. Byun et al. // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 5. P. 4481.

17. Saha R., Ginwal H. S., Chandra G., Barthwal S. Integrated assessment of adventitious rhizogenesis in Eucalyptus: root quality index and rooting dynamics // Journal of Forestry Research. 2020. Vol. 31, № 6. P. 2145–2161.

© Мантулина А. В., Коновалова Д. А.,
Братилова Н. П., 2026

Поступила в редакцию 04.02.2026
Принята к печати 27.04.2026

РАЗРЕШАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЦИФРОВЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ НА РОССИЙСКИХ VTOL-ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ДЕШИФРОВОЧНОЙ ТАКСАЦИИ**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

¹E-mail: 000342@togudv.ru, ²E-mail: shevelev@sibsau.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разрешающего потенциала прототипов цифровых беспилотных аэрофотосъемочных систем на VTOL-платформах российских производителей для дешифровочной таксации леса и городского озеленения. Произведен обзор и анализ основных технических и экономико-эксплуатационных характеристик беспилотных авиационных VTOL-платформ и цифровых мало- и среднеформатных фотокамер с разрешением от 24–150 Мп, применяющихся для беспилотной аэрофотосъемки. Апробирована математическая модель для определения оценок линейного разрешения на местности на основе моделирования функции передачи модуляции системы и ее разрешающей способности. Определены расчетные оценки линейного разрешения на местности для рассматриваемых прототипов беспилотных систем для диапазона высот фотографирования 100–700 м с градацией 100 м. Выбранные границы высоты съемки позволяют для принятых значений фокусного расстояния получать аэрофотоснимки в диапазоне масштабов от 1:2000 до 1:10000. Получены прогнозные значения ширины полосы съемки на местности, позволяющие определять производительность аэрофотосъемочных работ. Предложен оптимальный вариант беспилотной аэрофотосъемочной системы по соотношению цена фотоаппаратуры/точность/производительность для аэрофотосъемки лесных насаждений и городского озеленения, обеспечивающей линейное разрешение на местности получаемых снимков: для высоты съемки 100 м – около 2 см при ширине полосы съемки 70 м; для высоты съемки 400 м – около 4,5 см при ширине полосы съемки 214 м; для высоты съемки 700 м – около 10 см при ширине полосы съемки 470 м.

Ключевые слова: дешифровочная таксация, беспилотная аэрофотосъемка, точность таксационных измерений, линейное разрешение на местности, размер пикселя на местности, функция передачи модуляции, разрешающая способность, ширина полосы съемки, выбор беспилотной авиационной системы.

*Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 13–21***THE RESOLUTION POTENTIAL OF DIGITAL UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPHY SYSTEMS ON RUSSIAN VTOL PLATFORMS FOR DECRYPTION TAXATION****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, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

¹E-mail: 000342@togudv.ru, ²E-mail: shevelev@sibsau.ru

Abstract. The article discusses the issues of the resolution potential of prototypes of digital unmanned aerial photography systems on VTOL platforms of Russian manufacturers for decryption taxation of forests and urban landscaping. The review and analysis of the main technical and cost-performance characteristics of unmanned aircraft VTOL platforms and digital small- and medium-format cameras with a resolution of 24–150 megapixels used for unmanned aerial photography is carried out. A mathematical model has been tested to determine estimates of linear resolution on the ground based on modeling the modulation transmission function of the system and its resolution. Calculated estimates of the linear resolution on the ground for the considered prototypes of unmanned systems for the range of heights of photographing 100–700 m with a gradation of 100 m have been determined. The selected shooting height limits make it possible to obtain aerial photographs in the scale range from 1:2000 to 1:10000 for the accepted focal length values. The predicted values of the width of the survey band on the ground have been obtained, which make it possible to determine the productivity of aerial photography. The optimal variant of an unmanned aerial photography system is proposed in terms of the ratio of camera price/accuracy/productivity for aerial photography of forest stands

and urban landscaping, providing linear resolution on the terrain of the images taken: for a shooting height of 100 m – about 2 cm with a shooting band width of 70 m; for a shooting height of 400 m – about 4.5 cm with a shooting band width of 214 m; for a shooting height of 700 m, it is about 10 cm with a shooting band width of 470 m.

Keywords: *decryption taxation, unmanned aerial photography, accuracy of taxation measurements, linear resolution on the ground, pixel size on the ground, modulation transmission function, resolution, width of the shooting band, choosing an unmanned aircraft system.*

ВВЕДЕНИЕ

Таксация леса и городского озеленения на основе дешифрирования материалов беспилотной аэрофотосъемки является одним из современных и перспективных технологических направлений, позволяющих значительно снизить трудоёмкость, стоимость и повысить производительность таксационных и инвентаризационных работ. Развитие беспилотных систем в настоящее время происходит с огромной скоростью, в том числе посредством интеграции их с системами машинного обучения, компьютерного зрения, адаптивными системами навигации и искусственного интеллекта. В связи с этим, прикладная таксационная наука должна быть готова к этому новому этапу развития техники, в том числе в направлении разработки и уточнения лесотаксационных моделей и нормативов, адаптированных к беспилотным цифровым технологиям.

Учитывая потребность как в лесном хозяйстве, так и в сфере городского зеленого строительства, в осуществлении аэрофотосъемки значительных площадей, основными рассматриваемыми типами беспилотных авиационных систем (БАС) должны быть носители, способные поддерживать съемку в самолетном режиме: планеры с крыльями жесткой конструкции, fixed-wing type (рис. 1, а), а также гибридные модели – VTOL, vertical take-off and landing (рис. 1, б), представляющие собой самолет с наличием роторов, обеспечивающих вертикальный взлет и посадку.

В последние несколько лет наблюдается своеобразный бум отечественного дроностроения, одним из ключевых направлений которого является производство VTOL-платформ. Использование VTOL по сравнению с классическим самолетом может приводить к некоторому удорожанию системы, а также снижению дальности полета, массы полезной нагрузки и очевидно устойчивости полета, однако при этом позволяет отказаться от использования взлетной площадки и посадочного парашюта (в конструкциях самолетов дополнительно к парашюту может использоваться и баллонет), что значительно упрощает эксплуатацию VTOL по сравнению с БАС самолетного типа и принципиально расширяет возможности их применения в условиях леса и городской ситуации. Для сравнения, требуемая площадка для взлета и посадки при размахе крыла 3–4 м: VTOL – 10×10 м; самолетный тип – около 200 м (с учетом требуемого пространства для набора высоты при взлете и возможного сноса БАС на парашюте при посадке в условиях воздействия ветра).

Принимая во внимание ранее отмеченное нами распространение не всегда адекватного мнения в отношении возможностей пространственного разрешения изображений, полученных посредством беспилотных съемок [15], в данной работе была поставлена

цель: дать расчетные оценки потенциала линейного разрешения на местности (ЛРМ) цифровых беспилотных аэрофотосъемочных систем (ЦАФС) на VTOL-платформах российских производителей с использованием наиболее распространенных в настоящее время фотокамер для беспилотной аэрофотосъемки для последующего определения возможных пределов точности дешифровочной таксации на современном уровне развития цифровой фотоаппаратуры и отечественных БАС.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обзор и анализ российских VTOL-платформ осуществлялся в отношении изделий с максимальной взлетной массой до 30 кг (малый тип БАС [4]), способных нести полезную нагрузку от 2,5 кг (фотокамера, фотообъектив, гиросtabilизирующая платформа и др.). Основные технические характеристики носителей, удовлетворяющих данным требованиям, получены на основе материалов официальных сайтов производителей, представлены в табл. 1, где упорядочены по типу маршевого двигателя и максимальной дальности полета со штатной полезной нагрузкой. Цены и гарантийный срок эксплуатации приведены по состоянию на январь 2026 г. по данным маркетплейса Налетай.рф [10].

Обзор фотокамер и соответствующих фотообъективов, имеющих применение в беспилотной аэрофотосъемке, производился в отношении комплекта аппаратуры с максимальной массой до 2 кг. Основные технические характеристики фотооборудования, удовлетворяющего данным требованиям, получены также на основе материалов официальных сайтов и рекламных проспектов производителей, представлены в табл. 2, где упорядочены по типу затвора и разрешению цифрового сенсора.

Определение расчетных оценок линейного разрешения на местности для прототипов ЦАФС осуществлялось в соответствии с ранее предложенным алгоритмом [15]. При расчетах в целях дальнейшего сравнения вариантов ЦАФС использовались следующие параметры аэрофотосъемки:

- путевая скорость носителя: 90 км/ч – принята как медиана значений крейсерской скорости рассматриваемых вариантов VTOL-платформ, которая обеспечивает наибольшую дальность полета при минимальном километровом расходе топлива (электроэнергии);

- минимальная граница высоты фотографирования (высоты полета над средней плоскостью) задавалась исходя из того, что условия проведения аэрофотосъемки городского озеленения должны обеспечивать безопасность полетов над застроенной террито-

рией, по аналогии, например, с кадастровой аэрофото-съемкой. Для этого высоту полета рекомендуется устанав-ливать с превышением не менее 50 м от максималь-ной высоты объектов (рельеф, элементы застройки и т. д.) в районе проведения съемок [16]. Этого же принципа, как правило, стоит придерживаться и при аэрофото-съемке лесных территорий, может быть за исключением проведения специальных обследований;

- тип объектива фотокамеры: нормально-уголь-ный [8] (во избежание «развала» деревьев на краях снимка, препятствующего стереоскопическому де-шифрированию [5]);

- фокусное расстояние объектива: принималось обеспечивающим угол зрения для нормальных объек-тивов: для полнокадровых камер (full frame) – 50 мм; для камер с кроп-фактором больше 1 (тип сенсора Sony APS-C) – 35 мм, что соответствует эквивалент-ному фокусному расстоянию для полного кадра – 53,7 мм; для среднеформатных – 70 мм;

- допустимый сдвиг изображения (продольный и поперечный): 0,3 пикс – принят в соответствии с дей-ствующей лесоустроительной инструкцией [11];

- выдержка (фактическая): 1/1250 (солнечная по-года, бесснежный период) – принята исходя из реко-мендаций по настройке аэрофотокамер, предлагаемых производителями БАС [3], а также с учетом имеюще-гося опыта применения БАС в других областях [16]. При расчетах использовалась эффективная выдержка – часть фактической выдержки, обеспечиваемая опти-ческим КПД затвора (принят для современных фото-камер – 95 % [8]);

- диафрагма (знаменатель относительного отвер-стия объектива), оценочно: 4,5 для полнокадровых ка-мер и камер с кроп-фактором больше 1 – принята ис-ходя из анализа метаданных изображений реальной VTOL-съемки (солнечная погода, бесснежный период), а также на основе рекомендаций по предполетной на-стройке фотокамер некоторых БАС [3]; 5,6 для сред-неформатных камер, как максимальный предел или единственный вариант для рассматриваемых моделей.

Разрешающая способность ЦАФС определялась графически, как абсцисса точки пересечения кривых контраста изображения – $K'(N)$ и порогового контра-ста объекта – $K_n(N)$ [9; 13; 14]. Уточнение получен-ных по графику значений осуществлялось посредст-вом программного пересчета значений K' и K_n в диа-пазоне пространственной частоты $N = 1 \text{ мм}^{-1}$ от гра-фического значения, принятого в качестве левой гра-ницы диапазона уточнения, с градацией $0,1 \text{ мм}^{-1}$ и последующим определением N , для которой расхож-дение между K' и K_n по модулю минимально.

Для расчета величины контраста объекта, в усло-виях одинакового освещения его деталей, использова-лись справочные значения коэффициентов спектраль-ной яркости для опорной длины волны $0,550 \text{ мкм}$ [7]: объект съемки – зеленая крона сосны ($r_{об} = 0,054$ – спелый древостой, полный лист); фон – кроны лист-венных древесных пород в осенний период ($r_{ф} = 0,168$ – для 4-го типа кривых отражательной способности лесных насаждений).

Для учета влияния атмосферной дымки на сниже-ние контраста изображения вместо определения функ-ции передачи модуляции (ФПМ) использовался коэф-фициент передачи модуляции, предполагая его незави-симость от пространственной частоты [1; 8; 13], опре-деляемый как отношение модуляции в изображении к модуляции в объекте с учетом коэффициента задым-ленности атмосферы для конечных высот [8].

При расчете ФПМ за турбулентность атмосферы оценка углового размера минимально разрешаемого объекта на местности принималась равной $2,5 \times 10^{-6}$ рад (для хороших условий наблюдения, вниз, через сво-бодную атмосферу, с высоты менее 1700 м) [17].

Поскольку считается, что ФПМ современных цифровых сенсоров не приводит к существенному снижению разрешающей способности съемочной сис-темы и данной составляющей ФПМ ЦАФС можно пренебречь без значимого ущерба для точности рас-четных оценок [6], расчет ФПМ сенсора не произво-дился.

Учитывая, что величина случайной составляющей линейного и углового сдвига изображения в реальных условиях подвержена постоянным колебаниям, то для целей сравнения вариантов ЦАФС было решено огра-ничиться расчетом только ФПМ регулярной состав-ляющей линейного сдвига, тем самым помещая срав-няемые варианты ЦАФС в одинаковые условия ки-нетического воздействия атмосферы. Впоследствии, на этапе анализа расчетного ЛРМ с эксперименталь-ными значениями, можно учитывать случайные со-ставляющие сдвига от движения самолета в комплек-се с другими неучтенными факторами (например, сдвиг изображения от вибрации силовой установки) посредством введения коэффициента запаса разре-шающей способности, по аналогии с подобной прак-тикой, существующей в инженерных (например, прочностных) расчетах.

Расчет размера пикселя на местности (GSD) про-изводился по известной формуле [18]. По этой же формуле рассчитывалась ширина полосы съемки на местности при замене размера пикселя на размер длинной стороны сенсора.

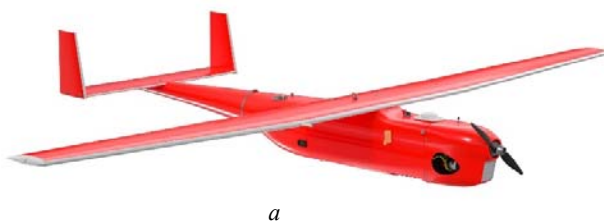


Рис. 1. Типы БАС, способные поддерживать аэрофото-съемку в самолетном режиме:
а – самолетный; б – гибридный (VTOL)

Таблица 1

Основные характеристики российских VTOL-платформ (макс. взлетная масса до 30 кг)

БАС	Аист	Supercam SX350	VolJet VT7	Ласточка / OG-25	Легионер E29	Рассвет-35Э	IRBIS 536E	ОМДЖЕТ 04	Аякс V300
Дальность полета (max), км	150	160	200	200	220	250	290	350	450
Крейсерская скорость, км/ч	100	80	80	100	87,5	101	115	72	≈ 70
Грузоподъемность, кг	5	2,5	9	10	3	5	7	3	6
Высота полета (max), км	3	5	1,5	5,5	3	2	5	1,8	4
Размах крыла, м	3,6	3,2	3,2	4,5	4	3,5	3,6	3,7	3
Тип маршевого двигателя	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД
Дальность линии связи, км	100	50	40	200	50	15	120	40	100
Срок гарантии, лёт.ч/лет	75/1	100/1	50/0,5	500/1	200/1	–/1	500/1	150/1	–/1
Цена, млн руб.	н/д	4,3	1,7	6,9	11,0	2,5	6,0	3,4	н/д

Продолжение табл. 1

БАС	InnoVtol-3s	Патруль-30	G25 12VVP	ARA-PRO-WM3-ICE	SIGMA-m3	Легионер G29s	Беркут-30	ДИАМ 20К	Рассвет-37Г
Дальность полета (max), км	300	300	350	400	500	550	650	800	900
Крейсерская скорость, км/ч	80	90	79	90	86,6	90	90	85	101
Грузоподъемность, кг	7	7	4,7	7	5	4	5	5	10
Высота полета (max), км	2,5	н/д	3	3	3	3,5	3	2	2
Размах крыла, м	3	3,9	2,6	3,7	4	4	3	3,9	3,7
Тип маршевого двигателя	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
Дальность линии связи, км	40	н/д	30	н/д	100	50	100	100	15
Срок гарантии, лёт.ч/лет	240/1	–/1	100/–	–/1	300/1	200/1	50/-	420/1	–/1
Цена, млн руб.	7,9	8,0	2,3	3,5	6,7	11,7	4,0	10,2	3,6

Примечание: ЭД – электродвигатель; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; н/д – нет данных.

Таблица 2

Основные технические характеристики некоторых фотокамер для БАС-съемки

Фотокамера	Sony ZV-E10	Sony A6000	Sony ILCE-7RM2	Sony ILCE-7RM3	Sony A7R IV	Sony ILX-LR1	Fujifilm GFX 100S II	Sony DSC-RX1RM2
Разрешение сенсора, Мпикс	24,0	24,0	42,2	42,2	60,2	60,2	101,8	42,2
Размер сенсора, мм	23,5×15,6	23,5×15,6	35,9×24,0	35,9×24,0	35,7×23,8	35,7×23,8	44,0×33,0	35,9×24,0
Размер изображения, пикс	6000×4000	6000×4000	7952×5304	7952×5304	9504×6336	9504×6336	11648×8736	7952×5304
Диапазон ISO (базовый)	100-32000	100-25600	100-25600	100-32000	100-32000	100-32000	80-12800	100-25600
Тип затвора	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ц
Минимальная выдержка, с	1/4000	1/4000	1/8000	1/8000	1/8000	1/8000	1/32000	1/4000
Скорость съемки, кадр/с	3-11	2,5-11	2,5-5	3-10	3-10	2,5-8	2-7	2,5
Масса (с объективом), кг	0,497	0,498	0,799	0,831	0,839	0,417	1,663	0,561
Фокусное расстояние, мм	35	35	50	50	50	50	55	50
Диафрагма	1,8-22	1,8-22	2,5-22	2,5-22	2,5-22	2,5-22	2,8-4	2,5-22

Продолжение табл. 2

Фотокамера	CHCNAV C5	RIEBO-R4P	RIEBO-R6P	CHCNAV C6	Phase One IXU-RS180	Phase One iXM-RS100F	RIEBO R10Pro	Phase One iXM-RS150F
Разрешение сенсора, Мпикс	44,7	44,7	60,8	61,0	80,2	101,1	101,8	151,3
Размер сенсора, мм	36,0×24,0	35,9×23,9	35,9×23,9	36,0×24,0	53,7×40,4	53,4×40	43,8×32,8	53,4×40
Размер изображения, пикс	8184×5460	8192×5456	9552×6368	9564×6376	10328×7760	11608×8708	11648×8736	14204×10652
Диапазон ISO (базовый)	100-3200	50-6400	50-6400	100-3200	35-800	50-6400	100-6400	50-6400
Тип затвора	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц
Минимальная выдержка, с	1/2000	1/2000	1/2000	1/2000	1/2500	1/2500	1/2000	1/2500
Скорость съемки, кадр/с	1	2	2	1	1,25	1,6	2	2
Масса (с объективом), кг	0,29	0,345	0,345	0,29	1,51	1,58	0,355	1,58
Фокусное расстояние, мм	35	40	40	35	70	70	50	70
Диафрагма	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6-22	5,6	5,6-22

Примечание: Ш – шторно-щелевой затвор, Ц – центральный затвор.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ российских VTOL-платформ (табл. 1) показывает, что в настоящее время на рынке представлен достаточно широкий их ассортимент, производство которого осуществляется различными по типу и величине предприятиями: от малых частных фирм до крупных компаний, входящих в состав государственных корпораций. Основные технические характеристики, имеющие значение для аэрофотосъемки, находятся в следующих диапазонах: грузоподъемность (максимальная масса полезной нагрузки): 2,5–10 кг; максимальная дальность полета (по типам маршевого двигателя): 150–450 км для ЭД, 300–900 км для ДВС; причем дальность изменяется в зависимости от массы полезной нагрузки, например (ориентировочно), для ДИАМ 20К: 765 км – 1,5 кг; 595 км – 3 кг; 425 км – 5 кг; для VolJet VT7: 200 км – 1 кг; 160 км – 5 кг; крейсерская скорость: 70–115 км/ч; максимальная высота полета: 1,5–5,5 км; дальность действия линии связи: 15–200 км.

Некоторые стоимостно-эксплуатационные характеристики:

- цены за платформу варьируют в широких пределах: от 1,7 до 11,7 млн руб., что ставит вопрос о качестве изготовления отдельных моделей, их надежности, возможном сроке эксплуатации, а также о наличии и эффективности сервисной службы; с другой стороны, опыт использования БАС в смежных областях показывает, что небольшие клиенто-ориентированные частные компании, реализующие продуктовый подход, вполне могут конкурировать с крупными предприятиями, работающими на госзаказ, как по качеству и функциональности продукции, так и по ее стоимости;

- гарантийный срок эксплуатации: от 50 до 500 летних часов; кроме того, отдельные производители указывают возможный срок службы изделия, например, для БАС Легионер (ООО «ГК Тихие крылья») – 2800 летних часов или 5 лет.

Большинство производителей предлагают возможность интеграции со своими платформами съемочной аппаратуры заказчика (в качестве специальной опции).

Анализ линейки фотокамер, имеющих применение в беспилотной аэрофотосъемке, показывает достаточно широкий их ассортимент. В основном это аппаратура иностранного производства, однако встречаются также отечественные сборки аэрофотокамер и сопутствующего оборудования на основе зарубежных комплектующих. Базовые технические характеристики, имеющие значение для аэрофотосъемки, следующие: формат сенсора: малый, средний; разрешение сенсора: 24–60 Мп (для малоформатных), 80–150 Мп (для среднеформатных); тип затвора: центральный, шторно-щелевой; минимальная выдержка: 1/2000–1/32000 с; скорость съемки: 1–11 кадр/с; масса (с объективом): 0,290–1,663 кг.

Для изучения влияния разрешения цифрового сенсора фотокамеры на ЛРМ выбрано шесть вариантов (прототипов) ЦАФС на основе аэрофотокамер с разрешением от 24 до 150 мегапикселей. Расчетные оценки ЛРМ, GSD, а также ширины полосы съемки на

местности для сравниваемых вариантов ЦАФС на различных высотах фотографирования при заданных параметрах аэрофотосъемки приведены в табл. 3. Поскольку изменение диафрагмы между 4,5 и 5,6 для рассматриваемых параметров аэрофотосъемки приводит лишь к незначительным изменениям ЛРМ (0,1–0,2 см), то совокупность можно считать однородной и пригодной для сравнительного анализа. Выбранные границы высот фотографирования составляют 100–700 м с градацией 100 м, что позволяет для принятых значений фокусного расстояния получать аэрофотоснимки в диапазоне масштабов от 1:2000 до 1:10000 [2; 12].

Анализ полученных данных показывает:

- 1) увеличение ЛРМ (уменьшение значений) с увеличением разрешения цифрового сенсора фотокамеры с 24 Мп до 150 Мп: при $H = 100$ м – с 2,4 см до 1,6 см; при $H = 400$ м – с 8,6 см до 4,6 см; при $H = 700$ м – с 15,3 см до 8,0 см;

- 2) уменьшение ЛРМ (увеличение значений) с увеличением высоты фотографирования со 100 м до 700 м: для 24 Мп – с 2,4 см до 15,3 см; для 60 Мп – с 1,9 см до 10,6 см; для 150 Мп – с 1,6 см до 8,0 см;

- 3) увеличение ширины полосы съемки на местности с увеличением высоты фотографирования со 100 м до 700 м, в среднем: с 73,2 м до 513 м.

Наиболее оптимальным прототипом ЦАФС по соотношению цена фотоаппаратуры/точность/производительность, на наш взгляд, является VTOL-платформа с разрешением сенсора фотокамеры 60 Мп (сегмент малоформатных полнокадровых камер): при $H = 100$ м ЛРМ снимков составит около 2 см; при достаточности ЛРМ снимков 10 см (например, как точность измерения крон деревьев) ЦАФС позволяет производить съемку шириной полосы порядка 470 м за один маршрут ($H = 700$ м). Для сравнения, ЦАФС с разрешением сенсора 150 Мп (среднеформатная камера) при стоимости порядка \$25000 (Phase One iXM-RS150F), дает прирост ЛРМ, с учетом увеличения фокусного расстояния до 70 мм: при $H = 100$ м только на 0,3 см (15,8 %), при $H = 700$ м на 2,5 см (25 %), что может быть достаточно просто компенсировано использованием фотокамеры меньшего разрешения за счет снижения высоты фотографирования и, соответственно, некоторого уменьшения ширины полосы съемки (производительности работ).

Оценки пространственного разрешения по GSD, как и предполагалось, получаются завышенными по сравнению с оценками по ЛРМ, примерно в два раза и более, что объяснялось ранее [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований для прототипов ЦАФС на основе VTOL-платформ российских производителей, оснащенных мало- и среднеформатными аэрофотокамерами с разрешением сенсора от 24–150 Мп, получены следующие результаты:

- апробирована математическая модель (расчетный алгоритм) для определения оценок ЛРМ (данные согласуются с теоретическими положениями);

- получены значения ЛРМ для диапазона высот фотографирования 100–700 м с градацией 100 м (при заданных параметрах аэрофотосъемки);

Таблица 3

Расчетные оценки параметров разрешения аэрофотоснимков для прототипов ЦАФС

Модель фотокамеры для прототипа ЦАФС	Sony ZV-E10	Sony DSC-RX1RM2	Sony ILX-LR1	Phase One IXU-RS180	Phase One iXM-RS100F	Phase One iXM-RS150F
Разрешение сенсора, Мп	24	42	60	80	101	150
Размер пикселя сенсора, мкм	3,9	4,5	3,8	5,2	4,6	3,8
Фокусное расстояние, мм / диафрагма	35/4,5	50/4,5	50/4,5	70/5,6	70/5,6	70/5,6
Высота фотографирования 100 м						
LPM / GSD, см	2,4 / 1,1	2,1 / 0,9	1,9 / 0,8	1,9 / 0,7	1,8 / 0,7	1,6 / 0,5
Ширина полосы съемки, м	67	72	71	77	76	76
Высота фотографирования 200 м						
LPM / GSD, см	4,4 / 2,2	3,6 / 1,8	3,2 / 1,5	3,1 / 1,5	2,8 / 1,3	2,5 / 1,1
Ширина полосы съемки, м	134	144	143	153	153	153
Высота фотографирования 300 м						
LPM / GSD, см	6,5 / 3,4	5,3 / 2,7	4,6 / 2,3	4,4 / 2,2	4,0 / 2,0	3,5 / 1,6
Ширина полосы съемки, м	201	215	214	230	229	229
Высота фотографирования 400 м						
LPM / GSD, см	8,6 / 4,5	7,0 / 3,6	6,0 / 3,0	5,8 / 3,0	5,3 / 2,6	4,6 / 2,1
Ширина полосы съемки, м	269	287	286	307	305	305
Высота фотографирования 500 м						
LPM / GSD, см	10,8 / 5,6	8,7 / 4,5	7,6 / 3,8	7,3 / 3,7	6,6 / 3,3	5,7 / 2,7
Ширина полосы съемки, м	336	359	357	384	381	381
Высота фотографирования 600 м						
LPM / GSD, см	13,0 / 6,7	10,5 / 5,4	9,1 / 4,5	8,7 / 4,5	8,0 / 3,9	6,8 / 3,2
Ширина полосы съемки, м	403	431	428	460	458	458
Высота фотографирования 700 м						
LPM / GSD, см	15,3 / 7,8	12,3 / 6,3	10,6 / 5,3	10,2 / 5,2	9,3 / 4,6	8,0 / 3,8
Ширина полосы съемки, м	470	503	500	537	534	534

– получены прогнозные данные о ширине полосы съемки на местности, позволяющие определять производительность аэрофотосъемочных работ для лесных и городских территорий;

– предложен оптимальный вариант ЦАФС по соотношению цена фотоаппаратуры/точность/производительность для беспилотной аэрофотосъемки лесных насаждений и городского озеленения.

Дальнейшее развитие исследований необходимо вести в направлении сравнения расчетных оценок с экспериментальными значениями ЛРМ в целях уточнения используемой модели для ЦАФС с различными техническими характеристиками платформы-носителя и аэрофотосъемочного оборудования при разных параметрах съемки. Осуществление тестовых аэрофотосъемок предполагается проводить в том числе с использованием радиальных мир сниженного контраста (приближенного к диапазону контрастов крон древесных насаждений) при сравнении полученных результатов с реальными значениями точности таксационных измерений крон деревьев на таксационно-дешифровочных участках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

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

2. Аэрофотосъемочные работы: справочник аэрофотосъемщика / А. А. Попов, Ю. И. Полетаев, Ю. В. Евдокимов и др. М. : Транспорт, 1984. 200 с.

3. Геоскан 701. Руководство по эксплуатации (версия от 19.12.2025 г.). URL: https://download.geoscan.ru/site-files/701/Geoscan_701_Manual.pdf (дата обращения: 09.01.2026).

4. ГОСТ Р 57258–2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. Введ. 01.06.2017. М. : Стандартинформ, 2016. 8 с.

5. Дмитриев И. Д., Мурахтанов Е. С., Сухих В. И. Лесная аэрофотосъемка и авиация. М. : Лесная промышленность, 1981. 344 с.

6. Жиганов И. Ю. Метрологические основы дистанционных телевизионных методов измерения геометрических параметров объектов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. № 3. С. 117–121.

7. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1947. 272 с.

8. Кучко А. С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования. М. : Недра, 1988. 236 с.

9. 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.

10. Налетай.рф : сайт. URL: https://налетай.рф/catalog/bespilotniki/samolet?takeoff_weight_type=light&launch_method=ac023d9c&sort=popular&page=1 (дата обращения: 09.01.2026).

11. Об утверждении Лесоустроительной инструкции [Электронный ресурс] : приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 5 августа 2022 г. № 510. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/32729?items=1&page=1> (дата обращения: 09.01.2026).

12. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребов, В. И. Сухих, А. З. Швиденко, Н. Н. Гусев, А. Г. Мошкалев. М. : Колос, 1992. 495 с.

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

14. 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.

15. Сомов Е. В., Шевелев С. Л. Расчетная оценка линейного разрешения на местности цифровой беспилотной аэрофотосъемочной системы для задач таксационного дешифрирования (состояние вопроса, проблематика, модели) // Хвойные бореальной зоны. 2025. № 2. С. 20–26.

16. СТО 11468812.011-2025. Выполнение аэрофотосъемки беспилотными авиационными системами в кадастровой деятельности. Методы и технологии определения местоположения объектов недвижимости с использованием беспилотных авиационных систем. Введ. 21.10.2025. М. : Национальная палата кадастровых инженеров, 2025. 103 с.

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

18. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House, 2001. URL: https://www.google.ru/books/edition/Surveillance_and_Reconnaissance_Imaging/f3zUKZZ_WjMC?hl=ru&gbpv=1&pg=PA31&printsec=frontcover (дата обращения: 09.01.2026).

REFERENCES

1. Almazov I. V., Ovechkin V. N., Stecenko A. F., Filippov V. I., Fimin R. I. Opredelenie predel'nykh usloviy aehrofotos'emki v celyah vyyavleniya na snimkakh ehlementov landshafa s izvestnymi razmerami i otrazhatel'nyimi svoystvami // Izv. vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka. 1990. № 3. S. 63–71.

2. Aehrofotos'emochnye raboty: spravochnik aehrofotos'emshchika / A. A. Popov, Yu. I. Poletaev, Yu. V. Evdokimov i dr. M. : Transport, 1984. 200 s.

3. Geoskan 701. Rukovodstvo po ehkspluatacii (versiya ot 19.12.2025 g.). URL: https://download.geoscan.ru/site-files/701/Geoscan_701_Manual.pdf (data obrashcheniya: 09.01.2026).

4. GOST R 57258–2016. Sistemy bespilotnye aviacionnye. Terminy i opredeleniya. Vved. 01.06.2017. M. : Standartinform, 2016. 8 s.

5. Dmitriev I. D., Murahtanov E. S., Suhih V. I. Lesnaya aehrofotos'emka i aviaciya. M. : Lesnaya promyshlennost', 1981. 344 s.

6. Zhiganov I. Yu. Metrologicheskie osnovy distanconnykh televizionnykh metodov izmereniya geometri-

cheskih parametrov ob'ektov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2009. № 3. S. 117–121.

7. Krinov E. L. Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnih obrazovanij. M. : Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1947. 272 s.

8. Kuchko A. S. Aehrofotografiya i special'nye fotograficheskie issledovaniya. M. : Nedra, 1988. 236 s.

9. Molchanov A. S. Metodika rascheta porogovoj modulyacionnoj harakteristiki cifrovih optiko-ehlektronnyh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Izv. TulGU. Tehnicheskie nauki. 2020. Vyp. 9. S. 328–336.

10. Naletaj.rf. URL: https://naletaj.rf/catalog/bespilotniki/samolet?takeoff_weight_type=light&launch_method=ac023d9c&sort=popular&page=1 (data obrashcheniya: 09.01.2026).

11. Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noj instrukcii : prikaz Ministerstva prirodnih resursov i ehkologii RF ot 5 avgusta 2022 goda № 510. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/32729?items=1&page=1> (data obrashcheniya: 09.01.2026).

12. Obshchesoyuznye normativy dlya taksacii lesov / V. V. Zagreev, V. I. Suhiih, A. Z. Shvidenko, N. N. Gusev, A. G. Moshkalev. M. : Kolos, 1992. 495 s.

13. Savinyh V. P., Kuchko A. S., Stecenko A. F. Aehrokosmicheskaya fotosemka. M. : Kartgeocentr – Geodezizdat, 1997. 378 s.

14. Sviridov K. H., Tyulin A. E. Razreshayushchaya sposobnost' i linejnoe razreshenie dlya ocenki kachestva i proektirovaniya aehrokosmicheskikh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy. 2022. № 1. S. 9–29.

15. Somov E. V., Shevelev S. L. Raschetnaya ocenka linejnogo razresheniya na mestnosti cifrovoj bespilotnoj aehrofotos'emochnoj sistemy dlya zadach taksacionnogo deshifirovaniya (sostoyanie voprosa, problematika, modeli) // Hvojnye boreal'noj zony. 2025. № 2. S. 20–26.

16. STO 11468812.011-2025. Vypolnenie aehrofotos'emki bespilotnymi aviacionnymi sistemami v kadaastrovoj deyatel'nosti. Metody i tehnologii opredeleniya mestopolozheniya ob'ektov nedvizhimosti s ispol'zovaniem bespilotnyh aviacionnyh sistem. Vved. 21.10.2025. M. : Nacional'naya palata kadaastrovyh inzhenerov, 2025. 103 s.

17. Frizer H. Fotograficheskaya registraciya informacii. M. : Mir, 1978. 670 s.

18. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House, 2001. URL: https://www.google.ru/books/edition/Surveillance_and_Reconnaissance_Imaging/f3zUKZZ_WjMC?hl=ru&gbpv=1&pg=PA31&printsec=frontcover (data obrashcheniya: 09.01.2026).

© Сомов Е. В., Шевелев С. Л., 2026

Поступила в редакцию 10.01.2026

Принята к печати 27.04.2026

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

В. А. Усольцев¹, В. П. Часовских²

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

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

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

²u2007u@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9454-9824>

Аннотация. По мере увеличения объема новых научных данных, новых идей и практических разработок возрастает риск отставания исследователей от текущего состояния науки и ее практических реализаций. Синтез информации в форме систематических обзоров направлен на решение этой проблемы и может значительно облегчить исследователям ориентацию в современном состоянии научной сферы. Стремительный прогресс в области получения научных данных привел к появлению огромного и постоянно растущего объема информации, что исключает возможность какой-либо «ручной» ее интерпретации. Извлекать ценные и представляющие интерес модели из пространственных баз данных сравнительно сложно из-за множества их типов, пространственных связей и автокорреляций по сравнению с обычными числовыми и категориальными данными. В связи с изменением климата по всему миру учащаются лесные пожары, обнаружение которых на ранних стадиях является эффективным способом минимизировать причиняемый ими ущерб. Современные технологии глубокого машинного обучения открывают новые возможности для раннего обнаружения лесных пожаров. Авторы подчеркивают сложность обработки пространственных данных традиционными методами из-за их многообразия и взаимосвязей, и показывают, что алгоритмы глубокого обучения могут эффективно решать эту задачу, помогая минимизировать экономический и экологический ущерб и угрозу человеческим жизням.

Ключевые слова: лесные пожары, раннее обнаружение, методы, алгоритмы и модели, глубокое машинное обучение.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 22–51

FOREST FIRE DETECTION USING DEEP LEARNING TECHNOLOGIES (REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)

V. A. Usoltsev¹, V. P. Chasovskikh²

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

³Ural State University of Economics
62/45, 8 Marta str./ Narodnaya Volya, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

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

²u2007u@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9454-9824>

Abstract. As the volume of new scientific data, new ideas and practical developments increases, the risk of researchers lagging behind the current state of science and its practical implementations increases. The synthesis of information in the form of systematic reviews is aimed at solving this problem and can significantly facilitate researchers' orientation in the current state of the scientific field. Rapid progress in the field of obtaining scientific data has led to the emergence of a huge and ever-growing amount of information, which excludes the possibility of any “manual” interpretation. It is relatively difficult to extract valuable and interesting models from spatial databases due to their many types, spatial relationships, and autocorrelations compared to conventional numerical and categorical data. Due to climate change, wildfires are increasing in frequency around the world, and detecting them at an early stage is an effective way to minimize the damage they cause. Modern deep machine learning technologies open up new opportunities for early detection of forest fires. The authors emphasize the complexity of processing spatial data using traditional methods due to their diversity and interrelationships, and show that deep learning algorithms can effectively solve this problem, helping to minimize economic and environmental damage and threat to human lives.

Keywords: forest fires, early detection, methods, algorithms and models, deep machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

По мере увеличения объема новых научных данных, новых идей и практических разработок возрастает риск отставания исследователей от текущего состояния науки и ее практических реализаций. Синтез информации в форме систематических обзоров направлен на решение этой проблемы и может значительно облегчить исследователям ориентацию в современном состоянии научной сферы [45]. Стремительный прогресс в области получения научных данных привел к появлению огромного и постоянно растущего объема информации, что исключает возможность какой-либо «ручной» ее интерпретации. В контексте современного научного ландшафта парадигма извлечения знаний претерпела существенную трансформацию с момента концептуализации «Обнаружения знаний в базах данных» (Knowledge Discovery in Databases, KDD) в середине 1990-х годов [31; 100]. Интеграция передовых вычислительных подходов для превращения сырых данных в действенные инсайты сформировала фундамент мультидисциплинарной экосистемы исследований, эволюционировавшей в современную науку о данных (Data Science), охватывающую не только извлечение закономерностей, но и полный жизненный цикл работы с данными – от инженерии данных до интерпретируемого искусственного интеллекта. Таким образом, хотя фундаментальные принципы KDD сохраняют концептуальную значимость, эволюция вычислительных возможностей, источников данных и методологических подходов привела к формированию более комплексной и интегрированной дисциплины, адаптированной к экспоненциальному росту данных и вычислительным возможностям современной эпохи [17; 107].

Возникает необходимость в автоматизированном поиске пространственных знаний (spatial data) из огромного их количества, что сравнительно сложно из-за множества их типов, пространственных связей и автокорреляций по сравнению с обычными числовыми и категориальными данными [101]. Технологии интеллектуального анализа пространственных данных способствуют их пониманию, выявлению взаимосвязей между пространственными и непространственными переменными, определению закономерностей пространственного распределения конкретного явления, что помогает предвидеть тенденции изменения той или иной их структуры. Методы интеллектуального анализа пространственных данных включают визуальную интерпретацию и анализ, пространственный и атрибутивный запрос и отбор, характеристику, обобщение и классификацию, определение правил пространственных и непространственных ассоциаций, кластерный анализ и пространственную регрессию в дополнение к широкому спектру других областей [3].

В связи с изменением климата по всему миру учащаются лесные пожары, которые не только наносят серьезный экономический ущерб и разрушают экологическую среду, но и представляют большую угрозу жизни людей. Лесные пожары, ежегодно уничтожая сотни миллионов гектаров леса и другой растительности, рассматриваются как серьезная экологическая проблема [37; 88]. Лесные пожары обычно распро-

страняются быстро, и их оперативно контролировать довольно трудно. Время реагирования аварийно-спасательных служб существенно влияет на вызванные пожарами потери и последствия [9]. Поэтому практичным и эффективным способом минимизировать ущерб, причиняемый лесными пожарами, является обнаружение пожаров на их ранних стадиях с последующим быстрым реагированием для предотвращения распространения огня [3].

Современные разработки в области дистанционного зондирования, компьютерного зрения, машинного обучения и развитие микроэлектроники предоставляют новые методологии обнаружения лесных пожаров [113]. Наряду с методами видеосъемки дыма и пламени в инфракрасном и видимом диапазонах, проводятся обширные исследования наиболее репрезентативных систем обнаружения лесных пожаров, использующих цифровую обработку изображений [118]. В зависимости от способа сбора данных признаны три основных класса используемых методов, которые могут обнаруживать активные случаи задымления и пожара в режиме реального времени, а именно, наземные, бортовые и спутниковые. Такие методы, как правило, оснащены мультиспектральными, видимыми или сенсорными узлами в инфракрасном диапазоне, информация о которых обрабатывается с использованием методик глубокого машинного обучения [96].

Системы обнаружения на основе стационарных датчиков хорошо работают в закрытых помещениях, но их сложно использовать на открытой местности, учитывая высокую стоимость такой системы [130]. Кроме того, они не могут предоставлять важную визуальную информацию, которая могла бы помочь пожарным быстро оценить ситуацию на месте пожара. Инфракрасные или ультрафиолетовые детекторы легко поддаются воздействию окружающей среды [50], и, учитывая малую дальность обнаружения, они не подходят для работы на больших лесных пространствах. Спутниковое дистанционное зондирование [32] хорошо подходит для обнаружения крупномасштабных лесных пожаров, но не всегда может обнаружить небольшое локальное возгорание на ранней стадии.

Впечатленные развитием технологий компьютерного зрения, исследователи начали искать эффективную модель обнаружения пожара, основанную на обработке изображений. Была предложена модель RGB (Red, Green, Blue – красный, зеленый, голубой), основанная на измерении цветов для выделения пикселей пожара в видео-формате. Информация о цвете отвечала за выделение пикселей пожара, а динамическая информация использовалась для проверки того, является ли это реальным пожаром [18]. Для обнаружения мерцания пламени и идентификации его движущихся областей было применено двумерное пространственное вейвлет-преобразование. Этот метод, объединивший информацию о цвете и изменениях во времени, снизил количество ложных оповещений в реальных сценариях [114]. Была разработана система автоматического распознавания дыма в лидарных сигналах, полученных при небольших экспериментальных лесных пожарах с использованием нейросетевых алгоритмов [32]. На основе изображений в инфракрасном

диапазоне, визуальных образов и данных с датчиков, карт и моделей, объединенных для надежности процесса обнаружения, была разработана схема мультисенсорных систем раннего обнаружения лесных пожаров [77]. Был представлен усовершенствованный алгоритм обнаружения пожара, обеспечивающий повышенную чувствительность к мелким очагам возгораний, а также значительно снижающий частоту ложных оповещений. Для определения эффективности алгоритма применено теоретическое моделирование и регистрация с помощью усовершенствованного космического радиометра теплового излучения и отражения (ASTER) с высоким разрешением [35]. Представлен подход к снижению ложных оповещений в горячих точках лесных пожаров с использованием их географических координат. Чтобы выявить закономерности в динамике горячих точек и вычленивать ложные регистрации, исходя из предположения, что пожары обычно не распространяются по регулярной (прямолинейной) схеме, использованы кластеризация и преобразование Хафа. Для уменьшения ложных регистраций вследствие множества горячих точек, полученных на основе изображений NOAA, применен интеллектуальный анализ пространственных данных [110].

С использованием пространственной статистики была достигнута пространственная вариативность алгоритма обнаружения лесных пожаров на основе графов и методов обнаружения пространственных аномалий. Алгоритм показал более высокую точность по сравнению с продуктом MODISFire, предоставленным командой NASA MODIS. Было также показано, что обычный алгоритм построения точечной диаграммы неэффективен, поскольку он нечувствителен к небольшим пожарам, но и алгоритм построения точечной диаграммы Морана также был слабым из-за отсутствия численного критерия для оценки пространственных изменений [13].

Путем изучения различных видеорядов и изображений была предложена нечеткая цветовая модель с использованием статистического анализа. В сочетании с динамическим анализом модель позволяла хорошо различать пламя и пламя-подобные объекты [15]. Затем были проанализированы характеристики пожара, и предложен метод его обнаружения в режиме реального времени, основанный на скрытых марковских моделях, с помощью которого потенциальные пиксели пожара извлекались посредством обнаружения движущихся пикселей, проверки цвета пожара и кластеризации пикселей [111].

Был представлен алгоритм, основанный на автоматизированном развертывании сенсорной сети, что позволяло снизить потребление энергии сенсорными узлами и увеличить срок службы их сети [82]. Показана гибридная кластеризация с использованием k -средств на основе трех классификационных подходов, таких как нейронная сеть, Байесовский подход и дерево принятия решений, что обеспечивало обнаружение пожара с высокой точностью [76]. Предоставлена платформа, которая централизовала использование мобильных агентов в беспроводной сенсорной сети, что способствовало быстрому обнаружению лесных пожаров и их мониторингу с меньшим по-

треблением энергии [116]. Для обнаружения лесных пожаров была использована также система нечеткой логики в беспроводных сенсорных сетях. Алгоритм нечеткой логики был разработан с использованием пяти функций, таких, как температура, дым, освещенность, влажность среды и расстояние до объекта [10].

Представлена также апробированная система обнаружения пожара, основанная на оценке температуры зондируемой площади пожара. Для определения местоположения и включения сигнализации в случае пожара применен акустический дальномер [80]. Этими же авторами предложена новая система обнаружения пожара с использованием мультимедийной панели, которая позволяла выявлять и подтверждать факт пожара за меньшее время. Для обнаружения пожара использована мультимедийная платформа IMB 400 с получением изображения и запуском алгоритма фильтрации по изображению [81]. Предложен алгоритм обнаружения лесных пожаров в режиме реального времени, основанный на обработке изображений с применением двух методов сегментации пламени – по идентификации пикселей пламени и кластеризации по k -среднему значению [19]. С целью повышения эффективности процесса раннего обнаружения пожара предложен механизм, основанный на многоуровневом объединении данных [98].

Был представлен подход к обнаружению лесных пожаров с использованием различных методов интеллектуального анализа данных. В частности, применены прогнозные модели, основанные на данных ГИС и модели прогнозирования погоды по спутниковым данным Aladin и MODIS [106]. В работе были рассмотрены три различных набора данных, и для всех наборов показано, что создание пакетов и повышение эффективности деревьев решений дают наилучшие результаты с точки зрения точности [106]. Предложена также мобильная биологическая сенсорная система обнаружения лесных пожаров на ранней стадии, в которой животные используются в качестве мобильных биологических сенсоров. Алгоритм основан на существующих системах отслеживания животных, используемых в зоологических исследованиях [93].

Поскольку большинство алгоритмов были разработаны в видео-формате, что имело очевидные ограничения, был предложен новый метод обнаружения пожара «BowFire», который на неподвижных изображениях сочетал цветовые характеристики с распознаванием суперпиксельной текстуры [24]. В целом, большинство традиционных методов обнаружения возгораний, основанных на обработке изображений, были направлены на создание искусственных характеристик, таких как цвет, движение и текстура [128].

Был представлен полностью автоматизированный метод обнаружения лесных пожаров по спутниковым снимкам TIR на основе теории случайных полей (Random Field Theory — *математическая концепция, которая позволяет моделировать неопределенности физических свойств в непрерывных средах с учетом случайности и пространственной вариативности*). Результаты работы системы оценивались по показателям уровня значимости. Получены убедительные значения как частоты обнаружения, так и частоты

ложных регистраций, и предложена оценка направления распространения пожара [59].

Однако со временем человеческий интеллект стали заменять эффективные технологии глубокого обучения. Они лучше усваивали функции, чем люди, и извлекаемые ими функции содержали гораздо более глубокую семантическую информацию, чем созданные человеком. В последнее время машинное обучение превзошло традиционные возможности человека во многих областях и широко используется при обнаружении лесных пожаров. При этом применяется несколько методов: искусственная нейронная сеть, нейронная сеть с прямой связью, метод опорных векторов и дерево решений [71].

Искусственная нейронная сеть – это нелинейная динамическая система и схема работы человеческого мозга. Искусственные нейронные сети – это алгоритмы, основанные на обучении. Модели искусственной нейронной сети состоят из множества нейронов, сходных по функциям и структуре. Эти нейроны соединяются, образуя сеть, и используют алгоритм параллельной обработки. Искусственная нейронная сеть – это система, которая способна обучаться самостоятельно, а обучение представляет адаптивный процесс. Схема работает по принципу нейрона. Первая нейронная модель содержала два входа и один выход. Оба входа должны быть активны для корректного выхода. Значения весов для обоих входных данных были одинаковыми, а выходные данные – двоичными. На рис. 1 показана модель искусственной нейронной сети. Набор синапсов или соединительных звеньев характеризуется собственным весом. Сигнал x_p на входе синапса p , подключенного к нейрону k , умножается на синаптический вес w_{kp} . Сумматор используется для суммирования входных сигналов и функции активации для ограничения амплитуды выходного сигнала нейрона [71; 72].

Нейронные сети прямой связи рассматриваются как каскадные сжатые линейные функции. Входные данные поступают в слой скрытых модулей, которые могут передаваться в слои более скрытых модулей,

которые в конечном итоге передаются на выходной уровень (рис. 2). Каждый из скрытых модулей является сжатой линейной функцией своих входных данных. Нейронные сети этого типа могут иметь на входе любые действительные числа, а на выходе они получают одно действительное число. Для регрессии характерно, что выходные модули являются линейной функцией их входных данных. Для классификации нужно, чтобы выходные данные были сигмоидной функцией от входных данных. Для скрытых слоев не обязательно, чтобы их выходные данные были линейной функцией их входных данных; добавление дополнительных слоев не дает дополнительной функциональности. Таким образом, выходные данные каждого скрытого модуля являются сжатой линейной функцией его входных данных [7]. С сетью связаны параметры всех линейных функций. Эти параметры настраиваются одновременно, чтобы минимизировать ошибку прогнозирования в обучающих примерах [7; 71].

Метод опорных векторов – это управляемая обучающая модель с соответствующими алгоритмами обучения, которые анализируют данные и сопоставляют их с образцом [95]. Модели с использованием метода опорных векторов являются близкими “родственниками” классических многослойных нейронных сетей восприятия (perception neural networks). Используя функцию ядра (kernel function), метод опорных векторов представляет собой альтернативный метод обучения для полиномиальных связей, радиальной базисной функции и многоуровневых классификаторов восприятия, в которых веса сети определяются путем решения задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями, а не путем решения невыпуклой задачи неограниченной минимизации, как в стандартной обучающей нейронной сети. Алгоритм метода опорных векторов представлен на рис. 3. Однако в некоторых случаях объяснительная способность модели, построенной по методу опорных векторов, может быть довольно низкой [52].

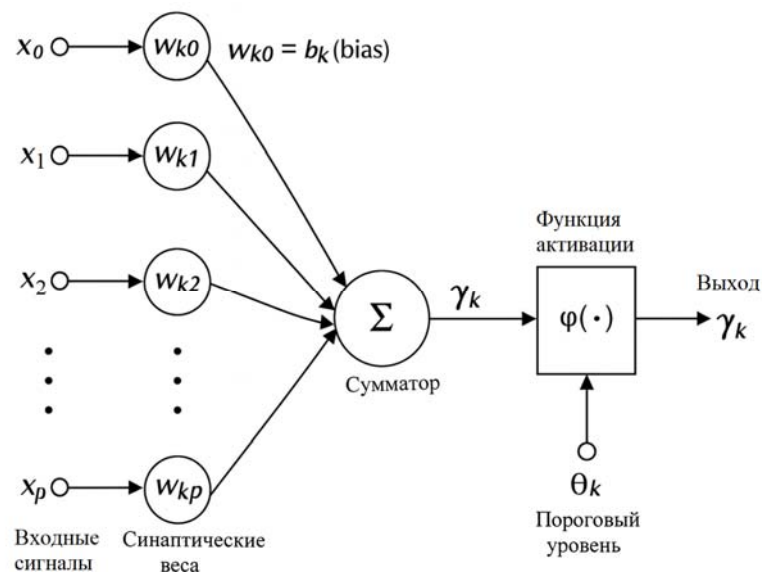


Рис. 1. Модель искусственной нейронной сети [71]
Обозначения в тексте

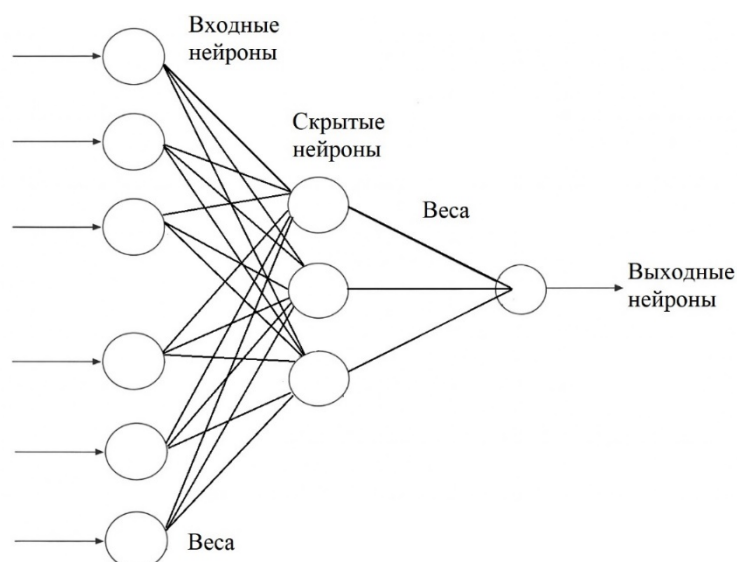


Рис. 2. Архитектура нейронной сети прямой связи [7; 71]

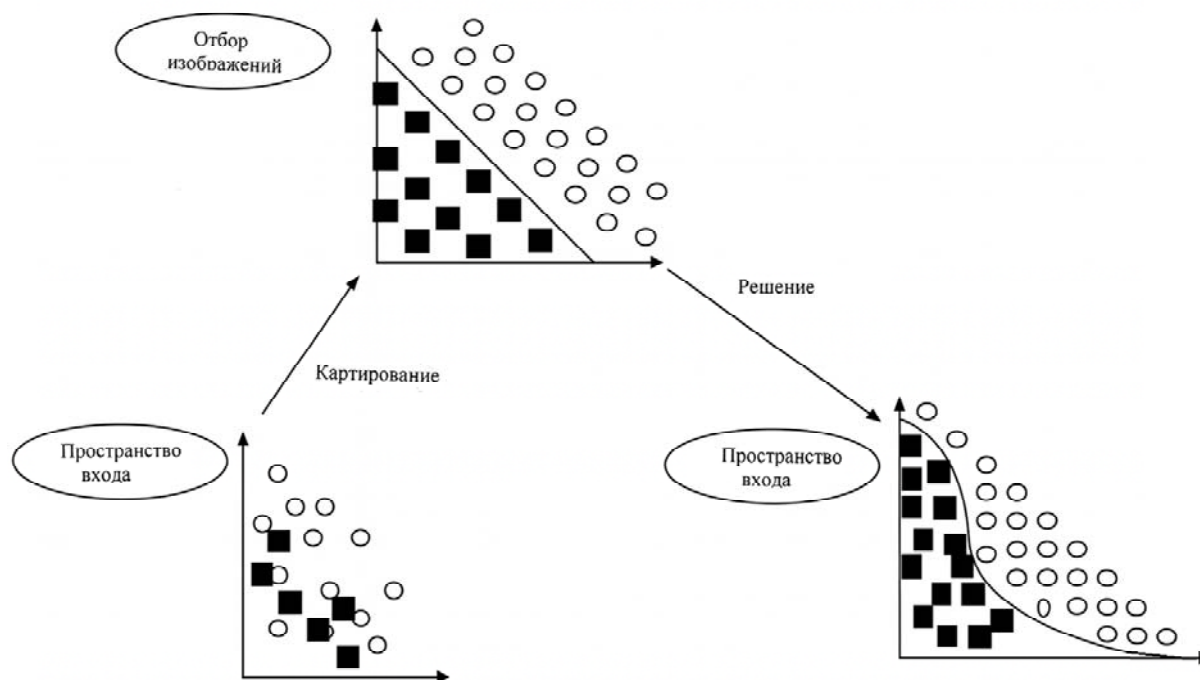


Рис. 3. Алгоритм метода опорных векторов [71]

Дерево решений представляет машинное обучение в форме анализа множества переменных. Они позволяют прогнозировать, объяснять и классифицировать результат обнаружения лесных пожаров. Дерево решений классифицирует объекты, сортируя их вниз по дереву решений, от корня до некоторого конечного узла [8]. Конечным результатом является дерево решений, в котором каждая ветвь представляет возможный сценарий принятия решения и его выход (рис. 4). Однако в некоторых случаях объяснительная способность модели, построенной по методу дерева решений, может быть довольно низкой, до 16 % [52]. Анализ обнаружения пожара по ретроспективным метеословиям также показывает низкую объяснительную способность – около 2 % [52].

В отличие от нейронной сети прямой связи, для обработки изображений широко используются различные алгоритмы сверточной нейронной сети – модифицированного многослойного персептрона (линейного двоичного классификатора). Скрытые слои такой нейросети включают слои свертки (отсюда и название), объединяющие слои и полностью связанные слои, предназначенные для различных компонентов распознавания изображений. Здесь разные слои могут применять ядра свертки для извлечения из изображения ключевых объектов и объединения слоев в пул для обобщения (уменьшения выборки) этих объектов [11; 89]. Сверточные слои используют несколько математических моделей для критической оценки и анализа данных. Изображение, представлен-

ное в абстрактной форме, слои преобразуют в карту объектов. Это повторяется слой за слоем, имитируя работу нейронов головного мозга. Поскольку это полностью подключенная сеть, все выходные данные фильтруются и объединяются в единый вывод в выходном слое [74].

Способность сверточных нейронных сетей автоматически изучать и извлекать признаки из базовых графических данных делает их особенно подходящими для обнаружения лесных пожаров [85]. Благодаря практической работе сверточных нейронных сетей с большими массивами данных разрабатываются модели, способные точно идентифицировать возгорания и отличать их от других явлений, таких, как облака, дым и солнечные блики. Основным преимуществом использования этой системы является высокое временное и пространственное разрешение [102]. Разработка эффективной модели обнаружения лесных пожаров с использованием сверточной нейронной сети направлена на удовлетворение потребности в масштабируемых решениях, способных работать в режиме реального времени и в условиях ограниченных ресурсов. Такая модель может быть развернута на различных платформах, включая видеокамеры, БПЛА и спутниковые системы, обеспечивающие непрерывное наблюдение за лесными массивами [16]. Одной из основных задач при обнаружении лесных пожаров с использованием сверточной нейросети является оптимизация производительности модели и эффективности вычислений, особенно для развертывания на периферийных устройствах с ограниченной вычислительной мощностью, а также с ограниченной полосой пропускания.

Для обработки и анализа изображений лесных пожаров на основе глубоких сверточных нейросетей использовались методы трансферного обучения. Это определяет эффективное обучение и надежность, а увеличение объема данных способствует повышению надежности модели. При этом сверточные нейросети требуют значительных вычислительных мощностей и объема памяти, что может быть проблемой при развертывании в средах с ограниченными ресурсами [58]. Была также разработана технология трансферного обучения, основанная на сверточной нейросети на базе архитектуры Inception-v3. Этот метод включал в себя подготовку спутниковых снимков,

разделение наборов фотоданных, связанных с пожаром и без него, генерирование матрицы беспорядка (confusion matrix) для определения эффективности структуры и, наконец, выделение на спутниковых снимках областей, где произошел пожар, с использованием локальной бинарной схемы для снижения частоты ложных обнаружений [87].

Был представлен метод обнаружения лесных пожаров на основе алгоритма YOLOv3 для обработки изображений, полученных с БПЛА, позволяющих идентифицировать небольшие площади пожаров, которые бывает трудно идентифицировать с помощью других методов. Для подтверждения того, что предлагаемая система может повысить эффективность и точность выявления ранних лесных пожаров, было проведено множество тестирований с использованием самостоятельно сгенерированного набора данных о лесных пожарах и двух оригинальных видеозаписей для их мониторинга. Результаты экспериментов показали, что система может эффективно выявлять ранние очаги возгорания и функционировать в широком диапазоне пожарных ситуаций [46]. Для обнаружения лесных пожаров были объединены снимки с БПЛА и искусственные нейронные сети [20; 46]. Выполнен анализ пяти сверточных нейросетей на предмет обнаружения лесных пожаров с использованием фотоизображений, полученных с БПЛА, при высоком уровне точности [60]. На основе использования БПЛА и глубокого обучения был предложен метод обнаружения пожара в ориентации на повышение эффективности и точности поиска. Для гарантированной эффективности распознавания была использована крупномасштабная сеть YOLOv3. Изображения пожара, полученные с помощью беспилотника, передавались в режиме реального времени на наземную станцию для последующей обработки [47]. Разработан также метод обнаружения пожаров на основе новой архитектуры, использующей БПЛА, непрерывно патрулирующего возможные районы возгорания. Кроме того, на беспилотнике был применен метод искусственного интеллекта с возможностями бортовой обработки. Это позволило применить методологию компьютерного зрения для обнаружения и распознавания огня или дыма в соответствии с видеосигналом и/или изображением с камер беспилотника [57; 129].

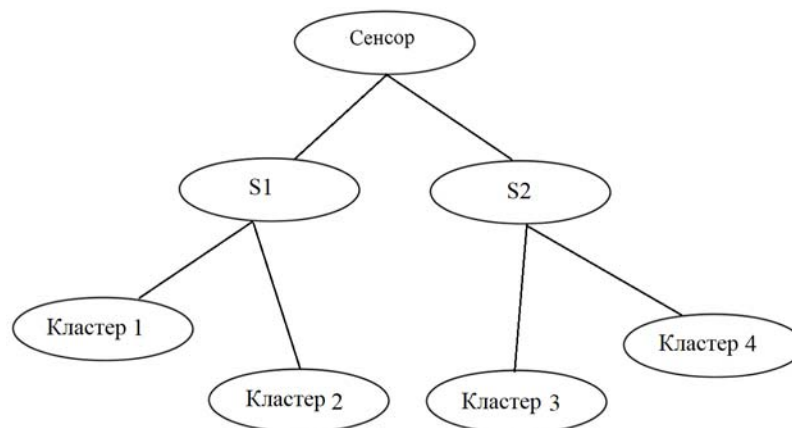


Рис. 4. Схема метода дерева решений [71]

В работе [48] был предложен метод обнаружения лесных пожаров с использованием алгоритма YOLOv3, примененный к аэрофотоснимкам, полученным с БПЛА. Используя вычислительную мощность встроенного оборудования, алгоритм YOLOv3 применен для создания компактной сверточной нейронной сети. С помощью этого метода идентифицировано около 83 % объектов, и, как показали тесты, обнаружение происходило со скоростью более 3,2 кадров в секунду. Этот подход имел ряд преимуществ при использовании БПЛА для обнаружения лесных пожаров в режиме реального времени [48].

В обнаружении лесных пожаров помогают беспроводные сенсорные сети, отслеживающие внезапно меняющиеся динамические среды (например, возгорания леса) и выдающие соответствующие предупреждения [54; 71]. Иногда эти сети могут выдавать ложные оповещения. Пожар можно обнаружить по количеству дыма с помощью датчиков. Количество дыма от пожара сравнивается с пороговым значением, и если оно превышает это значение, то эпизод рассматривается как сценарий пожара. Изображения с повсеместно установленных камер видеонаблюдения поступают на обработку, что позволяет обнаружить пожар предельно оперативно и быстро его потушить [69]. Камера видеонаблюдения используется для записи видео с определенного места и подключена к мини-компьютеру, чтобы можно было вести постоянную видеозапись определенного участка. Видеоснимки обрабатываются кадр за кадром, и как только обнаруживается пожар, включается сигнализация [74]. В частности, был разработан тест на лесные пожары, и для обнаружения пожара применена быстрая локальная сверточная нейросеть (R-CNN) [92], алгоритм Yolo и детектор SSD (мультиблоковый детектор с одним каналом) [66]. Было установлено, что детектор SSD является лучшим с точки зрения эффективности, точности обнаружения и возможности раннего обнаружения пожара. Был также предложен улучшенный алгоритм «tiny-Yolo» с измененной архитектурой сети [125].

Быстрая сверточная нейросеть R-CNN была также применена для выявления пожаро-опасных и пожаро-неопасных областей на основе их пространственных характеристик, а для проверки надежности пожарной сигнализации использована долго- и кратковременная память [55]. Предложена модель обнаружения пожара на основе видео с применением быстрой нейросети R-CNN для генерации области-кандидата на возгорание для каждого кадра. Затем были рассчитаны структурное сходство и среднеквадратичная ошибка для определения сходства между соседними кадрами, а конечные области возгорания определены на основе пространственных и временных характеристик [61]. Была также предложена система обнаружения лесных пожаров на основе камер с помощью обучения передаче данных, в которой для повышения точности обнаружения пожара использовалась стратегия анализа на основе блоков. Чтобы обеспечить эффективность модели на периферийных устройствах, удалялись избыточные фильтры, которые имели низкую энергетическую импульсную характеристику [78]. Наконец,

для обработки изображений лесных пожаров был применен метод главных компонент с последующей передачей их в обучающую сеть [126].

Для обнаружения задымления в естественных растительных сообществах была использована быстрая сверточная нейросеть с учетом регионов (RCNN) с целью предотвратить автоматическое извлечение признаков при обнаружении задымления в видеоформате. Чтобы компенсировать отсутствие проверочной информации, создавалось изображение искусственного дыма путем введения имитационного или реального дыма на фоне лесного полога [131]. Были также представлены инновационные методы пространственной и временной сегментации видеообъектов и плотного оптического потока в рамках глубокого обучения, включающие пространственно-временные изображения дыма от пожаров [40]. Чтобы уменьшить количество атмосферных загрязнений, присутствующих на видеокдрах, и тем самым повысить точность результатов обнаружения, применена предварительная обработка темного канала. Просмотр видеозаписей перед проведением оценки сокращает время, затрачиваемое на сбор достоверных данных на местах. Тесты с использованием общедоступных наборов видеоданных показали, что предлагаемые подходы превосходят результаты предыдущих работ и являются устойчивыми в широком диапазоне площадей, подверженных лесным пожарам [40]. В работе [121], направленной на решение той же проблемы, предлагается инновационный метод, основанный на глубоком обучении и динамическом фоновом моделировании, позволяющий уменьшить количество ложных оповещений и обеспечить обнаружение лесного пожара в режиме реального времени. Для начальной фазы обнаружения дыма был выбран сетевой трафик SSD (Single Shot MultiBox Detector). Затем динамическая область видео была получена с помощью технологии динамического моделирования фона ViBe, которая учитывала кинетические свойства дыма. Наконец, ранние результаты обнаружения дыма были улучшены за счет использования динамической области для уменьшения количества ложных срабатываний. Обширное тестирование в различных реальных сценариях показало повышение точности обнаружения пожара на 30 % по сравнению с использованием твердотельного накопителя [121]. В работе [4] использовался детектор дыма на базе «сети глубоких предположений» (Deep Belief Network – DBN). С помощью этого метода одновременно выделялись и классифицировались зоны, свободные от дыма, и зоны, подверженные задымлению. После измерения скорости обнаруженного дыма, времени предварительной подготовки и точной настройки оценивалась эффективность предложенной развернутой системы его обнаружения. Лучшая система обнаружения дыма имела самую высокую скорость обнаружения и самое быстрое время предварительной подготовки и настройки [4].

С применением видео-формата была разработана система обнаружения лесных пожаров, основанная на вычислительной эффективной аддитивной глубокой нейросети AddNet. Эта сеть включала векторный

оператор без умножения, который выполнял только манипуляции со знаками и операции по произведению из mf-операторов, которые использовались для определения свертки и плотных переходов с обратной связью в сети AddNet [79].

Для выявления признаков, связанных с пожаром, была представлена усовершенствованная модель компьютерного зрения, которая сегментировала изображение на области и классифицировала каждую область для обнаружения объектов. Это обеспечивало высокую точность и раннее обнаружение, а также масштабируемость, применяемую к различным типам сверточных нейросетей. Ограничения заключались в том, что это требовало значительных вычислительных ресурсов, зависело от количества и качества исходных данных [25].

Для повышения производительности в задачах обнаружения лесных пожаров с использованием набора фактических данных была применена адаптированная и точно настроенная архитектура ResNet-50, известная своими глубокими слоями, которая применялась для предотвращения исчезающих градиентов и повышения эффективности обучения. Глубокие слои и переходные соединения ResNet-50 обеспечивали эффективное извлечение признаков, что имело решающее значение для точного обнаружения пожара в различных условиях. Архитектура ResNet-50 может быть сложной для реализации и тонкой настройки, что требует специальных знаний в области методов глубокого обучения [90].

За последние годы было разработано несколько перспективных спутниковых систем обнаружения лесных пожаров, характеризующихся надежностью, их высокой доступностью, быстрым исполнением и способностью контролировать очень большие площади [36]. Спутники собирают данные о лесных пожарах, используя многочисленные тепловые и оптические датчики для определения таких физических характеристик, как длина волны, интенсивность света или поляризация, для сбора визуальных данных об окружающей среде, а также радарные датчики [34]. В частности, была предложена система на основе сверточных нейросетей для классификации спутниковых снимков от NASA WorldView, MODIS и Google по двум классам (с возгораниями и без них), и получен средневзвешенный балл F1-score, составляющий около 98 % [117].

Спутниковые системы охватывают очень большую территорию и обеспечивают надежное соединение, на которое не влияют физические и погодные препятствия по сравнению с наземными системами. Спутниковые системы были применены для обнаружения лесных пожаров в режиме, близком к реальному времени. Они используют тепловые, оптические, обзорные и радарные датчики для получения точной информации, такой как температура, влажность, тип растительности, атмосферные условия, метеорологические и топографические данные, прошедшие пожары и результаты деятельности человека, предоставляя информацию о местоположении и интенсивности пожаров. Оптические датчики могут обнаруживать изменения в растительности и почвенном покрове,

которые могут указывать на наличие дыма и пожара. Тепловые датчики могут распознавать тепловую энергию, выделяемую дымом и пламенем, и предоставлять информацию о температуре и интенсивности пожаров. Радиолокационные датчики передают и принимают сигналы, позволяющие видеть сквозь дым и облака, создавая изображения поверхности земли с высоким разрешением даже в ночных условиях. Затем эти данные обрабатываются с использованием математических моделей или методов искусственного интеллекта, таких как модели машинного и глубокого обучения, для обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Орбиты, на которых находятся спутниковые системы, имеют три категории: геостационарная орбита (GEO), высота около 36 тыс. км, низкая околоземная орбита (LEO), высота до 2 тыс. км и полярная солнечно-синхронная орбита (SSO), высота от 200 до 1000 км [34].

Для обнаружения лесных пожаров на спутниковых снимках дистанционного зондирования в последние годы были разработаны методы обнаружения и сегментации пожаров на основе глубокого обучения. Оба метода показали интересные результаты по сравнению с традиционными методами машинного обучения. Кроме того, они были полезны для эффективного управления пожарами. Обнаружение пожара было направлено на определение его наличия (дыма, пламени или того и другого) и его классификацию (рис. 5), в то время как сегментация пожара – это процесс группировки похожих пикселей дыма или пламени на входном спутниковом изображении на основе таких их характеристик, как цвет, форма и текстура, и вывода результата на экран в виде маски (рис. 6).

Модели глубокого обучения использовались для анализа дыма и автоматического обнаружения очагов возгорания. Они способны распознавать закономерности в данных спутниковых снимков, соответствующие дымовым шлейфам и пожарам, и использовать эту информацию для выявления случаев возгорания по мере их появления. Для обнаружения и сегментации пожаров с использованием спутниковых данных были предложены многочисленные модели глубокого обучения. При анализе спутниковых изображений применены сверточные нейросети, предназначенные для выявления закономерностей в визуальных данных, а также для распознавания дымовых шлейфов и других признаков, связанных с пожаром. По данным японского геостационарного метеоспутника Himawari-8 [51] была разработана сверточная нейросеть, состоящая из трех сверточных слоев 3×3 , за каждым из которых следуют функция активации ReLU и слой максимального объединения, а также два полностью связанных слоя для обнаружения лесных пожаров. Используя 2157 спутниковых изображений с 93270 выборками без наличия пламени и с 7795 выборками с пламенем, предложенная сверточная нейросеть показала превосходную производительность, достигнув показателя F1-score 74 % по сравнению с методом «случайного леса», давшим 54 %. По данным обнаружения и распознавания 715 лесных пожаров на изображениях, полученных спутником KITSUNE CubeSat, была выполнена сравнительная

оценка сверточных нейромоделей MiniVGGNet, ShallowNet и LeNet [5], показавшая их точность соответственно 98 %, 95 % и 97 %. Для обнаружения лесных пожаров с использованием спутниковых снимков Landsat была предложена специальная оптимизированная сверточная нейросеть, интегрировавшая метод ALO (Antlion Optimization) в функцию активации PReLU и показавшая точность около 61 % [49]. Был представлен основанный на глубоком обучении метод активного обнаружения лесных пожаров под названием Fire-Net, включающий в себя остаточные, точечные или глубинные сверточные и многомасштабные сверточные блоки. Система Fire-Net была обучена с использованием 578 снимков со спутника Landsat-8 и протестирована на 144 снимках лесов Австралии, Центральной Африки, Бразилии и Чернобыльской зоны, достигнув показателей F1-score соответственно 97,6; 80,5; 97,0 и 97,2 % [99].

Был предложен облегченный вариант сверточной нейросети для обнаружения дыма под названием VIB_SD, объединивший начальную структуру, метод концентрации внимания и остаточное обучение. Нейросеть была обработана с использованием 1836 мультиспектральных изображений, основанных на данных Landsat 8 OLI и Landsat 5 TM и разделенных на три класса («чистый», «задымленный» и «иной») с горизонтальным и вертикальным обращениями в качестве методов увеличения объема обучающих данных. Результаты экспериментов показали, что добавление инфракрасного диапазона улучшило производительность на 6 % по сравнению с использованием только диапазона RGB (красный, зеленый, голубой), при этом точность составила 86,5 % [135]. Был предложен еще один метод обнаружения дыма, названный

DC-CMEDA (глубокая свертка и коррелированное выравнивание встроенного распределения по коллектору), состоящий из глубокой сверточной нейросети (ResNet-50) и продукта CMEDA в качестве усовершенствованного продукта MEDA (выравнивание встроенного распределения по коллектору). Сначала нейросеть ResNet-50 извлекала характеристики дыма из данных целевого и исходного доменов (спутниковых и видеоизображений), а затем с целью уменьшить смещение в исходной области и сделать ее более похожей на целевую был использован продукт CMEDA, и, наконец, в качестве выходных данных было показано наличие или отсутствие дыма. В ходе обучения DC-CMEDA было использовано 200 спутниковых снимков и 200 RGB-изображений, каждое из которых включало 100 изображений с дымом и 100 изображений без дыма. При преобразовании спутниковых изображений в видеоизображения метод DC-CMEDA достиг точности в 93,0 %, превзойдя современные методы А. Филоненко [33] и DC-ILSTM [124] соответственно на 2,5 % и 1,5 %. При переходе от видеоизображений к спутниковым снимкам метод DC-CMEDA также показал высокую точность – 89,5 %, превзойдя методы А. Филоненко и DC-ILSTM соответственно на 6,5 % и 4,0 % [123]. С использованием данных MODIS был предложен метод обнаружения дыма на сверточной нейросети и продукте SmokeNet. Представлен новый набор данных под названием USTC_SmokeRS, содержащий 6255 спутниковых снимков дыма и очень близких к дыму классов, таких как дымка, облака, туман и т. д. SmokeNet представляет модифицированный метод AttentionNet, который объединяет пространственное и канальное внимание с остаточными блоками и обеспечивает точность 92,7 % [6].

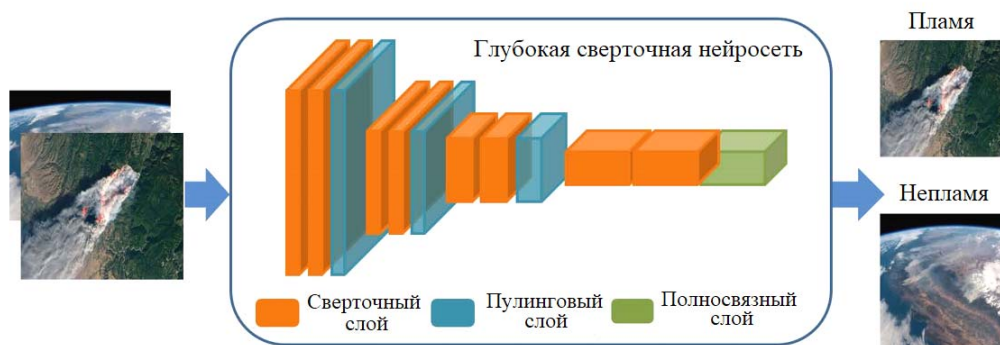


Рис. 5. Обнаружение лесного пожара на основе модели глубокого обучения [34]

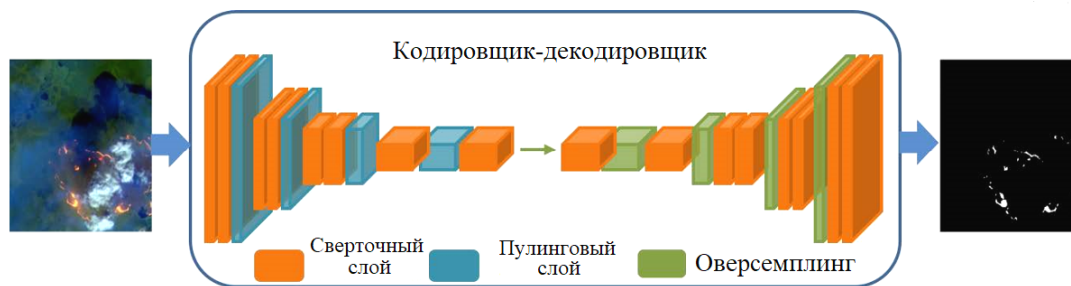


Рис. 6. Сегментация лесного пожара на основе модели глубокого обучения [34]

Была представлена новая программа сверточной нейросети FireCNN для обнаружения пожаров на спутниковых снимках Himawari-8, состоящая из трех сверточных блоков и полностью связанного слоя. Каждый сверточный блок состоял из двух сверточных слоев, за каждым из которых следовала активация ReLU и слой максимального объединения. Нейросеть FireCNN была протестирована на наборе данных, содержащем 3646 негорючих точек и 1823 очага возгорания, и получена точность обнаружения 99,9 %, что выше, чем при использовании традиционных методов машинного обучения (пороговая обработка, метод опорных векторов и «случайный лес») [43].

Перечень методов и результатов обнаружения лесных пожаров можно было бы продолжить и дальше, поскольку в литературе они исчисляются сотнями. Однако это не даст детального представления о реализации упомянутых алгоритмов, как и не даст возможности какого-либо их синтеза в рамках журнальной статьи. Похожая ситуация сложилась на волне компьютерного бума в конце 1970-х годов при разработке имитационных моделей процессов, протекающих в лесных экосистемах [14; 38; 97; 105]. Каждая такая модель являлась математической записью представлений ее автора о способе действия исследуемого объекта. А поскольку как авторы, так и их индивидуальные видения различных аспектов функционирования лесных экосистем, исчислялись сотнями, то выполнить некий методологический синтез этих «видений» было практически невозможно.

Данная ситуация в нашем исследовании усугубляется как многократно возросшим объемом информации по фактическим данным о лесных пожарах, накопленным в соответствующих репозиториях, так и бесчисленным множеством алгоритмов и программных обеспечений, использованных при различных способах обнаружения лесных пожаров. Поэтому в нашем дальнейшем изложении основное внимание уделено описанию некоторых наиболее продвинутых алгоритмов глубокого обучения, реализованных при обнаружении лесных пожаров.

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ И ЦИФРОВОЙ КОЛОРИМЕТРИИ

За последние десятилетия были предприняты значительные усилия по разработке средств автоматического обнаружения лесных пожаров в трех основных направлениях: использование спутниковых данных, инфракрасных сканеров дыма и локальных датчиков (например, метеорологических). Для разработки эффективной системы обнаружения лесных пожаров на основе нечеткой логики была поставлена цель – извлечь ценную информацию из данных цветового пространства и использовать ее для определения местоположения лесных пожаров с помощью обработки изображений и методов искусственного интеллекта, что входит в область цифровой колориметрии [2; 3]. Ранее была представлена эффективная система для обнаружения лесных пожаров с использованием пространственных данных о лесном покрове. При разработке системы использовались методы обработки

изображений и искусственного интеллекта. Для сегментации и обнаружения пожара применены соответственно анизотропная диффузия и нечеткая логика. В процессе оценки использовались общедоступные пространственные данные. Нечеткие правила, полученные с использованием представленной системы, успешно выявляли лесные пожары в пространственных данных лесного покрова [2]. В данном разделе описаны концепции, используемые в представленной интеллектуальной системе для эффективного обнаружения лесных пожаров, такие, как цветовое пространство, сегментация анизотропной диффузии и искусственные нейронные сети с радиальными базисными функциями [3].

Преобразование цветового пространства. Цветовое пространство определяется как средство, с помощью которого выполняются спецификация, создание и визуализация цветов. Экран компьютера воспроизводит цвета на основе различных комбинаций красного, зеленого и синего излучения люминофора, необходимых для формирования цвета. Обычно цвет представлен тремя координатами или параметрами. Эти параметры иллюстрируют расположение цвета в цветовом пространстве. Преобразование цветового пространства определяется как преобразование цвета из одного источника в другой. Обычно преобразование цветового пространства выполняется, когда изображение, представленное в одном цветовом пространстве, преобразуется в другое цветовое пространство с целью сделать переведенное изображение максимально похожим на оригинал. В предлагаемой интеллектуальной системе изображения в цветовом пространстве RGB (красный, зеленый, голубой) преобразуются в цветовое пространство XYZ [3]. Цветовое пространство CIE XYZ – одно из первых математически определенных цветовых пространств, созданных Международной комиссией по освещению в 1931 году [103]. Любой цвет может быть сгенерирован как сочетание трех других цветов или «трестимулов», обычно это RGB для систем на базе телевизора или компьютера. Цветовое пространство XYZ определено таким образом, что все видимые цвета могут быть представлены с использованием только положительных значений, а значение Y равно яркости. Диаграмма цветности чрезвычайно нелинейна, поскольку вектор единичной величины, обозначающий разницу между двумя цветовыми оттенками, виден неравномерно. Для перевода значений RGB в определенном наборе основных цветов в CIE XYZ и обратно использовано матричное преобразование 3×3 . Уравнения для преобразования RGB в цветовое пространство XYZ имеют вид [3]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,412453 & 0,357580 & 0,180423 \\ 0,212671 & 0,715160 & 0,072169 \\ 0,019334 & 0,119193 & 0,950227 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Сегментация анизотропной диффузии. Сегментация изображения определяется как низкоуровневая задача обработки изображений, предназначенная для разделения изображения на идентичные области [28]. Результаты сегментации могут быть использованы

для идентификации интересующих областей и объектов в сцене, что очень полезно для последующего анализа изображения. Из-за того, что присущие множеству объектов свойства не только обладают нелинейной индивидуальной зависимостью, но и включают в себя зависимость между объектами R, G и B, сегментация цветного изображения более монотонна по сравнению с сегментацией серого изображения. В данной системе для сегментации изображений в пространственных данных применен подход анизотропной диффузии. Сегментация выполняется на изображении, преобразованном в цветовом пространстве XYZ. В литературе предлагается множество моделей линейной и нелинейной диффузии для сглаживания и сегментации изображений. Анизотропная диффузия улучшает реакцию алгоритмов обнаружения границ за счет ряда операций, а именно: сглаживания внутренней части изображения, чтобы акцентировать границы для сегментации, устранения ложных деталей и эффективного устранения шума на изображениях [94]. Процессы релаксации, реализующие анизотропную диффузию, как правило, не учитывают низкочастотные объекты, которые сложно рассеять без чрезмерной обработки изображения. Анизотропная диффузия при обработке изображений дискретизирует семейство непрерывных дифференциальных уравнений в частных производных [3].

Искусственные нейронные сети с радиальными базисными функциями. Как уже отмечалось выше, искусственные нейронные сети обладают способностями распознавать закономерности, управлять данными и обучаться. Наиболее значимым плюсом использования искусственных нейросетей является решение очень сложных задач, связанных с традиционными технологиями, без формулирования алгоритмического решения или использования очень сложного решения [68]. В конце 1980-х годов появился вариант искусственной нейронной сети с радиальными базис-

ными функциями (Radial Basis Functions), хотя их корни уходят в гораздо более ранние методы распознавания образов [115]. Нейросеть с радиальной базисной функцией (RBF) основана на контролируемом обучении. Сети RBF были предложены несколькими исследователями независимо один от другого [12; 73; 86] и представляют популярный вариант многослойного персептрона MLP. Сети RBF также отлично справляются с моделированием нелинейных данных и могут быть обучены за один этап, а не с использованием итеративного процесса, как в алгоритме MLP. Сеть RBF имеет структуру прямой связи, состоящую из одного скрытого уровня J локально настроенных модулей, которые полностью связаны с выходным уровнем из L линейных модулей. Все скрытые модули одновременно получают n-мерный вещественный входной вектор X. Основным отличием от MLP является отсутствие весов скрытых слоев [3].

Представленная интеллектуальная система обнаружения лесных пожаров использует пространственные данные, собранные в лесных регионах. При проектировании представленной интеллектуальной системы применена нейросеть с радиальной базисной функцией. Первоначально изображения с наличием пожаров преобразовывались из цветового пространства RGB в пространство XYZ. Преобразование цветового пространства из RGB в XYZ выполнялось с помощью уравнений (1). В результате получено изображение в цветовом пространстве RGB (рис 7, а) и соответствующее ему преобразованное изображение в цветовом пространстве XYZ (рис. 7, б).

Затем изображение, преобразованное в цветовом пространстве XYZ, сегментировалось с использованием анизотропной диффузии, что позволяло определить местоположение очагов возгорания. Результат анизотропной диффузионной сегментации показан на рис. 7, в.

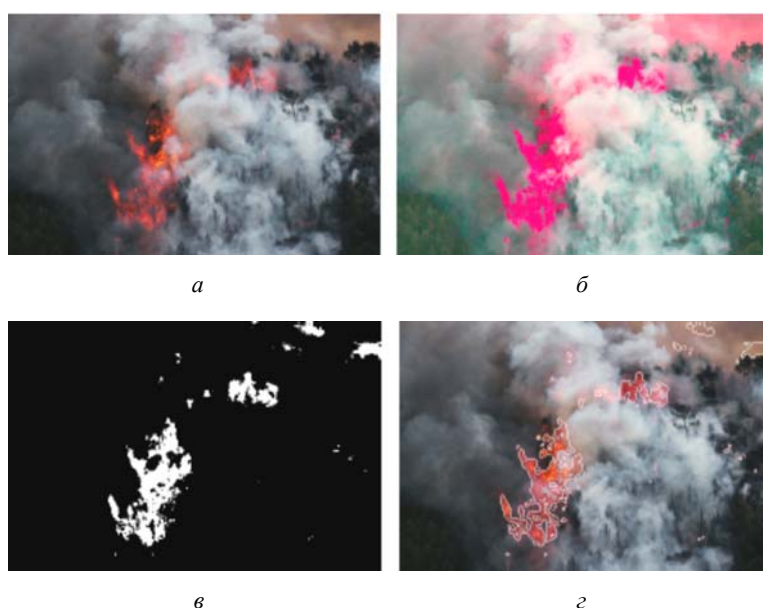


Рис. 7. Результат работы представленной интеллектуальной системы:

а – ввод изображения; б – изображение, преобразованное в цветовом пространстве XYZ;

в – вывод анизотропной диффузионной сегментации; г – изображение обнаруженного пожара [3]

Области возгорания, полученные с помощью сегментации, использованы для обучения нейронной сети с радиальной базисной функцией. Нейронная сеть с радиальной базисной функцией обучалась с использованием значений цветового пространства XYZ пикселей, которые принадлежат областям возгорания. С помощью обученной нейронной сети определялось наличие лесных пожаров на изображении. Затем значения цветового пространства XYZ пикселей в сегментированных областях передавались в качестве входных данных в обученную нейронную сеть для определения наличия пожаров (рис. 7, з). Предложенная интеллектуальная система реализована в среде Matlab 7.4 [3].

Таким образом, в представленной интеллектуальной системе использованы изображения пространственных данных соответствующих лесных районов, полученные с помощью дистанционного зондирования. При проектировании системы применена нейросеть с радиальной базисной функцией. Для обучения нейросети использованы наборы пространственных изображений горящих лесов. Первоначально цифровые изображения пространственных данных о лесах преобразуются из цветового пространства RGB в пространство XYZ, и выполняется сегментация изображения в цветовом пространстве XYZ с помощью метода анизотропной диффузии. Значения цветового пространства XYZ для изображений пожаров, полученные в результате сегментации, передаются в качестве входных данных для обучения нейросети с радиальной базисной функцией. Для заданного значения пикселя в цветовом пространстве XYZ обученная нейросеть с радиальной базисной функцией определяет, соответствует ли этот пиксель области пожара или нет [3].

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ПОМОЩЬЮ ВСТРОЕННЫХ ДАТЧИКОВ

Последние достижения в области компьютерного зрения и методов глубокого обучения открывают путь к разработке новых инструментов для обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Предложена интеллектуальная система обнаружения лесных пожаров и оповещения о них, использующая модель глубокого обучения IWFFDA-DL. Представленный метод нацелен на две основные функции: (1) наиболее раннее обнаружение пожара и (2) информирование соответствующих служб реагирования. Устройства обнаружения включают в себя датчики пламени, дыма и тепла; кроме того, подключена камера для подтверждения фактических изображений пожара. В зависимости от характера возгорания, диспетчер выполняет несколько одновременных операций: включает систему тушения, подает звуковой сигнал пожарной тревоги, информирует подразделения аварийно-спасательной службы, отключает электроснабжение и передает владельцу данные, включающие адрес объекта [1]. На рис. 8 показан общий рабочий процесс предложенного метода IWFFDA-DL.

Датчики являются основным источником входных данных, а для объединения сигналов, полученных от датчиков, подключены цифровые камеры. Благодаря интеграции функционирования этих двух устройств разработан интеллектуальный метод точного обнаружения пожара. Модули системы мобильной связи GSM и интегрированной сенсорной системы (ISS), а также модули обработки изображений, объединены в единое целое с помощью микроконтроллера. В представленной модели беспроводную передачу данных обеспечивает подключение через Wi-Fi. Всем интегрированным сенсорным системам на данной территории присвоены номера, которые используются микроконтроллером для определения точного местоположения пожара. Чтобы запустить метод объединения нескольких данных, микроконтроллер устанавливает пороговое значение. Он анализирует сенсорную информацию, чтобы создать оптимальную схему восприятия для выявления возможных пожаров. На основе результатов обработки изображений система определяет приоритетность результатов и передает их в службу экстренного реагирования [1].

Эффективное обнаружение лесного пожара основано на применении модели ACNN-BLSTM. Для извлечения характеристик и повышения точности прогноза сверточная нейронная сеть, сеть BLSTM и эффективный канал привлечения внимания (Effective Channel Attention – ECA) интегрированы в единую структуру, что представляет собой новый сетевой метод прогнозирования временных рядов под названием ACNN-BLSTM. *«Attention mechanism» – механизм привлечения внимания, позволяющий модели фокусироваться на наиболее релевантных частях входных данных, учитывая весь контекст. В данном случае сосредоточить внимание модели на горящем участке леса – ключевой способ улучшить способность модели выделить горящий участок из лесного полога* [67]. Согласно представленному методу происходит автоматическое обучение, а также извлечение локальных характеристик и характеристик с длительной памятью, из временных рядов путем полного использования данных для минимизации сложности моделей. Кроме того, отлажен канал привлечения внимания к дополнительным существенным характеристикам. На рис. 9 показана структура алгоритма BLSTM.

Для выполнения задач прогнозирования использован плотный метод (dense method), содержащий множество полностью связанных (fully connected) слоев. В данном случае сверточная нейросеть использована для эффективного извлечения характеристик данных. По сравнению со структурой обычной нейросети, сверточная нейросеть имеет локальную связь между нейронами, что снижает количество параметров на уровне соединений. В частности, она включает в себя часть связи между $n-1$ слоем и n -слоем сверточной нейронной сети. Для более точного прогнозирования использована структура BLSTM, которая применяется как в прямом, так и в обратном направлениях для всех обученных последовательностей. Для предоставления полных контекстных данных всех точек последовательности сети LSTM связаны с аналогичным выходным уровнем [1].

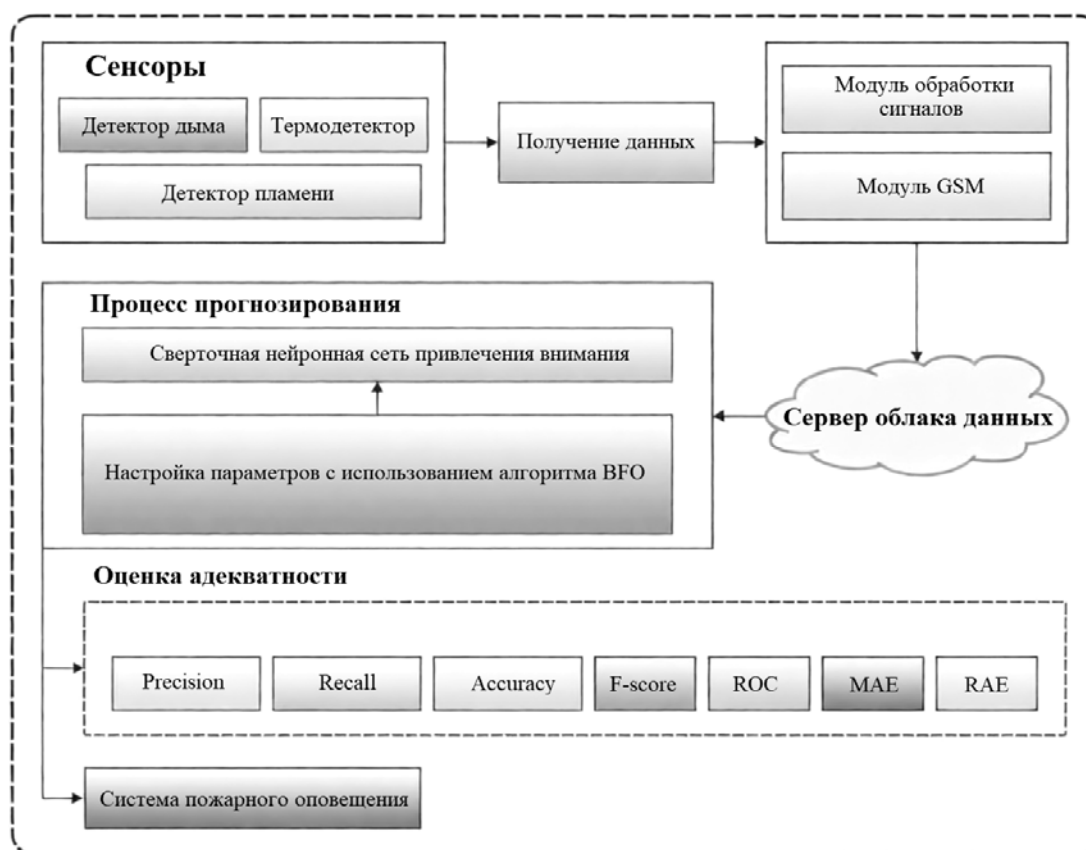


Рис. 8. Общий процесс предложенного метода IWFFDA-DL [1].

Показатели адекватности: Precision – точность как доля объектов, действительно принадлежащих к положительному классу, среди всех объектов, которые модель отнесла к положительному классу: $\text{Precision} = TP / (TP + FP)$; Recall – полнота как доля объектов положительного класса, которые модель правильно идентифицировала среди всех объектов положительного класса в тестовой выборке: $\text{Recall} = TP / (TP + FN)$; Accuracy – точность (правильность) – степень совпадения измеренного значения величины со стандартным значением; F-score – (F-оценка) объединяет «precision» и «recall» через формулу гармонического среднего: $F = 2 \times (\text{precision} \times \text{recall}) / (\text{precision} + \text{recall})$ (F-score учитывает как ложноположительные, так и ложноотрицательные результаты, что делает её особенно ценной для несбалансированных наборов данных); ROC – рабочая характеристика приемника как всесторонняя оценка эффективности классификатора (см. текст); MAE – абсолютная средняя ошибка; RAE – относительная средняя ошибка. Обозначения TP, FN и FP указывают соответственно на идеальную, недостаточную и чрезмерную идентификацию [39; 104]

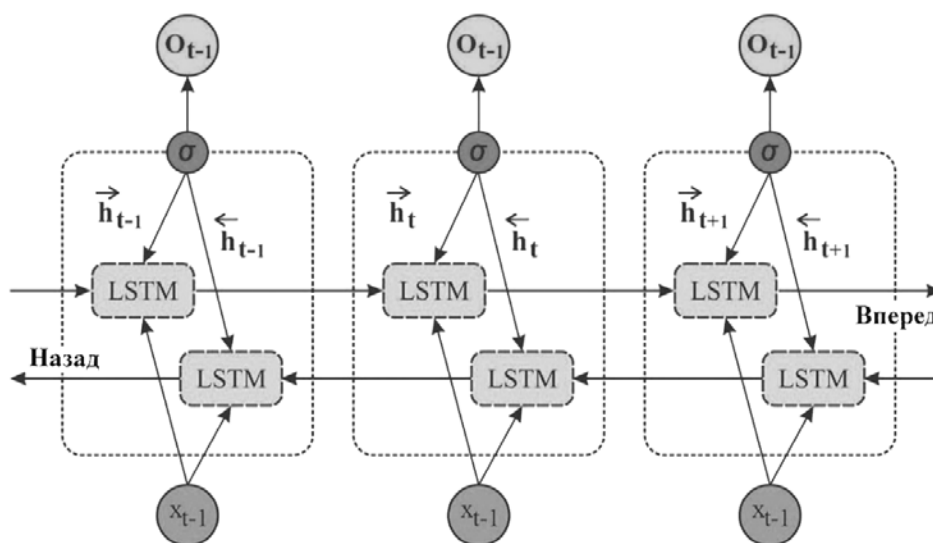


Рис. 9. Структура модели BLSTM; на схеме LSTM означает «Long Short Term Memory» – долго- и кратковременную память [1]

Процесс управления вниманием (СА) обладает огромным потенциалом для повышения эффективности глубокой сверточной нейросети. Чтобы избежать чрезмерной подгонки метода и сократить время расчета, был создан облегченный компонент с минимальной сложностью под названием «эффективный канал привлечения внимания» (Effective Channel Attention – ECA). Система ECA может определять не только веса для всех каналов, но и корреляцию между ними. В данных временных рядов больший вес присваивается ключевому признаку, а меньший – несущественному признаку [23]. Таким образом, ECA работает с данными, которые повышают чувствительность сети к существенным признакам. У системы ECA есть приоритет для реализации глобального усредненного пула (Global Average Pooling – GAP) каналов. Затем ECA использует все каналы и k -блилежащих каналов для получения локальных перекрестных соединений. ECA увеличивает вес канала, выполняя быструю 1D сверточную обработку в виде:

$$\omega = \sigma(C1D_k(y)), \quad (2)$$

где $C1D$ относится к одномерной сверточной системе, а k означает размер ее ядра. Чтобы избежать ручного изменения k , система ECA использует способ адаптивного отображения размера каналов для определения значения k . Поскольку размер ядра k одномерной сверточной функции прямо пропорционален размеру канала C , эквивалентная связь определена как

$$C = \varphi(k) = 2^{(\gamma * k - b)}. \quad (3)$$

Таким образом, чтобы обеспечить размер канала C , размер ядра k корректируемо определяется следующим образом:

$$k = \psi(C) = \left\lfloor \frac{\log_2(C)}{\gamma} + \frac{b}{\gamma} \right\rfloor \text{odd}, \quad (4)$$

где $\lfloor \text{odd} \rfloor$ обозначает соседнее нечетное число. Параметры γ и b имеют значения [2] и [1] соответственно. Примечательно, что канал с высокой размерностью имеет больший диапазон, а канал с минимальной размерностью – меньший диапазон взаимодействия с нелинейным отображением [1].

Для оптимального выбора гиперпараметра, используемого в модели ACNN-BLSTM, применен упомянутый на рис. 8 алгоритм BFO – новый метод оптимизации, основанный на моделировании некоторых природных явлений (в частности, группового поиска пищи бактериями), разработанный К. Пассино в 2002 году [83]. Алгоритм BFO стал эффективным методом оптимизации, который обеспечивает более высокую скорость сходимости, а также точность, применяемую в ряде приложений в режиме реального времени. Метод BFO стимулируется эффективностью хемотаксиса виртуальных бактерий, которые движутся навстречу (в направлении) или в сторону (не в направлении) от определенного сигнала, делая меньший шаг при поиске питательных веществ в пространстве [22].

Для идентификации все кадры проходят процесс обнаружения объектов на основе алгоритма YOLOv3, и представленный способ может передавать данные пользователю через GSM-модем. Это беспроводное устройство, разработанное для передачи данных с компьютера с использованием общей службы радиосвязи (GPRS) и систем GSM. Для активации передачи требуется SIM-карта модуля идентификации абонента и международный идентификационный номер мобильного устройства (IMEI) для идентификации адресата. Данные о состоянии системы наблюдений передаются в хранилище данных для анализа причины пожара. После получения сигналов от микроконтроллера GSM-модем пересылает SMS-сообщения службе реагирования, чтобы она могла предпринять соответствующие действия [1].

Эффективность прогнозирования пожара с помощью метода IWFFDA-DL оценена путем экспериментальной проверки. Результаты проанализированы с использованием набора данных, который включает три класса пожарного состояния, а именно нормальный, потенциальный и экстремальный. При нормальном состоянии температура составляет менее 55 °C, пламя менее 180 мкм, а дым менее 50 дБ/м. При потенциальном состоянии значение температуры составляет от 55 °C до 65 °C, пламени – от 180 до 190 мкм, а дыма – от 50 до 150 дБ/м. При экстремальном пожароопасном состоянии температура превышает 65 °C, пламя превышает 190 мкм, а дым превышает 150 дБ/м [1].

Согласно экспериментальной проверке модели методика IWFFDA-DL показала превосходные результаты во всех прогонах. Например, в ходе первого прогона показатели «precision», «recall», «accuracy», F-score и ROC (см. подпись к рис. 8) составили соответственно 0,965, 0,939, 0,989, 0,951 и 0,986, а по завершении последнего, десятого прогона – соответственно 0,979, 0,995, 0,996, 0,987 и 0,999. Посредством ROC (Receiver Operating Characteristic) как рабочей характеристики приемника получена комплексная оценка эффективности классификатора:

$$ROC = \frac{P(x | \text{positive})}{P(x | \text{negative})}, \quad (5)$$

где $P(x|C)$ обозначает условную вероятность того, что запись данных имеет классовую метку C . Кривая ROC отображает результаты классификации от наиболее позитивной классификации к наиболее негативной [104].

Общий анализ результатов классификации по методу IWFFDA-DL в ходе десяти прогонов модели с использованием различных показателей адекватности показал, что метод IWFFDA-DL имеет высокую эффективность классификации по различным классам. Анализ кривой четких рабочих характеристик приемника (ROC) по методу WFTDA-DL показал, что он способен обеспечить повышенную производительность при значении ROC до 0,999.

Таким образом, предложенная модель глубокого обучения IWFFDA-DL включает в себя интегрированную сенсорную систему, объединяющую множество датчиков и выступающую в качестве основного

источника входных данных для обнаружения лесного пожара. Для идентификации наличия пожара применена модель сверточной нейронной сети с двунаправленной долго- и кратковременной памятью (ACNN-BLSTM). Для настройки гиперпараметров модели ACNN-BLSTM использован алгоритм оптимизации поиска пищи бактериями (BFO). При обнаружении пожара модем глобальной системы мобильной связи (GSM) передает сообщения службе реагирования для принятия необходимых мер. Выполненный комплекс симуляций показал, что предложенная модель обеспечивает повышенную производительность при значении ROC до 0,999 [1].

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Многие из существующих систем обнаружения пожара основаны на дымовой и тепловой сигнализации. Основным недостатком сигнализации с датчиками дыма и тепла является то, что одного модуля недостаточно для мониторинга всех потенциально пожароопасных мест. Даже если они будут установлены повсеместно, этого недостаточно для надежного обнаружения. По мере увеличения количества датчиков также многократно возрастает стоимость обнаружения пожаров.

Лесные пожары можно обнаруживать с помощью систем визуального наблюдения, которые могут быть установлены на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) для регулярного сканирования площадей, подверженных пожарам. Предлагаемая система может выдавать последовательные и высокоточные оповещения о пожаре в течение нескольких секунд. Это снижает затраты, поскольку для обеспечения работы всей сети видеонаблюдений достаточно всего одного программного обеспечения. Реальная задача состоит в том, чтобы свести к минимуму ошибки при обнаружении пожара и отправке оповещений. Предлагаемая структура использует преимущества сверточной нейронной сети, которая получает входные данные, предварительно обрабатывает их и объединяет с использованием области предложений. Затем алгоритм обнаружения объектов на основе регионов в нейросети классифицирует эти предложения на пожарные и не пожарные в интересующем регионе с помощью сверточных слоев [74].

Сверточная нейронная сеть состоит из сверточных слоев и отличается от других алгоритмов обнаружения объектов способностью генерировать интересующую область на исходном изображении с помощью фильтров преобразования изображений, называемых сверточными ядрами, в то время как другие алгоритмы для построения модели используют взвешенные суммы и веса соединений. Количество созданных карт объектов будет равно количеству ядер. Цвет пикселя на картах объектов соответствует точкам активации. Белые пиксели на карте объектов – это точки на исходном изображении с сильными точками активации. Серые пиксели представляют слабые точки активации, а черные пиксели представляют сильные отрицательные точки активации. Область пламе-

ни на исходном изображении красновато-оранжевая, поэтому сверточное ядро изменяет цвет пикселей на белый. Каждый нейрон в сверточной нейронной сети получает входные данные от ограниченной части предыдущего слоя. На рис. 10 представлена базовая архитектура сверточной нейросети, где в качестве входных данных представлены изображения пламени. Затем слои сети придают изображению абстрактную форму, удаляя все фоновые шумы, и выделяют объект, который необходимо обнаружить.

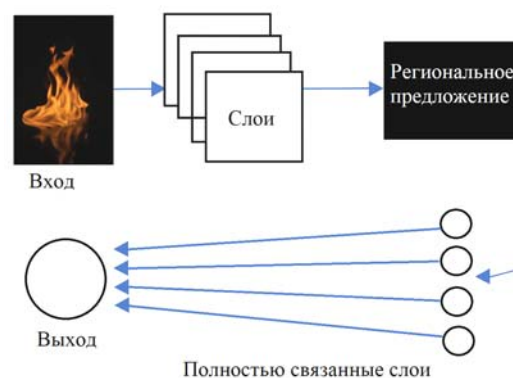


Рис. 10. Архитектура сверточной нейросети [74]

Данные представлены в виде видеок кадров, которые получены с камер видеонаблюдения, но для простоты использования для обучения и тестирования используются специально созданные видеоролики. Соответствующие кадры с пламенем и без него затем сохраняются, а набор данных делится на обучающий и тестовый. Следующий этап построения качественной модели глубокого обучения включает предварительную обработку данных, которые фильтруются и обрабатываются или просто приводятся в соответствие с пользовательскими требованиями. Удаляются из кадра также шумы и другие нежелательные объекты. Алгоритм запрашивает соответствующие данные, в противном случае он может привести к нежелательным результатам [74].

Чтобы нейронная сеть могла точно обнаружить возгорание, ей необходимо знать особенности огня применительно к компьютерному зрению. Признаки пожара легко распознаются человеческим глазом. Огонь излучает красноватый цвет; при различных обстоятельствах он имеет форму и движение в зависимости от того, какой использован горючий материал. В данном случае для обнаружения используются форма, цвет и движение огня и дыма, которые извлекаются из разных кадров в обучающем наборе. Затем извлеченные признаки передаются в сеть для построения модели. Эта модель представляет собой набор пороговых значений, которые помогают сети точно обнаруживать возгорание. Модель извлекает уроки из выявленных признаков и устанавливает стандарт для анализа новых входных данных [74].

Поскольку важно добиться необходимой точности и проверить, работает ли система, необходима валидация модели глубокого обучения. Процесс валидации выполнялся с использованием другого набора видеок кадров, который полностью отличался от набора

данных, предоставленного для построения модели. Согласно результатам тестирования, система с помощью тестового набора достигла точности около 93 % [74].

Возможности использования видеокадров с БПЛА при обнаружении пожара с помощью глубокого обучения являются инновационными. Предложенная система может быть усовершенствована путем интеграции беспроводных датчиков с системой видеонаблюдения посредством БПЛА для дополнительной защиты и точности. Алгоритм демонстрирует большие перспективы в адаптации к различным условиям. Из-за ограничений традиционных методов, методы глубокого обучения, которые в последнее время стали популярны в приложениях для обработки изображений и распознавания образов в процессе автоматического обнаружения лесных пожаров, позволяют эффективно решить проблему. В этом исследовании предполагаемые очаги возгорания, не обнаруженные во время наблюдения за лесными пожарами, были классифицированы, а их изображения были выделены для улучшения распознавания. Систематически анализировались и сравнивались несколько методов выделения признаков, при этом типы объектов задавались вручную. После создания нейросетевой модели были тщательно подобраны оптимальная скорость обучения и количество итераций для точного обнаружения пламени. Обучение проводилось с использованием установленного набора образцов изображений пламени, что позволило разработать надежную обучающую модель. Была проведена оценка точности модели по сравнению с другими моделями, и ее превосходная производительность (около 0,86) подтвердила эффективность предложенного подхода [74].

Полученные результаты показывают перспективность использования сверточных нейронных сетей для обнаружения пожара посредством БПЛА по сравнению с другими нейронными сетями. Система интеллектуально объединяет несколько обучающих данных для расчета и снижения частоты ложных оповещений при полностью подключенной сети. Затем эти данные передаются в алгоритм принятия решений для определения того, есть пожар или нет. Несмотря на незначительные ошибки обнаружения на некоторых изображениях, общая производительность и статистика являются вполне приемлемыми. Единственным недостатком является некоторая медлительность, поскольку для получения результатов требуется большая вычислительная мощность. Количество ложных срабатываний может быть уменьшено за счет дополнительной очистки данных [74].

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Методы компьютерного зрения становятся всё более перспективными при обработке данных орбитальных снимков с использованием сверточных нейронных сетей [42]. На примере водно-болотных угодий Бразилии предложен подход, основанный на новых методах обнаружения лесных пожаров с использова-

нием изображений камеры WFI китайско-бразильского спутника CBERS 04A. Спутник CBERS 04A оснащен мультиспектральной и панхроматической камерами с широким спектром обзора WPM, мультиспектральной камерой MUX и широкоугольной камерой для формирования изображений WFI. Время сканирования датчика WFI составляет пять дней, что позволяет осуществлять активный мониторинг пожаров с высоким пространственным разрешением (55 м). При таком подходе аннотировалась только одна точка, что облегчало задачу маркировки, которая отнимала много времени и позволяла уменьшить влияние аннотации в виде ограничивающих рамок, поскольку дымовые шлейфы имели разные размеры [42].

В общей сложности были идентифицированы 775 дымовых шлейфов. Набор данных был помечен вручную одной точкой у основания каждого столба дыма, свидетельствующего о наличии горящего объекта (рис. 11). Дымовые шлейфы и активный пожар рассматривались как синонимы. Кроме того, дым от активного пожара имеет форму конуса, поэтому при нескольких различных вариантах рассеивания дыма помечался наземный его источник с целью обучить нейросети распознавать эти различные варианты. Метки точек для дымового шлейфа включали их координаты, поскольку были привязаны к базам данных с сетевыми ресурсами. Для каждой точки наземной метки создавалась ограничивающая рамка, поскольку для большинства методов обнаружения объектов требовался прямоугольник, а не точка. Чтобы избежать субъективной идентификации дымового шлейфа, которая может варьировать в зависимости от количества дыма, выбрасываемого в атмосферу, были применены переменные значения размера ограничивающей рамки – от 10 до 50 пикселей [42].



Рис. 11. Ручные метки возгораний (красные точки) и ограничивающие рамки размером от 10 до 50 пикселей [42]

Такие методы, как новая локализация границ с учетом боковой ориентации (SABL – Side-Aware Boundary Localization) [120], адаптивный отбор обучающей выборки (ATSS – Adaptive Training Sample Selection) [133], варифокальная сеть (VarifocalNet) [134] и вероятностное назначение привязки (якоря) (PAA – Probabilistic Anchor Assignment) [56] до настоящего времени при орбитальном дистанционном зондировании не применялись. В предложенном подходе сравнивались перечисленные подходы, а также

быстрые нейросети R-CNN [91] и RetinaNet [65], отражающие современное состояние дистанционного обнаружения лесных пожаров. Кроме того, они включали в себя такие методы обнаружения объектов, как основанные на привязке, без привязки, одноступенчатые и двухступенчатые [42].

Быстрая нейросеть R-CNN [91] – это двухэтапная сверточная нейросеть, состоящая из магистральной сети и сети региональных предложений (RPN), которая разделяет сверточные функции с сетью обнаружения и работает как модуль механизма привлечения внимания, который генерирует ограничивающие рамки-кандидаты (якорные рамки). В сети RPN генерируются привязочные блоки с различными соотношениями сторон и масштабами, и сеть обнаружения оценивает каждый привязочный блок с помощью аннотированных ограничивающих блоков. Сеть обнаружения основана на быстрой нейросети R-CNN, которая получает привязки и карту объектов в качестве входных данных и возвращает класс и местоположение ограничивающих рамок. Привязка считается положительным обнаружением (или положительным образцом), если значение пересечения при объединении (IoU) превышает пороговое значение, обычно равное 0,5 (*IoU* – *Intersection over Union* – метрика для оценки качества обнаружения и сегментации объектов, которая измеряет степень перекрытия между предсказанным и реальным объектами. Чем ближе *IoU* к 1, тем точнее модель локализует объект). Таким образом, метрика IoU вычисляет степень перекрытия между рамкой привязки и аннотированной ограничивающей рамкой. В данной работе создана функциональная пирамида сетей (FPN) [64] поверх сети ResNet50 в качестве магистральной [42].

Сеть RetinaNet [65] представляет одноступенчатый метод обнаружения объектов, состоящий из двух основных блоков: FPN и Focal Loss. Блок FPN [64] представляет современную сверточную нейросеть, использующую пирамидальную иерархию объектов для их масштабирования. Потеря фокуса устраняет классовый дисбаланс между положительными (прямоугольники-кандидаты, чья метрика IoU превышает пороговое значение) и отрицательными (прямоугольники-кандидаты, чья IoU меньше порогового значения) выборками, вызванный перегрузкой отрицательных ограничивающих контуров, поскольку наиболее достоверными выборками являются положительные. В данной работе сформирована пирамида сетей FPN [64] поверх сети ResNet50 [42].

Был предложен адаптивный отбор обучающей выборки (ATSS), который отбирает некоторую совокупность положительных и отрицательных выборок в соответствии со статистическими характеристиками [133]. Исходя из близости к центру определения истинности данных, k якорей (anchors) выбираются в качестве положительных кандидатов в соответствии со значением IoU. Обучающая выборка ATSS с ResNet50 и FPN [64] рассмотрена в качестве основы, но сначала отбирались $k = 9$ якорных ячеек в качестве положительных кандидатов [42].

Вслед за [65], их последователи [134] предложили варифокальную сеть (VarifocalNet), которая сочетает

в себе полностью сверточное одноступенчатое обнаружение объектов (Fcos) [112] и метод ATSS, представленные в виде ограничивающего контура в форме звезды, и новую функцию потерь, названную варифокальной потерей. Изменение фокусного расстояния уменьшает вклад отрицательных выборок благодаря динамически регулируемому коэффициенту масштабирования и асимметрично увеличивает вклад положительных выборок (у которых значение IoU выше). Представление объекта в виде ограничивающего контура в форме звезды использует девять фиксированных точек выборки [26]. Форма звезды может отображать геометрию ограничивающего контура и информацию о близлежащих объектах, что позволяет уточнить изначально сгенерированные грубые ограничивающие контуры без потери эффективности. В данной работе построена пирамида сетей FPN [64] поверх сети ResNet50 с теми же параметрами алгоритма ATSS [42].

На основе алгоритма ATSS предложен метод PAA с новой стратегией назначения якорей [56] и с расширением таких опций, как отбор положительных обнаружений на основе их конкретной вероятности [132], статистика якорных метрик IoU [133] или оценка чистоты якорей [53; 62]. При назначении привязки (якоря) может учитываться гибкое количество положительных (или отрицательных) значений не только на основе метрики IoU, но и на основе вероятности того, что присвоение может быть подтверждено моделью. Другими словами, это означает, насколько алгоритм находит значимой привязку к целевому объекту (который может быть не с самой высокой IoU), чтобы назначить его в качестве положительного обнаружения. Таким образом, модель дает оценку, которая указывает как на классификационные, так и на локализационные качества. Оценки используются для определения вероятностного распределения положительных и отрицательных выборок, затем на основе положительных выборок назначение привязки превращается в задачу оценки максимального правдоподобия, где параметрами являются привязочные оценки. В данной работе построена пирамида сетей FPN поверх сети ResNet50 и использован метод PAA с архитектурой ATSS [42].

Продукт SABL [120] представляет оригинальный способ точного определения местоположения ограничивающего прямоугольника, основанный на аннотации, сделанной вручную. Этот подход основан на двухступенчатом детекторе. На первом этапе выполняется агрегация объектов интересующей области (RoI – Region of Interest) для получения дополнительных объектов. Второй этап включает в себя двухэтапную схему группирования. На первом этапе выполняется грубая оценка каждой границы по сегментам, а затем выполняется регресс для точной локализации. На втором этапе, начиная со второй ступени, вычисляется средняя достоверность оцененных групп, что также помогает скорректировать классификационные баллы и еще больше повысить производительность. Метод SABL применяется к одно- или двухэтапным системам. В данной работе построена пирамида сетей FPN поверх сети ResNet50 с помощью двухступенчатой сети Cascade-RCNN [42].

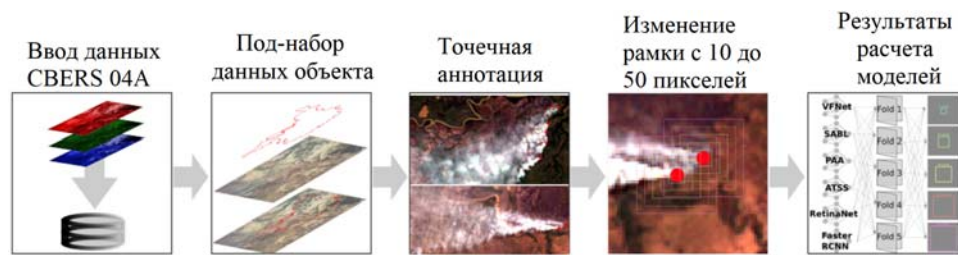


Рис. 12. Схема рабочего процесса предлагаемого метода [42]

Были сгенерированы участки размером 256×256 пикселей с использованием 49 изображений CBERS 04A WFI. Для обучения, валидации и тестирования было использовано в общей сложности 775 выборок (patches). Также были применены пятикратные повторности к процессу перекрестной проверки. На рис. 12 представлен обобщенный рабочий процесс предложенного метода. Методы компьютерного зрения, основанные на сверточных нейросетях, были разработаны с использованием таких эталонных баз данных, как ImageNet [27], PASCAL VOC [29] и MS COCO [63]. В обсуждаемой работе для процесса обучения была инициализирована основа всех методов обнаружения объектов с помощью предварительно подготовленных весов из базы данных ImageNet. Основой, используемой во всех моделях, была сеть ResNet-50. Применен оптимизатор стохастического градиентного спуска с импульсом, равным 0,9, и размером пакета, равным 2. Использован тестовый набор с целью настроить скорость обучения и количество периодов и снизить риск переобучения. Эмпирическим путем оценена скорость обучения (0,0001; 0,001 и 0,01) и было обнаружено, что сходимость функции потерь лучше при 0,001 и количестве эпох, равном 6. В процессе теста выбраны наиболее достоверные прогнозы с пороговым баллом, равным 0,5, а также применен метод немаксимального подавления (Non Max Suppression – NMS) (для уменьшения количества обнаружений с сильным перекрытием) с пороговым значением метрики IoU, равным 0,6. Таким образом, учитывая пять вариантов обучения, пять размеров ограничивающих рамок и шесть методов, было построено 150 моделей [42].

Предложенное приложение было разработано с использованием фреймворка (*framework – программная платформа, определяющая структуру программной системы*) MMDetection framework [21] на платформе Google Colaboratory. Процедуры обучения и тестирования проводились с использованием графического процессора Intel®a NVIDIA Tesla P100 PCIe, содержащего 80 ядер CUDA (Compute United Device Architecture) и 16 ГБ графической памяти [42].

Методы обнаружения объектов обычно оценивались на основе расстояния между ограничивающими рамками (прогнозируемое в сравнении с оценочным). Однако в данной работе результаты оценивались, основываясь на расстоянии между обозначенными и расчетными точками (центр расчетных ограничивающих рамок), поскольку внимание сосредотачивалось на положении активного пламени. Было принято пороговое значение расстояния для оценки истинно положительного (TP), ложно положительного (FP) и

ложноотрицательного (FN) значений, а также критериев «precision», «recall» и F1-score, формулы которых приведены в надписи к рис. 8. Центр прогнозируемых ограничивающих прямоугольников внутри радиуса покрытия от центра определения истинности (расстояние до которого меньше порогового значения) считается истинно положительным (TP), в противном случае – ложно положительным (FP). Стоит отметить, что предсказанный ограничивающий прямоугольник может принадлежать ко многим точкам истинно положительного определения (TP), поскольку его центр находится в пределах радиуса от центра определения истинности. Ложно отрицательное определение (FN) наблюдается, когда ограничивающий прямоугольник определения истинности не охватывает ни один из предсказанных ограничивающих прямоугольников. Варифокальная сеть (VarifocalNet) показала самый высокий средний балл F1-score, достигающий 0,81 при пороговом расстоянии, равном 20 пикселям (1100 м), а самые низкие значения F1-score дал адаптивный отбор обучающей выборки ATSS [42].

На рис. 13 показано изменение среднего показателя F1-score для каждого оцененного размера ограничивающей рамки, а точки представляют собой вычисленное значение для каждого метода ее построения. Видно, что объекты с ограничивающими рамками размером 10×10 пикселей дают наихудшие значения F1-score, что происходит из-за недостатка информации о дымовом шлейфе внутри этих крошечных рамок для обучения методам обнаружения.

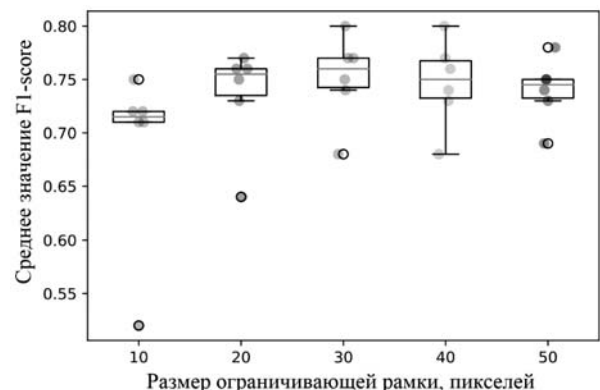


Рис. 13. Изменение оценки F1-Score при увеличении ограничивающей рамки от 10 до 50 пикселей [42]

Наилучшие результаты достигаются при использовании рамок размером 30 и 40 пикселей с наибольшим средним значением F1-score, и эти значения стабилизируются между 30 и 50 пикселями. Когда

ограничивающие рамки увеличиваются более чем на 50 пикселей, перекрытие возрастает, и в процессе обучения учитывается больше нерелевантной информации вокруг дымовых шлейфов, что может запутать алгоритмы изучения интересующих объектов [42].

Для оценки качественных результатов была визуально проанализирована эффективность методов обнаружения дымовых шлейфов в различных условиях, таких как наличие небольших по площади дымовых шлейфов, круглых дымовых шлейфов, не подверженных распространению ветром (почти ортогональное рассеивание), дымовых шлейфов над тонким слоем облаков (что может вызвать путаницу в пиксельной характеристике), облаков в формате шлейфа, небольших плотных облаков и перекрывающихся шлейфов дыма от разных источников [42].

Положительные результаты всех методов варьируют от простого обнаружения с четкими границами дыма и хорошей контрастностью фона (рис. 14) до сложной идентификации при перекрывающемся покрытии дымом и облаками (рис. 15). Более того, по некоторым методам были выполнены очень сложные обнаружения возгораний при умеренном облачном покрытии и множественных дымовых шлейфах или даже такие обнаружения, которые могли вызвать сомнения у операторов-специалистов.

Таким образом, предложен метод глубокого обучения, основанный на обнаружении точек активных пожаров на спутниковых снимках водно-болотных угодий Бразилии. На изображениях базы данных CBERS 4A WFI были оценены шесть методов, в том числе широко используемые нейросети R-CNN и RetinaNet. Поскольку столбы дыма помечались точками вручную, были проведены обширные эксперименты, в результате которых было создано 150 моделей. Показано, что наилучшую способность обнаружения пожара обеспечивали ограничивающие рамки размером 30 и 40 пикселей и что самый высокий показатель F1-score показала варифокальная сеть (VarifocalNet), за которой следуют RetinaNet, SABL и R-CNN. Метод адаптивного отбора обучающей выборки (ATSS) показал наихудшую среднюю производительность.

Предложенный метод глубокого обучения, основанный на обнаружении дымовых шлейфов (или активных очагов возгорания) по данным дистанционного зондирования дает многообещающие результаты и может стать полезным дополнительным подходом к идентификации дымовых шлейфов по другим базам данных о лесных пожарах с более высоким пространственным разрешением [42].

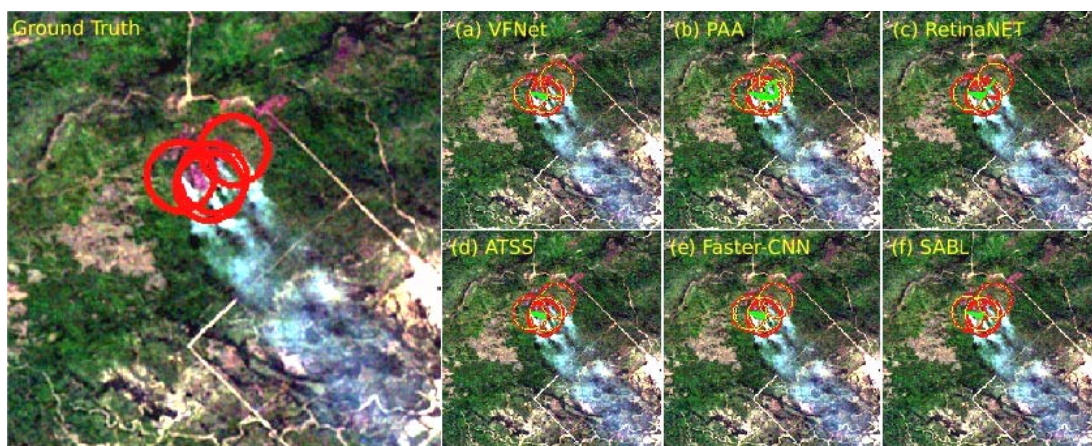


Рис. 14. Простое обнаружение пожаров благодаря хорошему контрасту фона и границ дыма (красные кружки для определения истинности и зеленые кружки для прогнозирования) [42]

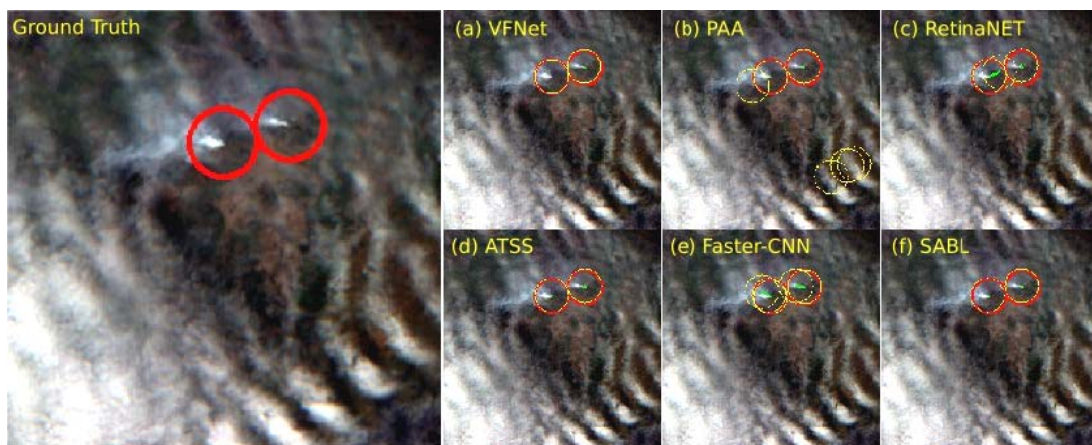


Рис. 15. Затрудненное обнаружение из-за наложения облаков и дыма (для определения истинности – красные кружки, для прогнозирования – зеленые кружки) [42]

АНСАМБЛЕВЫЙ МЕТОД ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Вследствие многообразия форм, текстур и цветов очагов возгорания традиционный метод обработки изображений в значительной степени основан на искусственных характеристиках, которые не всегда применимы ко всем лесным сценариям. Для решения этой проблемы применяется технология глубокого обучения, позволяющая адаптивно изучать и извлекать информацию о лесных пожарах. Однако возможности лишь отдельных обучающих блоков недостаточны для решения сложных задач. Кроме того, отдельный обучающий блок обычно настроен на регистрацию локальной информации, но не может самостоятельно обнаруживать пожары в различных сценариях и игнорирует глобальную информацию, что может привести к ложным оповещениям [128].

Поэтому интеграция различных обучающих блоков может значительно повысить надежность модели и эффективность обнаружения. В этой связи предложен новый метод обнаружения лесных пожаров, основанный на коллективном обучении [128], когда два отдельных детектора объектов YOLOv5 и EfficientDet [109] интегрированы для параллельного обнаружения пожара. Эти два обучающих блока работают синергетически при обнаружении различных типов лесных пожаров, тем самым повышая точность обнаружения. Детекторы объектов настроены на фиксацию только того, что похоже на пламя, и не учитывают все изображение целиком. В этом случае объекты, похожие на пламя, влияют на результаты обнаружения. Для решения этой проблемы в модель включен классификатор изображений EfficientNet [108], роль которого заключается в том, чтобы позволить модели в полной мере использовать преимущества глобальной информации. Окончательные результаты обнаружения выводятся с помощью стратегии принятия решений в соответствии с результатами обучающих блоков,

что значительно повышает точность обнаружения и уменьшает количество ложных оповещений [128].

Чтобы обучающие блоки могли справиться с различными видами лесных пожаров (наземными, пристовальными и верховыми), были собраны изображения из нескольких общедоступных наборов данных о пожарах: BowFire, FD-dataset, ForestryImages и VisiFire. После ручной фильтрации был создан единый интегрированный набор данных о лесных пожарах, содержащий 10581 изображение, в том числе 2976 изображений лесных пожаров и 7605 изображений, не связанных с пожарами [128]. Репрезентативные образцы итоговых наборов данных показаны на рис. 16–18.

YOLOv5 представляет современный детектор объектов, который работает в режиме реального времени и основан на предыдущих версиях YOLOv1–YOLOv4. Постоянные улучшения позволили достичь наилучших результатов в двух официальных наборах данных для обнаружения объектов: Pascal VOC [30] и Microsoft COCO [63]. Сетевая архитектура YOLOv5 показана на рис. 19. YOLOv5 выбран в качестве детектора объектов, поскольку включает в DarkNet межэтапную частную сеть (cross stage partial network – CSPNet) [122] и имеет CSPDarkNet в качестве его основы. Частная сеть CSPNet решает проблемы повторяющейся информации о градиенте в крупномасштабных системах и интегрирует изменения градиента в карту объектов, тем самым уменьшая параметры и количество модельных операций в секунду, что не только обеспечивает скорость и точность вывода, но и сокращает размер модели. В задаче обнаружения лесных пожаров скорость и точность обнаружения являются обязательными, а компактный размер модели определяет эффективность ее вывода на периферийных устройствах с ограниченными ресурсами, и это, во-первых. Во-вторых, в детекторе YOLOv5 применена сеть агрегации последовательностей (PANet) [119] в качестве средства ускорения потока информации.

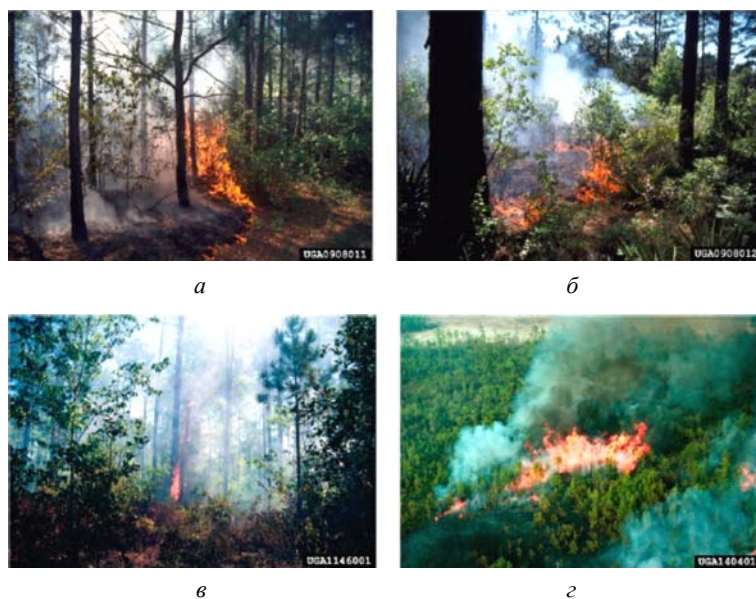


Рис. 16. Репрезентативные изображения лесных пожаров, включающие:

а – наземный пожар-1; б – наземный пожар-2; в – горящий ствол; г – горящий лесной полог [128]

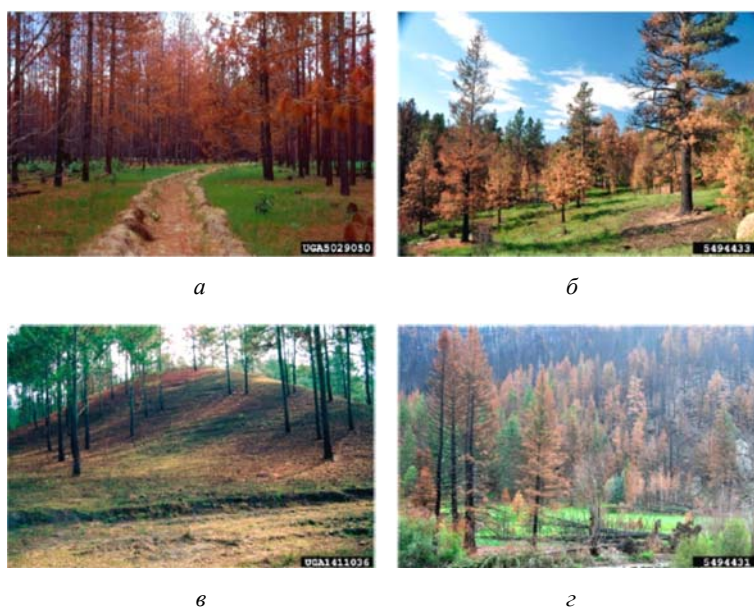


Рис. 17. Типичные изображения обычных насаждений в наборах данных без признаков пожара, включающие обычные лесные сцены (а–г) [128]

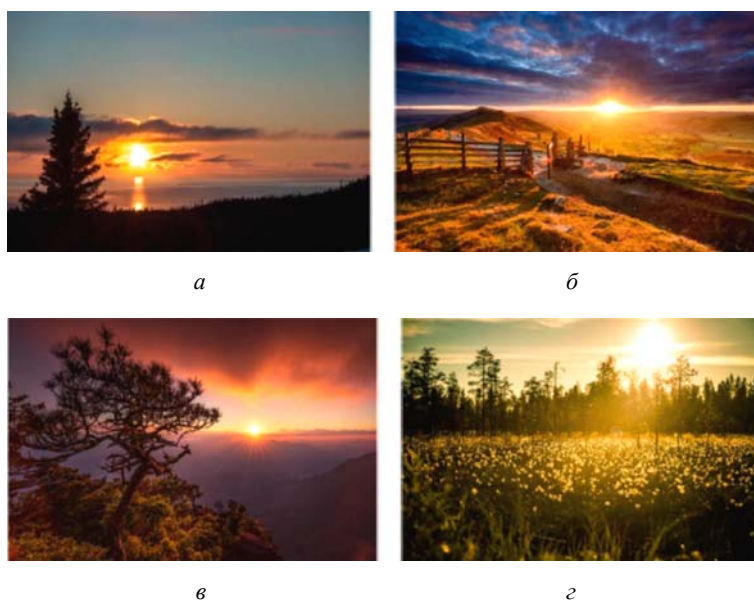


Рис. 18. Репрезентативные изображения (а–г) в наборах данных, не связанные с пожарами, но содержащие огнеподобный объект, например, изображение солнца [128]

Сеть PANet использует новую структуру функциональной пирамидальной сети (new feature pyramid network – FPN) с расширенным восходящим каналом, которая улучшает распространение низкоуровневых функций. В то же время адаптивное объединение объектов, которое связывает сетку объектов и все их уровни, используется для того, чтобы полезная информация на каждом уровне объектов передавалась непосредственно в следующую подсеть. PANet улучшает использование точных сигналов локализации в нижних слоях, что, очевидно, может повысить точность местоположения объекта.

Наконец, в-третьих, головка YOLOv5, а именно слой YOLO, генерирует три различных размера (18×18 , 36×36 , 72×72) карт объектов для достижения многомасштабного прогнозирования, позволяющего модели

обрабатывать малые, средние и крупные объекты. Лесной пожар обычно развивается от мелкомасштабного (наземного) до среднемасштабного (приствольного), и затем до крупномасштабного (верхового). Многомасштабное обнаружение позволяет модели отслеживать изменения размеров в процессе развития пожара [128].

Применено новое семейство детекторов объектов EfficientDet, разработанное Google, которое неизменно обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с известным техническим уровнем при множественных ограничениях по ресурсам. Подобно YOLOv5, EfficientDet также обеспечивает получение замечательных результатов в задачах Pascal VOC и Microsoft COCO и широко используется в реальных приложениях [128]. Сетевая архитектура EfficientDet показана на

рис. 20. В семействе детекторов EfficientDet в качестве основы использована самая современная сеть EfficientNet [108], благодаря чему модель обладает достаточными возможностями для изучения многочисленных особенностей различных лесных пожаров. Кроме того, в качестве основы для простого и быстрого объединения многомасштабных объектов применена усовершенствованная технология PANet, получившая название «двунаправленная функциональная пирамидальная сеть» (bi-directional feature pyramid network – Bi-FPN). В сети Bi-FPN вводятся обучаемые значения весов, позволяющие сети изучать важность различных входных характеристик, и многократно применяется комбинирование многомасштабных характеристик в направлениях сверху-вниз и снизу-вверх. По сравне-

нию с PANet, сеть Bi-FPN обладает лучшими характеристиками при меньшем количестве параметров и сбоев. В то же время, различные стратегии объединения функций предоставляют различную семантическую информацию, что приводит к различным результатам обнаружения. Наконец, подобно EfficientNet, архитектура EfficientDet интегрирует метод комплексного масштабирования, который равномерно масштабирует разрешение, глубину и ширину одновременно для всех магистральных, функциональных сетей и сетей прогнозирования блоков/классов, что обеспечивает максимальную точность и эффективность при ограниченных вычислительных ресурсах. С увеличением количества доступных ресурсов точность будет постоянно повышаться [128].



Рис. 19. Сетевая архитектура YOLOv5, включающая три блока:

(1) – магистраль: CSPDarknet, (2) – горловина: PANet и (3) головка: Yolo Layer.

Данные сначала вводятся в CSPDarknet для извлечения объектов, а затем передаются в PANet для их объединения. Наконец, Yolo Layer выводит результаты обнаружения (класс, оценка, местоположение, размер). BottleNeck – узкое горлышко [128]

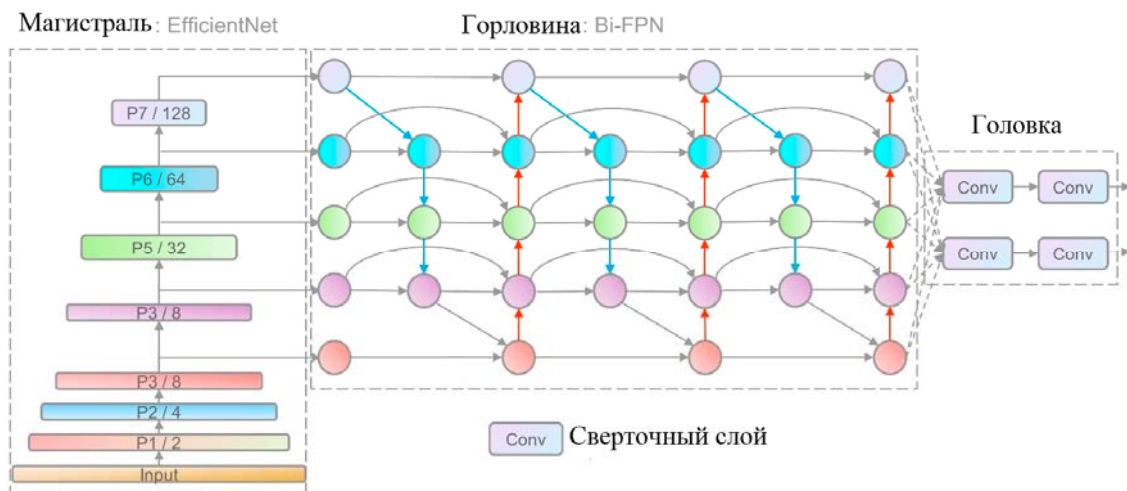


Рис. 20. Сетевая архитектура Efficient Det, включающая три блока:

(1) магистраль: EfficientNet, (2) горловина: Bi-FPN, (3) головка.

Как и в YOLOv5, данные сначала поступают в EfficientNet для извлечения признаков, а затем передаются в Bi-FPN для их объединения. Наконец, блок «головка» выводит результаты обнаружения (класс, оценка, местоположение, размер) [128]

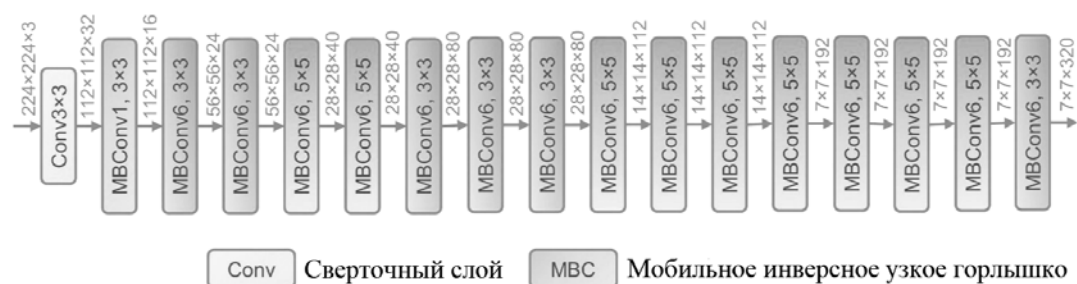


Рис. 21. Сетевая архитектура EfficientNet



Рис. 22. Структура предлагаемой модели.

Три программы глубокого обучения работают параллельно. Два детектора объектов YOLOv5 и EfficientDet интегрированы для выполнения задачи обнаружения объектов, а классификатор EfficientNet отвечает за распознавание того, содержит ли изображение горящие элементы. Окончательные результаты выявления возгораний определяются на основе решений трех программ глубокого обучения [128]

Применена новая эффективная сеть EfficientNet, предложенная Google. Компания применила новую стратегию масштабирования модели, а именно метод комплексного масштабирования, с целью сбалансировать глубину сети, ее ширину и разрешение изображений для повышения точности при ограниченном бюджете ресурсов. Благодаря этому сеть EfficientNet в задаче классификации изображений ImageNet превзошла по точности другие популярные сети, такие как ResNet [41], DenseNet [44] и ResNext [127]. Сетевая архитектура EfficientNet показана на рис. 21. Сеть EfficientNet обеспечивает наилучшее соотношение между точностью и эффективностью в третьем модуле обучения, играющем наиболее важную роль. Она отвечает за изучение всего изображения в процессе обнаружения, а это означает, что его решения напрямую определяют конечные результаты. При этом она должна быть высокоэффективной, иначе это приведет к замедлению работы всей модели [128].

Программа может выводить карту объектов с глубокой семантической информацией после того, как входные данные пройдут через многоуровневую сеть [128].

В реальных задачах по обнаружению лесных пожаров приходится работать с различными их видами, такими как наземные (низовые), приствольные и верховые. Эти пожары различаются по форме, текстуре и даже цвету пламени, что создает большие трудности для отдельных обучаемых модулей при выделении эффективных признаков. Установлено, что YOLOv5 лучше распознает пожары на большой площади, но

иногда пропускает мелкие возгорания. Между тем, несмотря на то, что сеть EfficientDet не чувствительна к пожарам на большой площади, она может выполнять дополнительные функции обнаружения. Поэтому объединение усилий этих двух эффективных обучающих модулей с разными характеристиками для совместной работы по обнаружению повышает точность обнаружения [128].

Другая проблема заключается в том, что возможности детектора объектов ограничены. Он распознает только область пожара, которая является всего лишь локальным рисунком всего изображения, но игнорирует фон. В результате детектор может воспринимать огнеподобные объекты (например, изображение солнца), как пожары, что приводит к ложным оповещениям. Поэтому для управления процессом обнаружения необходима эффективная сеть, которая дает полное представление обо всем изображении.

Чтобы решить две вышеупомянутые проблемы и убедиться в том, что предлагаемая модель устойчива к различным сценариям, для совместного принятия решений были объединены три модуля глубокого обучения (three deep learners) (рис. 22). Первый и второй обучающие модули YOLOv5 и EfficientDet действуют как детекторы объектов, обнаруживая места возгорания на изображениях и генерируя соответствующие блоки. Затем применен алгоритм немаксимального подавления (non-maximum suppression algorithm) [75] для устранения избыточных блоков и сохранения блоков с максимальной степенью достоверности. Третий обучающий модуль сети EfficientNet

действует как бинарный классификатор, отвечающий за изучение всего изображения целиком с целью определить, содержит ли оно горящие объекты. Наконец, результаты обнаружения объектов и классификации изображений передаются в модуль стратегии принятия решений, в котором, результаты обнаружения объектов сохраняются, если считается, что изображение содержит пожароопасные объекты. В противном случае они игнорируются [128].

Модель оценена с использованием критериев Microsoft COCO, которые широко используются в задачах обнаружения объектов. Однако пламя – это особый объект, который отличается формой, текстурой и цветом. Ограничивающая рамка, генерируемая детекторами объектов, может незначительно отличаться от исходной, что влияет на расчет средней точности, но детекторы успешно определяют зоны возгорания. Поэтому для более всесторонней оценки моделей введены два дополнительных показателя, а именно, точность кадра (FA) и частота ложных срабатываний (FPR). Изображение, которое детектор пропускает как пожаро-подобный объект, относится к ложным кадрам (FF), в противном случае – к истинным кадрам (FT). Если детектор распознает какой-либо похожий на пламя объект как пожар, этот сигнал считается ложно положительным (FP), в противном случае – истинно положительным (TP). При этом FA рассчитывается на тестовом наборе, содержащем 476 лесных изображений, а FPR рассчитывается на наборе данных, не связанных с пожарами, содержащем 641 изображение с объектами, похожими на пламя (например, изображение солнца). FA и FPR могут быть рассчитаны как формулы (6) и (7) соответственно:

$$FA = \frac{FT}{FT + FF} \times 100, \quad (6)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TP} \times 100. \quad (7)$$

Для трех блоков: YOLOv5, EfficientDet и EfficientNet были применены различные стратегии обучения. Детекторы объектов YOLOv5 и EfficientDet были обучены на 2381 изображении лесных пожаров и протестированы на 476 их изображениях. Классификатор изображений EfficientNet обучен на 2381 изображении лесных пожаров и 5804 изображениях, не связанных с пожарами, и протестирован на 476 изображениях лесных пожаров и 1160 изображениях, не связанных с пожарами. При этом изображения без пламени содержали обычные изображения и изображения с объектами, похожими на пламя (изображение солнца). Каждая модель создана с помощью Pytorch и обучена на NVIDIA GTX 2080TI [84].

Предложенная модель сопоставлена с типичными одноступенчатыми детекторами объектов. Несмотря на то, что YOLOv5 и EfficientDet являются наиболее мощными детекторами в этой задаче, нельзя игнорировать высокую частоту ложных срабатываний и пропусков обнаружения. Благодаря их интеграции в два обучающих блока все показатели оценки значительно улучшились, но процент ложных срабатываний уве-

личился до 51,6 %, поскольку ложные срабатывания поступают как от YOLOv5, так и от EfficientDet. Под влиянием третьего блока EfficientNet частота ложных срабатываний снижена до 0,3 %. После введения третьего блока некоторые показатели адекватности несколько снизились, поскольку блок EfficientNet ошибочно обрабатывает некоторые изображения пламени как не связанные с пожаром, а затем игнорирует результаты обнаружения объекта. Предполагается, что стоит пожертвовать небольшим снижением средней точности ради существенного снижения частоты ложных срабатываний. Таким образом, предложенная модель с тремя обучающими блоками превосходит другие типичные детекторы объектов по параметрам адекватности. Комплексные усовершенствования повышают производительность модели при обнаружении различных типов лесных пожаров: небольших пожаров, пожаров среднего масштаба, крупномасштабных, наземных, пристовольных, верховых пожаров, а также ночных возгораний [128].

По сравнению с возгораниями неподвижных объектов, лесной пожар является динамичным объектом [70]. Различные формы, размеры, текстуры и цвета лесных пожаров делают развитие пожара сложным процессом и создают большие трудности при его обнаружении. Поэтому важно, чтобы детекторы были чувствительны к различным видам пожаров. После проведенных экспериментов сделан вывод, что ни один детектор не может справиться со всеми видами пожаров, имея соответствующие преимущества и недостатки. Детектор YOLOv5 отлично справляется с обнаружением пожаров на большой площади, но часто пропускает небольшие возгорания. EfficientDet – это более точный детектор по сравнению с YOLOv5; несмотря на то, что он плохо справляется с пожарами на большой площади, он может обнаруживать пожары, которые не удастся обнаружить блоку YOLOv5, а это означает, что он является хорошим «партнером» для последнего. Предложенная модель, эффективно объединяя решения этих двух мощных блоков, повышает эффективность обнаружения на 2,5–10,9 %. Значительное повышение средней точности и среднего быстродействия для малых, средних и крупных пожаров делает модель более чувствительной к изменениям размера очагов возгорания, тем самым повышая эффективность обнаружения различных типов лесных пожаров [128].

Другая проблема заключается в том, что частота ложных срабатываний улучшенной модели (с двумя обучающими блоками) становится выше: с 22,6 % до 51,6 %, поскольку модель объединяет и результаты ложных обнаружений каждого в отдельности. Для решения проблемы использованы 8185 выборки, содержащих 2381 изображение лесного пожара, и 5804 изображения, не связанные с пожаром (содержащие изображения, похожие на огонь, и изображения обычного леса), для обучения третьего блока EfficientNet. Достаточное количество обучающих наборов позволило блоку EfficientNet продемонстрировать хорошую способность различать горящие и пламя-подобные объекты с точностью 99,6 % на 476 изображениях пожаров и с точностью 99,7 % на 676 пламя-

подобных изображениях. С помощью лидирующего блока EfficientNet устранены ложные результаты обнаружения, а частота ложноположительных результатов снижена до 0,3 %. Примечательно, что объединение с EfficientNet снижает показатели адекватности примерно на 1 %, что связано с тем, что блок EfficientNet ошибочно игнорирует два изображения, содержащих среднemasштабные и крупномасштабные объекты пожара [128].

В отношении времени задержки блоки Yolo превосходят EfficientDet и SSD. Благодаря превосходной скорости логического вывода блоки Yolo широко используются в реальных приложениях, но результаты экспериментов показывают, что они не способны обеспечить удовлетворительную производительность в задачах обнаружения лесных пожаров. Задержка блока EfficientDet составляет 65,6 мс, что более чем вдвое больше, чем у YoloV5 (28,0 мс), но EfficientDet превосходит YoloV5 более чем на 5 % по быстродействию обнаружения. Эти три функции YoloV5 (28,0 мс), EfficientDet (65,6 мс) и EfficientNet (31,3 мс) были объединены параллельно, чтобы убедиться, что предложенная модель может достичь наилучшей производительности без каких-либо дополнительных задержек. Конечная задержка модели (по совокупности трех обучающих блоков) составляет 66,8 мс, что показывает, что был достигнут компромисс между производительностью обнаружения и эффективностью, и что модель применима для решения задач обнаружения пожаров в режиме реального времени. Результаты экспериментов показали, что по сравнению с другими популярными детекторами объектов предложенная модель обеспечивает наилучшее соотношение между средней точностью, средним откликом, частотой ложных срабатываний, точностью кадра и задержкой. Значительные улучшения позволяют модели эффективно работать в реальных лесных условиях [128].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с изменением климата по всему миру учащаются лесные пожары, которые не только наносят серьезный экономический ущерб и разрушают экологическую среду, но и представляют большую угрозу жизни людей. Обнаружение пожаров на ранних стадиях является эффективным способом минимизировать причиняемый ими ущерб. Современные разработки в области глубокого машинного обучения предоставляют новые возможности обнаружения лесных пожаров. В обзоре показано современное состояние проблемы глубокого обучения путем краткого перечня публикаций последних лет, а также дано более детальное описание алгоритмов глубокого обучения на примере некоторых продвинутых исследований. В частности, показаны возможности обнаружения лесных пожаров с помощью нейросетей и цифровой колориметрии, описана интеллектуальная модель глубокого обучения при обнаружении лесных пожаров с помощью встроенных датчиков, даны алгоритм обнаружения лесных пожаров с беспилотных летательных аппаратов и с использованием спутниковых систем дистанционного зондирования, описан ансамблевый метод глубокого обучения при обнаружении лесных пожаров.

Авторы благодарят Николая Ивановича Плюху за техническую помощь при подготовке статьи.

The authors would like to thank Nikolai Ivanovich Plyukha for his technical assistance in preparing the article.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Almasoud A. S. Intelligent deep learning enabled wild forest fire detection system // *Computer Systems Science & Engineering*. 2023. Vol. 44 (2). P. 1485–1498.
2. Angayarkkani K., Radhakrishnan N. Efficient forest fire detection system: A spatial data mining and image processing based approach // *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2009. Vol. 9 (3). P. 100–107.
3. Angayarkkani K., Radhakrishnan N. An intelligent system for effective forest fire detection using spatial data // *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2010. Vol. 7(1). P. 202–208.
4. Aslan S., Gudukbay U., Toreyin B. U. et al. Early wildfire smoke detection based on motion-based geometric image transformation and deep convolutional generative adversarial networks // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Proceedings*, 2019. P. 8315–8319.
5. Azami M. H., Orger N. C., Schulz V. H. et al. Earth observation mission of a 6U CubeSat with a 5-meter resolution for wildfire image classification using convolution neural network approach // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 1874.
6. Ba R., Chen C., Yuan J. et al. SmokeNet: Satellite smoke scene detection using convolutional neural network with spatial and channel-wise attention // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Article 1702.
7. Bahrepour M., Meratnia N., Havinga P. J. M. Sensor fusion-based event detection in wireless sensor networks // *6th Annual International Conference: Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services, MobiQuitous*, 2009. P. 1–8.
8. Bahrepour M., Meratnia N., Poel M. et al. Distributed event detection in wireless sensor networks for disaster management // *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, 2010. P. 507–512.
9. Barmpoutis P., Papaioannou P., Dimitropoulos K. et al. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing // *Sensors*. 2020. Vol. 20 (22). Article 6442.
10. Bolourchi P., Uysal S. Forest fire detection in wireless sensor network using fuzzy logic // *Fifth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, IEEE*, 2013. P. 83–87.
11. Borowiec M. L., Dikow R. B., Frandsen P. B. et al. Deep learning as a tool for ecology and evolution // *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. Vol. 13 (8). P. 1640–1660.
12. Broomhead D. S., Lowe D. Multivariate functional interpolation and adaptive networks // *Complex Systems*. 1988. Vol. 2. P. 321–355.
13. Byun Y. G., Huh Y., Yu K. et al. Evaluation of graph-based analysis for forest fire detections //

Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. 2007. Vol. 10. P. 617–622.

14. Canonizado J. A. Simulation of selective forest management regimes // *The Malaysian Forester*. 1978. Vol. 41 (2). P. 128–142.

15. Çelik T., Özkaramanlı H., Demirel H. Fire and smoke detection without sensors: Image processing based approach // *Proceedings of the IEEE 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007)*, Poznan, Poland, 2007. P. 1794–1798.

16. Chaitanya P. S., Reddy K. V. N., Madhavi G. Effective search of color-spatial image using semantic indexing // *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications*. 2012. Vol. 2. P. 9–19.

17. Chasovskikh V. P., Usoltsev V. A., Koch E. V. Natural and artificial intelligence as a tool for data transformation: monograph. Yekaterinburg: USUE, 2025. 352 p. (In Russian). (https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/14231/1/Chasovskikh_25.pdf).

18. Chen T. H., Wu P. H., Chiou Y. C. An early fire-detection method based on image processing // *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2004)*, Singapore, 2004. P. 1707–1710.

19. Chen R., Luo Y., Alsharif M. R. Forest fire detection algorithm based on digital image // *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2013. Vol. 18 (2). P. 176–185.

20. Chen Y., Zhang Y., Xin J. et al. A UAV-based forest fire detection algorithm using convolutional neural network // *Proceedings of the 2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan, China, 25–27 July 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018. P. 10305–10310.

21. Chen K., Wang J., Pang J. et al. MMDetection: Open MMLab detection toolbox and benchmark // *arXiv*, 2019. Article 1906.07155.

22. Chen H., Zhang Q., Luo J. et al. An enhanced bacterial foraging optimization and its application for training kernel extreme learning machine // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 86 (11). Article 105884.

23. Chen Y., Fang R., Liang T. et al. Stock price forecast based on CNN-BiLSTM-ECA model // *Scientific Programming*. 2021. Vol. 2021 (1). P. 1–20.

24. Chino D. Y., Avalhais L. P., Rodrigues J. F. et al. BowFire: Detection of fire in still images by integrating pixel color and texture analysis // *Proceedings of the 28th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images*. Salvador, Brazil, 26–29 August, 2015. P. 95–102.

25. Chopde A., Magon A., Bhatkar S. Forest fire detection and prediction from image processing using RCNN // *Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*, 2022. P. 10–12.

26. Dai J., Qi H., Xiong Y. et al. Deformable convolutional networks // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, Venice, Italy, 22–29 October, 2017. P. 764–773.

27. Deng J., Dong W., Socher R. et al. ImageNet: A large-scale hierarchical image database // *Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami, FL, USA, 20–25 June 2009; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2009. P. 248–255.

28. Duda R. O., Hart P. E. Pattern classification and scene analysis. New York: John Wiley & Sons, 1973. 482 p.

29. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. et al. The pascal visual object classes (voc) challenge // *International Journal of Computer Vision*. 2010. Vol. 88. P. 303–338.

30. Everingham M., Eslami S. A., Van Gool L. et al. The pascal visual object classes challenge: A retrospective // *International Journal of Computer Vision*. 2015. Vol. 111. P. 98–136.

31. Fayyad U. M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. From data mining to knowledge discovery: An overview // *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Menlo Park: AAAI Press, 1996. P. 1–34.

32. Fernandes A. M., Utkin A. B., Lavrov A. V. et al. Development of neural network committee machines for automatic forest fire detection using lidar // *Pattern Recognition*. 2004. Vol. 37. P. 2039–2047.

33. Filonenko A., Kurnianggoro L., Jo K. H. Smoke detection on video sequences using convolutional and recurrent neural networks // *Proceedings of the Computational Collective Intelligence (ICCCI 2017)*, Nicosia, Cyprus, 27–29 September, 2017. P. 558–566.

34. Ghali R., Akhloufi M. A. Deep learning approaches for wildland fires using satellite remote sensing data: Detection, mapping, and prediction // *Fire*. 2023. Vol. 6. Article 192.

35. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O. et al. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 87. P. 273–282.

36. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 178. P. 31–41.

37. González J. R., Palahí M., Trasobares A. et al. A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain) // *Annals of Forest Science*. 2006. Vol. 63. P. 169–176.

38. Goulding C. J. Validation of growth models used in forest management // *New Zealand Journal of Forestry*. 1979. Vol. 24 (1). P. 108–124.

39. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // *Advances in Information Retrieval*. 2005. Vol. 3408. P. 345–359.

40. Gupta T., Liu H., Bhanu B. Early wildfire smoke detection in videos // *25th International Conference on Pattern Recognition*. Milan, Italy, January 10–15, 2021. P. 8523–8530.

41. He K., Zhang X., Ren S. et al. Deep residual learning for image recognition // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016)*, Las Vegas, NV, USA, 26 June–1 July, 2016. P. 770–778.

42. Higa L., Marcato J. Jr., Rodrigues T. et al. Active fire mapping on Brazilian Pantanal based on deep learning and CBERS 04A imagery // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 688.

43. Hong Z., Tang Z., Pan H. et al. Active fire detection using a novel convolutional neural network

based on Himawari-8 satellite images // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. Article 102.

44. Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L. et al. Densely connected convolutional networks // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017)*, Honolulu, Hawaii, 21–26 July, 2017. P. 4700–4708.

45. Ivanova N., Ivanova S., Ivanchikov S. et al. Evaluating the effectiveness of Google Scholar, ScienceDirect, Mendeley, and eLibrary for interdisciplinary research // *South-East European Forestry*. 2025. Vol. 16(2). P. 227–238.

46. Jiao Z., Zhang Y., Xin J. et al. A deep learning based forest fire detection approach using UAV and YOLOv3 // *Proceedings of the 2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)*, Shenyang, China, 22–26 July 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019. P. 1–5.

47. Jiao Z., Zhang Y., Mu L. et al. A YOLOv3-based learning strategy for real-time UAV-based forest fire detection // *2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 2020. P. 4963–4967.

48. Kaabi R., Sayadi M., Bouchouicha M. et al. Early smoke detection of forest wildfire video using deep belief network // *4th International Conference on Advanced Technologies For Signal and Image Processing*, Sousse, Tunisia, March 21–24, 2018. P. 1–6.

49. Kalaivani V., Chanthiya P. A novel custom optimized convolutional neural network for a satellite image by using forest fire detection // *Earth Science Informatics*. 2022. Vol. 15. P. 1285–1295.

50. Kang D., Kim E., Moon P. et al. Design and analysis of flame signal detection with the combination of UV/IR sensors // *Journal of the Korea Society of Computer and Information*. 2013. Vol. 14. P. 45–51.

51. Kang Y., Jang E., Im J. et al. A deep learning model using geostationary satellite data for forest fire detection with reduced detection latency // *GIScience & Remote Sensing*. 2022. Vol. 59. P. 2019–2035.

52. Kansal A., Singh Y., Kumar N. et al. Detection of forest fires using machine learning technique: A Perspective // *Third International Conference on Image Information Processing*, Wagnaghat, India, 21–24 December, 2015. P. 241–246.

53. Ke W., Zhang T., Huang Z. et al. Multiple anchor learning for visual object detection // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, WA, USA, 14–19 June, 2020. P. 10206–10215.

54. Kilaru S. Analytical models for collaborative autonomous mobile robot solutions in fulfillment centers // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. Vol. 91. P. 438–457.

55. Kim B., Lee J. A video-based fire detection using deep learning models // *Applied Science*. 2019. Vol. 9. Article 2862.

56. Kim K., Lee H. S. Probabilistic anchor assignment with iou prediction for object detection // *Proceedings of the Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference*, Glasgow, UK, 23–28 August 2020; *Proceedings, Part XXV 16*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020. P. 355–371.

57. Kinaneva D., Hristov G., Raychev J. et al. Early forest fire detection using drones and artificial intelligence // *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croatia, 2019. P. 1060–1065.

58. Kumari P. L., Abid Z., Jamberi K. et al. Robust forest fire detection using deep convolutional neural networks // *International Journal of Scientific Methods in Computational Science and Engineering*. 2024. Vol. 1(1). P. 49–57.

59. Lafarge F., Descombes X., Zerubia J. Forest fire detection based on Gaussian field analysis // *Proceedings of European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Poznan, Poland, September, 2007. P. 447–451.

60. Lee W., Kim S., Lee Y. T. et al. Deep neural networks for wild fire detection with unmanned aerial vehicle // *Proceedings of the 2017 IEEE international conference on consumer electronics (ICCE)*, Taipei, Taiwan, 12–14 June 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017. P. 252–253.

61. Lee Y., Shim J. False positive decremented research for fire and smoke detection in surveillance camera using spatial and temporal features based on deep learning // *Electronics*. 2019. Vol. 8. Article 1167.

62. Li H., Wu Z., Zhu C. et al. Learning from noisy anchors for one-stage object detection // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, WA, USA, 14–19 June, 2020. P. 10588–10597.

63. Lin T.Y., Maire M., Belongie S. et al. Microsoft COCO: Common objects in context // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, Zurich, Switzerland, 6–12 September 2014; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014. P. 740–755.

64. Lin T.Y., Dollár P., Girshick R. et al. Feature pyramid networks for object detection // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Honolulu, HI, USA, 21–26 July, 2017a. P. 2117–2125.

65. Lin T.Y., Goyal P., Girshick R. et al. Focal loss for dense object detection // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, Venice, Italy, 22–29 October, 2017b. P. 2980–2988.

66. Liu W., Anguelov D., Erhan D. et al. SSD: Single shot multibox detector // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV 2016)*, Amsterdam, The Netherlands, 8–16 October, 2016. P. 21–37.

67. Liu Y., Shao Z., Hoffmann N. Global attention mechanism: Retain information to enhance channel-spatial interactions // *ArXiv*, 2021. Article 2112.05561.

68. Maiellaro P. A., Cozzolongo R., Marino P. Artificial neural networks for the prediction of response to interferon plus ribavirin treatment in patients with chronic hepatitis C // *Current Pharmaceutical Design*. 2004. Vol. 10 (17). P. 2101–2109.

69. Mao W., Wang W., Dou Z. et al. Fire recognition based on multi-channel convolutional neural network // *Fire Technology*. 2018. Vol. 54 (2). P. 531–554.

70. Merino L., Caballero F., Martínez-de-Dios J. R. et al. An unmanned aircraft system for automatic forest fire

monitoring and measurement // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2012. Vol. 65. P. 533–548.

71. Mittal A., Sharma G., Aggarwal R. Forest fire detection through various machine learning techniques using mobile agent in WSN // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 3 (6). P. 702–706.

72. Mohindru P., Khanna V., Singh R. Forest fire detection: Various approaches // *International Journal of Emerging Science and Engineering*. 2013. Vol. 1 (6). P. 68–70.

73. Moody J., Darken C. J. Fast learning in networks of locally tuned processing units // *Neural Computation*. 1989. Vol. 1 (2). P. 281–294.

74. Naresh, Himasri B., Sowmya N. et al. Forest fire detection using convolutional neural networks // *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2024. Vol. 11 (10). P. 9–16.

75. Neubeck A., Van Gool L. Efficient non-maximum suppression // *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2006)*, Hong Kong, China, 20–24 August, 2006. P. 850–855.

76. Oladimeji M. O., Turkey M., Ghavami M. et al. A new approach for event detection using k-means clustering and neural networks // *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2015. P. 1–5.

77. Ollero A., Martinez de Dios J. R., Arrue B. C. Integrated systems for early forest-fire detection // *III International Conference on Forest Fire Research, 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Vol. 2. Luso, 16/20 November, 1998. P. 1977–1988.

78. Pan H., Badawi D., Cetin A. E. Computationally efficient wildfire detection method using a deep convolutional network pruned via Fourier analysis // *Sensors*. 2020a. Vol. 20. Article 2891.

79. Pan H., Badawi D., Zhang X. et al. Additive neural network for forest fire detection // *Signal Image and Video Processing*. 2020b. Vol. 14 (4). P. 675–682.

80. Pande V., Elmannai W., Elleithy K. Optimized algorithm for fire detection over WSN using Micaz motes // *25th international conference on computers and their applications in industry and engineering (CAINE-2012)*, New Orleans, Louisiana, USA, 2012. P. 1–6.

81. Pande V., Elmannai W., Elleithy K. Classification and detection of fire on WSN using IMB400 multimedia sensor board // *IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference*. Farmingdale State College, State University of New York, 2013. P. 1–6.

82. Pandita A., Upadhyay P. K. Reducing energy consumption of nodes using force based auto deployment of wireless sensor networks // *International Conference and Workshop on Computing and Communication (IEMCON)*, 2015. P. 1–7.

83. Passino K. M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control // *IEEE Control Systems Magazine*. 2002. Vol. 22 (3). P. 52–67.

84. Paszke A., Gross S., Massa F. et al. Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library // *Proceedings of the Neural Information Processing Systems (NIPS 2019)*, Vancouver, BC, Canada, 8–14 December, 2019. P. 8026–8037.

85. Pavani V., Lakshmi S. K., Vyshnavi P. A. et al. Students community portal using machine learning // *IEEE Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*. Tuticorin, India, 2023. P. 1109–1113.

86. Poggio T., Girosi F. Regularization algorithms for learning that are equivalent to multilayer networks // *Science*. 1990. Vol. 247. P. 978–982.

87. Priya R. S., Vani K. Deep learning based forest fire classification and detection in satellite images // *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Computing*, 2019. P. 61–65.

88. Rauste Y. Forest fire detection with satellites for forest fire control // *Proceedings of the XVIII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 1996. Vol. 31 (B7). P. 584–588.

89. Rawat W., Wang Z. Deep convolutional neural networks for image classification: a comprehensive review // *Neural Computation*. 2017. Vol. 29 (9). P. 2352–2449.

90. Reis H. C., Turk V. Detection of forest fire using deep convolutional neural networks with transfer learning approach // *Applied Soft Computing*. 2023. Vol. 143. Article 110362.

91. Ren S., He K., Girshick R. et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015. Vol. 28. P. 91–99.

92. Ren S., He K., Girshick R. et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2016. Vol. 39. P. 1137–1149.

93. Sahin Y. G. Animals as mobile biological sensors for forest fire detection // *Sensors*. 2007. Vol. 7. P. 3084–3099.

94. Sapiro G. Chromaticity diffusion // *Proceedings of International Conference on Image Processing 2000*. Vol. 2. Vancouver, BC, Canada, 2000. P. 784–787.

95. Sathik M. M., Mohamed M. S., Balasubramanian A. Fire detection using support vector machine in wireless sensor network and rescue using pervasive devices // *International Journal of Advanced Networking and Applications*. 2010. Vol. 2 (2). P. 636–639.

96. Sathya K., Rajalakshmi M. RDA-CNN: Enhanced super resolution method for rice plant disease classification // *Computer Systems Science and Engineering*. 2022. Vol. 42(1). P. 33–47.

97. Schneider T. W., Alder D. Die Behandlung von Kiefernbeständen in Nordwestdeutschland anhand eines systemorientierten Simulationsmodells // *Forstarchiv*. 1979. No. 9. P. 184–195; No. 10. P. 220–223.

98. Sekkas O., Hadjieftymiades S., Zervas E. A multi-level data fusion approach for early fire detection // *2nd International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, INCoS 2010*, Thessaloniki, Greece, 24–26 November, 2010. P. 1–5.

99. Seydi S. T., Saeidi V., Kalantar B. et al. Fire-Net: A deep learning framework for active forest fire detection // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14 (9). Article 2214.

100. Shanmuganathan S. From data mining and knowledge discovery to big data analytics and knowledge

extraction for applications in science // *Journal of Computer Science*. 2014. Vol. 10 (12). P. 2658–2665.

101. Shekhar S., Zhang P., Huang Y. et al. Trends in spatial data mining. In: Kargupta H., Joshi A. (eds.). *Data Mining: Next Generation Challenges and Future Directions*. AAAI/MIT Press, 2003. P. 357–380.

102. Sirisha A., Chaitanya K., Sesha K. V. et al. Intrusion detection models using supervised and unsupervised algorithms – A comparative estimation // *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. Vol. 11(18). P. 51–58.

103. Smith T., Guild J. The C.I.E. colorimetric standards and their use // *Transactions of the Optical Society*. 1931. Vol. 33 (3). P. 73–134.

104. Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation, AI 2006. In: A. Sattar, B.-H. Kang (eds.). *Advances in Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 1015–1021.

105. Solomon A. M., Delcourt H. R., West D. C. et al. Testing a simulation model for reconstruction of prehistoric forest-stand dynamics // *Quaternary Research*. 1980. Vol. 14 (3). P. 275–293.

106. Stojanova D., Panov P., Kobler A. et al. Learning to predict forest fires with different data mining techniques // *Conference on Data Mining and Data Warehouses (SiKDD 2006)*, Ljubljana, Slovenia, 2006. P. 255–258.

107. Tadesse T., Brown J. F., Hayes M. J. A new approach for predicting drought-related vegetation stress: Integrating satellite, climate, and biophysical data over the U.S. central plains. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. Vol. 59 (4). P. 244–253.

108. Tan M., Le Q. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // *Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML 2019)*, Long Beach, CA, USA, 9–15 June, 2019. P. 6105–6114.

109. Tan M., Pang R., Le Q. V. EfficientDet: Scalable and efficient object detection // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020)*, Washington, DC, USA, 14–19 June, 2020. P. 10781–10790.

110. Tay S. C., Hsu W., Lim K. H. Spatial data mining: Clustering of hot spots and pattern recognition // *Proceedings. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 6, 2003. P. 3685–3687.

111. Teng Z., Kim J. H., Kang D. J. Fire detection based on hidden Markov models // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2010. Vol. 8. P. 822–830.

112. Tian Z., Shen C., Chen H. et al. Fcos: Fully convolutional one-stage object detection // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, Seoul, Korea, 27–28 October, 2019. P. 9627–9636.

113. Toledo-Castro J., Caballero-Gil P., Rodríguez-Pérez N. et al. Forest fire prevention, detection, and fighting based on fuzzy logic and wireless sensor networks // *Hindawi Complexity*. 2018. Vol. 1. Article ID1639715.

114. Töreyn B. U., Dedeoglu Y., Güdükbay U. et al. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27. P. 49–58.

115. Tou J. T., Gonzalez R. C. *Pattern recognition principles*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 377 p.

116. Trivedi K., Srivastava A. K. An energy efficient framework for detection and monitoring of forest fire using mobile agent in wireless sensor networks // *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, 2014. P. 393–422.

117. Vani K. Deep learning based forest fire classification and detection in satellite images // *Proceedings of the 2019 11th International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, Chennai, India, 8–20 December 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019. P. 61–65.

118. Venkateswaran N., Umadevi K. Hybridized wrapper filter using deep neural network for intrusion detection // *Computer Systems Science and Engineering*. 2022. Vol. 42 (1). P. 1–14.

119. Wang K., Liew J. H., Zou Y. et al. PANet: Few-shot image semantic segmentation with prototype alignment // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2019)*, Seoul, Korea, 20–26 October, 2019. P. 9197–9206.

120. Wang J., Zhang W., Cao Y. et al. Side-aware boundary localization for more precise object detection // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, Glasgow, UK, 23–28 August 2020; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020a. P. 403–419.

121. Wang Y., Liu X., Li M. et al. Deep convolution and correlated manifold embedded distribution alignment for forest fire smoke prediction // *Computing and Informatics*. 2020b. Vol. 39. P. 318–339.

122. Wang C. Y., Mark Liao H. Y., Wu Y. H. et al. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020)*, Washington, DC, USA, 14–19 June, 2020c. P. 390–391.

123. Wang G., Li J., Zheng Y. et al. Forest smoke detection based on deep learning and background modeling // *IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems*. 2020d. P. 112–116.

124. Wei X., Wu S., Wang Y. Forest fire smoke detection model based on deep convolution long short-term memory network // *Journal of Computer Applications*. 2019. Vol. 39. P. 2883–2887.

125. Wu S., Zhang L. Using popular object detection methods for real time forest fire detection // *Proceedings of the 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2018)*, Hangzhou, China, 8–9 December, 2018. P. 280–284.

126. Wu S., Guo C., Yang J. Using PCA and one-stage detectors for real-time forest fire detection // *Journal of Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 383–387.

127. Xie S., Girshick R., Dollár P. et al. Aggregated residual transformations for deep neural networks // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision*

and Pattern Recognition (CVPR 2016), Las Vegas, NV, USA, 26 June–1 July, 2016. P. 1492–1500.

128. Xu R., Lin H., Lu K. et al. A forest fire detection system based on ensemble learning // *Forests*. 2021. Vol. 12. Article 217.

129. Yuan C., Zhang Y., Liu Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques // *Canadian Journal of Forest Research*. 2015. Vol. 45 (7). P. 783–792.

130. Zhang F., Zhao P., Thiyaalingam J. et al. Terrain-influenced incremental watchtower expansion for wildfire detection // *Science of the Total Environment*. 2018a. Vol. 654. P. 164–176.

131. Zhang Q., Lin G., Zhang Y. et al. Wildland forest fire smoke detection based on faster R-CNN using synthetic smoke images // *Procedia Engineering*. 2018b. Vol. 211 (3). P. 441–446.

132. Zhang X., Wan F., Liu C. et al. FreeAnchor: Learning to match anchors for visual object detection // arXiv 2019, arXiv:1909.02466.

133. Zhang S., Chi C., Yao Y. et al. Bridging the gap between anchor-based and anchor-free detection via adaptive training sample selection // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, WA, USA, 14–19 June, 2020. P. 9759–9768.

134. Zhang H., Wang Y., Dayoub F. et al. VarifocalNet: An *iou*-aware dense object detector // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, New Orleans, LA, USA, 19–24 June, 2021. P. 8514–8523.

135. Zhao L., Liu J., Peters S. et al. Investigating the impact of using IR bands on early fire smoke detection from Landsat imagery with a lightweight CNN model // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 3047.

© Усольцев В. А., Часовских В. П.. 2026

Поступила в редакцию 04.02.2026

Принята к печати 27.04.2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ КОРЕННОГО ЕЛОВОГО И ПРОИЗВОДНОГО ОСИНОВОГО НАСАЖДЕНИЙ

П. А. Тарасов¹, А. В. Тарасова²

¹Пенсионер

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: avyatar@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований лесных подстилок коренного ельника и производного осинника, последний из которых сформировался в результате антропогенной смены пород. Работа заключалась в сравнительном анализе основных параметров рассматриваемых подстилок (мощности, плотности, запаса, фракционного состава) для выявления особенностей их накопления и разложения, характеризующих интенсивность биологического круговорота. В конечном итоге, это позволит дать оценку влияния на ход почвообразования антропогенной смены пород, что, в связи с активным проявлением данного процесса, приобретает особую актуальность.

Обобщающий анализ полученных результатов показал, что в производном осиннике биологический круговорот веществ идет активнее. Благодаря этому происходит более быстрый возврат в почву элементов питания и увеличение их содержания, что при обратной смене пород будет способствовать успешному развитию хозяйственно ценных хвойных древостоев.

Ключевые слова: коренной разнотравно-зеленомошным ельник, производный разнотравный осинник, лесная подстилка и ее основные характеристики, биологический круговорот веществ.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 52–59

COMPARATIVE STUDIES OF THE FOREST LITTER OF NATIVE SPRUCE AND DERIVED ASPEN PLANTINGS

P. A. Tarasov¹, A. V. Tarasova²

¹Retired man

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: avyatar@yandex.ru

Abstract. The results of studies of forest litters of indigenous spruce and aspen forest derivative are presented, the last of which was formed as a result of anthropogenic change of species. The work included a comparative analysis of the main parameters of the considered litter (power, density, stock, fractional composition) to identify the features of their accumulation and decomposition, characterizing the intensity of the biological cycle. Ultimately, this will make it possible to assess the impact of anthropogenic changes in rocks on the course of soil formation, which, due to the active manifestation of this process, acquires particular relevance.

A generalizing analysis of the results obtained showed that biological circulation of substances is more active in the derived aspen. Thanks to this, there is a faster return of nutrients to the soil and an increase in their content, which, with the reverse change of species, will contribute to the successful development of economically valuable coniferous stands.

Keywords: native herb-green-moss spruce, derived herb aspen-nick, forest litter and its main characteristics, biological cycle of substances.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем лесного почвоведения и лесоводства является изучение взаимосвязи между лесной растительностью и почвами в целях научного обоснования лесохозяйственных мероприятий. При этом в связи с активным возобновлением осины на еловых вырубках в районе исследований особую

актуальность приобретает оценка влияния данного процесса на свойства почв [Тарасов и др., 2015].

Ранее подобная смена хвойных пород мелколиственными считалась краткосрочной или временной [Мелехов, 1980; Белов, 1983]. Однако в настоящее время, когда лесное хозяйство ослаблено новыми формами его ведения, а позиции лесозаготовителей

усилились, данная антропогенная смена пород приобретает повсеместный и длительный характер [Втюрина, Соколов, 2009]. При этом вследствие существенных различий влияния хвойных и мелколиственных пород на почвообразование [Ткаченко, 1939; Зонн, 1954; Похитон, 1958; Абатуров, 1961; Тарасов, 2012], данный процесс не может не сказаться на свойствах формирующихся почв.

В данной работе представлен анализ результатов исследований лесной подстилки коренных ельников и производных осинников, которая играет исключительно важную роль не только в биологическом круговороте веществ, составляющем основу почвообразования, но и в росте и производительности леса [Роде, 1954; Ремезов, 1956]. Это обусловлено множеством различных функций подстилки, которые принято делить на три группы – системообразующие, биогеохимические, интегральные [Карпачевский, 1983; Богатырев, 1996]. Столь большая ее функциональная значимость была отмечена еще основоположниками лесоводственной науки. Так, В. Н. Сукачев (1938) называл лесную подстилку зеркалом биоценоза, М. Е. Ткаченко (1952) отводил ей главную роль в материально-энергетическом обмене между древостоем и почвой, а Г. Ф. Морозов (1949) вообще считал ее одной из функций леса.

За последние десятилетия под влиянием идей корифея лесного почвоведения С. В. Зонна (1954) достигнуты заметные успехи в исследованиях вопросов, касающихся классификации, процессов образования и индикаторной значимости подстилок [Ведрова, 1980; Карпачевский, 1981, 1983; Сапожников, 1984, 1987; Богатырев, 1996].

Так, в целом ряде работ [Карпачевский, 1983; Богатырев, 1987; Попова, Горбачев, 1988; Ведрова, 1997; Кузнецов, 2010; Ведрова, Решетникова, 2014; Тарасов и др., 2015] отмечено, что накопление и последующие превращения лесной подстилки, которые являются важнейшим биогеоценотическим процессом, зависят от количества, состава и времени поступления опада, а также скорости его разложения, определяемой климатическим, почвенными и биотическим факторами. При этом особенности формирования подстилки в значительной степени характеризуются ее основными параметрами – мощностью, запасом, фракционным составом и строением. Данные характеристики позволяют судить об интенсивности и направленности биологического круговорота веществ, являющегося ведущим процессом в почвообразовании.

Мощность подстилки – это ее толщина, составляющая в разных лесорастительных условиях от 1 до 15 см [Карпачевский, 1981]. Данный показатель отличается невысокой точностью определения и некоторым субъективизмом, что обуславливает предпочтительность другого параметра подстилки – ее запаса [Ведрова, Решетникова, 2014]. Он представляет собой массу сухой подстилки на единице площади, который также весьма динамичен и зависит от лесорастительных условий. В совокупности с фракционным составом подстилки ее запас является индикатором состояния почвы и всего биогеоценоза и характера происходящем в нем изменений.

Один из наиболее существенных параметров подстилки – ее строение, т. е. совокупность слоев (или подгоризонтов), на которые она подразделяется. В почвенной номенклатуре лесную подстилку обозначают индексом О и обычно выделяют в ней три слоя, различающиеся мощностью, запасом, фракционным составом. В настоящее время данные слои обозначаются индексами L, F и H (соответственно, по первым буквам немецких слов Laub – листва; Fermentation – ферментация, разложение; Humus – гумус, перегной) [Ведрова, 1997].

Первый слой L сложен опадом прошлого (осень) и этого (весна) годов и состоит из листьев и хвои, которые хорошо сохранили свою форму и легко диагностируются. В то же время, они потеряли пигменты (хлорофилл, антоцианы и пр.) и окрашены в серовато-бурые тона, иногда в светло- и темно-бурые. Слой L сравнительно легко отделяется от остальной подстилки.

Второй слой F представляет собой бурую смесь из обломков хвои, листьев, веток, трухи, жилок от выеденных беспозвоночными животными листьев и другого органического материала. Часто здесь хорошо заметны гифы грибов и корни растений. В этом слое максимальное скопление беспозвоночных животных. Во влажном состоянии он представляет собой механически сцепленную массу, а в сухие периоды распадается на отдельные фрагменты. По мощности и запасам обычно составляет наибольшую долю подстилки.

Третий слой H представляет собой темно-бурый, во влажном состоянии – почти черный перегнойный материал. В нем нет различимых остатков растений. Сыпучий в сухом состоянии, во влажном состоянии он размазывается пальцами до однородной массы. В зарубежной литературе его называют слоем гумификации.

По мнению Э. Ф. Ведровой и Т. В. Решетниковой (2014), изучавшим особенности формирования подстилки в культурах основных лесообразующих пород Сибири, растительные остатки в процессе биохимической трансформации проходят все стадии разложения, последовательно перемещаясь из первого слоя в третий (Ведрова, 1997).

Таким образом, строение в значительной степени характеризует условия разложения подстилок, на основании чего Л. О. Карпачевский (1983) сгруппировал их в три ряда:

1) есть только слой L, а остальные фрагментарны – опад и подстилка быстро разлагаются, условия для разложения благоприятны;

2) есть слой L и F, а H выражен плохо, иногда фрагментарно – средние по благоприятствованию условия разложения опада и подстилки;

3) при наличии слоев L и F сравнительно мощный слой H – условия разложения и гумификации самые плохие.

При этом Л. О. Карпачевский (1981) делает оговорку, что данные ряды – это только грубая схема, которая может иметь множество вариантов (сухие подстилки, влажные, участие разных пород и т. д.).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Значительная часть вырубков, сформировавшихся после сплошной рубки коренных еловых древостоев, возобновляется осиною [Втюрина, Соколов, 2009].

Несомненно, что эта антропогенная смена пород оказывает определенное влияние на ход почвообразования [Зонн, 1954; Тарасов, 2012; Тарасов и др., 2015; Тарасов, Тарасова, 2022], о котором можно судить по основным характеристикам подстилки, отражающим интенсивность и направленность биологического круговорота веществ в лесных биогеоценозах [Попова, Горбачев, 1988; Ведрова, 1997].

Исходя из этого, объекты исследования были представлены коренным разнотравно-зеленомошным ельником и производным разнотравным осинником, произрастающими на территории Кемчугского участкового лесничества КГБУ «Емельяновское лесничество», относящейся к Среднесибирскому подтаежно-лесостепному лесному району лесостепной лесорастительной зоны [Приказ ..., 2014].

Оба древостоя исследуемых насаждений являются средневозрастными, при этом средний возраст деревьев осины – около 40, а ели – 70 лет. Данная информация, так же, как и другие таксационные показатели древостоев были взяты из лесоустроительных материалов и представлены в табл. 1.

Таблица 1
Таксационные показатели древостоев

Состав	Возраст, лет	D, см	H, м	Бонитет	Полнота	Запас, м ³ /га
9Ос1Е	40	16	17,0	II	0,6	120
8Е2П	70	20	19,0	II	0,6	175

О характере влияния антропогенной смены пород на ход почвообразования, во многом определяемого интенсивностью и направленностью биологического круговорота, можно судить по особенностям накопления и разложения подстилки [Похитон, 1958]. В свою очередь, соотношение между данными процессами отражают такие ее характеристики, как мощность, запас и фракционный состав [Карпачевский, 1981; Ведрова, Решетникова, 2014].

Исходя из этого, основная цель работы заключалась в определении указанных параметров подстилки в исследуемых насаждениях. Для этого в десяти произвольно выбранных точках каждого объекта с помощью рамки размером 20×20 см отбирались образцы из указанных во введении трех слоев лесной подстилки (L, F, H) и с точностью до 1 мм измерялась их мощность [Растворова, 1983]. В лабораторных условиях образцы высушивали при температуре 90 °С до абсолютно сухой массы и взвешивали. Плотность образца вычисляли делением его массы на объем, который представляет собой произведение площади рамки на мощность (толщину) подстилки [Растворова, 1983]. Формула расчёта запаса каждого слоя подстилки представлена ниже:

$$M = 10000d_v h,$$

где M – запас подстилки, г/м²; d_v – плотность подстилки, г/см³; h – мощность подстилки, см.

Разделение сухих образцов на фракции проводили вручную с использованием набора сит. После взвешивания каждой фракции, находили их процентное содержание от массы всего образца. При этом, исходя

из различных темпов разложения разных фракций, их делили на активные (листья, хвоя, труха, трава, корни, ветки диаметром до 5 мм) и неактивные (шишки, кора, корни, ветки диаметром свыше 5 мм, минеральные частицы почвы) [Карпачевский, 1981, 1983].

На основе анализа основных характеристик подстилок определяли их классификационное положение, используя классификацию Л. Г. Богатырева (1990).

Кроме того, из образцов каждого слоя подстилки составлялись смешанные образцы [Смолянинов и др., 1966], агрохимический анализ которых позволяет получить усредненные для всего изучаемого участка данные. Такие аналитические исследования, как определение содержания органического вещества и углерода, а также физико-химические характеристики были выполнены в аккредитованной испытательной лаборатории ФГУ ГЦАС «Красноярский» по стандартным методикам [Практикум..., 1980]. При этом процентная доля углерода принималась равной половине содержания органического вещества [Мякина, Аринушкина, 1979]. Используя данные о массе слоев подстилки и процентного содержания в них органического вещества и углерода, вычисляли их аккумулярованные запасы.

Степень насыщенности основаниями рассчитывали по следующей формуле [Практикум..., 1980]:

$$V = 100 S / (S + H_T),$$

где V – степень насыщенности почвы основаниями, %; S – сумма поглощенных (обменных) оснований, м-экв./100 г; H_T – гидролитическая кислотность, м-экв./100 г.

Полученные данные обрабатывались с использованием методов математической статистики [Дмитриев, 1995] и стандартных программ «Статистика» и «Excel».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические исследования обнаружили в подстилках обоих насаждений наличие всех трех слоев, однако, разной мощности (табл. 2).

Анализ табл. 2 показывает, что в ельнике каждый слой и подстилка в целом имеют большую мощность. При этом во всех случаях, за исключением среднего слоя F, отмеченные различия обеспечивают уровень доверительной вероятности более 0,90 [Дмитриев, 1995]. Кроме того, максимальная мощность нижнего слоя H в подстилке ельника указывает на самые плохие условия ее разложения, тогда как соотношение слоев подстилки осинника является признаком средних по благоприятствованию условий [Карпачевский, 1983].

Вместе с тем, мощность подстилки отличается невысокой точностью определения и некоторым субъективизмом, что обуславливает предпочтительность ее другого параметра – запаса [Карпачевский, 1983; Ведрова, Решетникова, 2014]. Его средние значения для каждого слоя и подстилки в целом приведены в следующей табл. 3.

Ее анализ обнаружил тот же характер и высокую (более 0,98) достоверность различий между отдельными слоями подстилок осинника и ельника [Дмит-

риев, 1995]. Исключением является лишь самый верхний слой L, где различия имеют несколько меньший (0,88) уровень доверительной вероятности. Скорее всего, это связано с проведением исследований в период активного опадения листьев осины, что несколько нивелировало различия в запасах слоя L подстилок ельника и осинника.

Кроме того, обращают на себя внимание большие в относительном выражении различия запасов, чем мощности. Особенно это касается нижнего слоя Н, превышение запаса которого в ельнике, по сравнению с мощностью, возросло более чем вдвое – с 6 до 15 раз. Главной причиной этого является большая плотность слоев подстилки ельника и, прежде всего, самого нижнего из них, что отражают данные табл. 4.

Ее анализ выявил постепенное почти двукратное увеличение плотности от верхнего к нижнему слою в подстилке ельника – с 0,049 до 0,095 г/см³. В осиннике же данная тенденция не выражена, и самым плотным здесь является средний слой подстилки F. Исходя из значений критерия t_{Φ} , различия плотности исследуемых всех слоев подстилок превышают уровень доверительной вероятности 0,90 [Дмитриев, 1995].

Одной из наиболее вероятных причин разной плотности слоев подстилки могут быть соответствующие различия в их фракционном составе, резуль-

таты исследования которого представлены в табл. 5. Ее анализ позволяет заключить, что высокая плотность слоев F и Н подстилки ельника, главным образом, обусловлена почти 50-процентным содержанием в них минеральных частиц почвы, а также наличием крупных веток и шишек, более плотных, чем другие фракции.

Наряду с этим, при рассмотрении табл. 5 обращает на себя внимание заметно большая доля активной фракции во всех слоях подстилки осинника, в которую объединяют листья, труху, чешуйки, семена, траву и мелкие (диаметром до 5 мм) ветки. По мнению ряда ученых [Карпачевский, 1983; Попова, Горбачев, 1988], это указывает на высокие темпы разложения растительных остатков в подстилке осинника.

Еще одним подтверждением этого является в несколько раз меньший запас трухи в слоях F и Н (соответственно 1,50 и 5,30 г/м² против 8,81 и 14,43 г/м² в ельнике), несмотря на существенно большее (слой F) или близкое (слой Н) содержание данной фракции, в сравнении с подстилкой ельника (соответственно 36,29 против 20,34 % и 33,42 против 35,79 %).

Определенный интерес также представляют результаты химических анализов образцов из различных слоев исследуемых подстилок, а именно, содержание органического вещества и углерода

Таблица 2

Мощность слоев подстилки, см (числитель – осинник, знаменатель – ельник)

Слои	$\bar{X}$	$\pm m_x$	$\pm \sigma$	V, %	P, %	t_x	t_{Φ}
L	$\frac{1,09}{1,36}$	$\frac{0,079}{0,138}$	$\frac{0,2485}{0,4366}$	$\frac{22,8}{32,1}$	$\frac{7,21}{10,16}$	$\frac{13,87}{9,84}$	1,70
F	$\frac{0,97}{1,06}$	$\frac{0,081}{0,088}$	$\frac{0,2561}{0,2767}$	$\frac{26,4}{26,1}$	$\frac{8,35}{8,26}$	$\frac{11,98}{12,10}$	0,75
H	$\frac{0,36}{2,16}$	$\frac{0,032}{0,217}$	$\frac{0,1068}{0,6847}$	$\frac{28,0}{31,7}$	$\frac{8,86}{10,03}$	$\frac{11,29}{9,97}$	8,22
Подстилка в целом	$\frac{2,42}{4,58}$	$\frac{0,140}{0,239}$	$\frac{0,4429}{0,7557}$	$\frac{18,3}{16,5}$	$\frac{5,79}{5,22}$	$\frac{17,27}{19,16}$	7,79

Таблица 3

Запас слоев подстилки, г/м² (числитель – осинник, знаменатель – ельник)

Слои	$\bar{X}$	$\pm m_x$	$\pm \sigma$	V, %	P, %	t_x	t_{Φ}
L	$\frac{501,4}{660,5}$	$\frac{67,12}{86,73}$	$\frac{212,09}{274,11}$	$\frac{42,3}{41,5}$	$\frac{13,39}{13,13}$	$\frac{7,47}{7,62}$	1,45
F	$\frac{476,0}{879,5}$	$\frac{67,33}{144,73}$	$\frac{212,77}{457,34}$	$\frac{44,7}{52,0}$	$\frac{14,14}{16,46}$	$\frac{7,07}{6,08}$	2,53
H	$\frac{133,0}{2046,4}$	$\frac{14,89}{311,21}$	$\frac{47,08}{974,09}$	$\frac{35,4}{47,6}$	$\frac{11,19}{15,21}$	$\frac{8,93}{6,58}$	6,14
Подстилка в целом	$\frac{1110,4}{3586,4}$	$\frac{134,23}{514,13}$	$\frac{424,17}{1624,64}$	$\frac{38,2}{45,3}$	$\frac{12,09}{14,34}$	$\frac{8,27}{6,98}$	4,66

Таблица 4

Плотность слоев подстилки, г/см³ (числитель – осинник, знаменатель – ельник)

Слои	$\bar{X}$	$\pm m_x$	$\pm \sigma$	V, %	P, %	t_x	t_{Φ}
L	$\frac{0,046}{0,049}$	$\frac{0,0043}{0,0062}$	$\frac{0,0137}{0,0195}$	$\frac{29,9}{39,7}$	$\frac{9,35}{12,65}$	$\frac{10,70}{7,90}$	3,98
F	$\frac{0,060}{0,083}$	$\frac{0,0068}{0,0112}$	$\frac{0,0214}{0,0354}$	$\frac{35,6}{42,6}$	$\frac{11,33}{13,49}$	$\frac{8,82}{7,41}$	1,76
H	$\frac{0,037}{0,095}$	$\frac{0,0047}{0,0142}$	$\frac{0,0133}{0,0449}$	$\frac{36,0}{47,3}$	$\frac{11,35}{14,95}$	$\frac{8,81}{6,69}$	3,92
Подстилка в целом	$\frac{0,046}{0,078}$	$\frac{0,0055}{0,0115}$	$\frac{0,0173}{0,0364}$	$\frac{37,6}{46,7}$	$\frac{11,96}{14,74}$	$\frac{8,36}{5,03}$	2,51

Известно [Мякина, Аринушкина, 1979], что в процессе разложения образующих подстилку растительных остатков углерод, составляющий половину их массы, выделяется в атмосферу в виде углекислого газа. Поэтому с увеличением степени разложения слоев подстилки содержание в них органического вещества и углерода, как его основного компонента, постепенно снижаются [Карпачевский, 1983]. В соответствие с этим, уменьшаются и их запасы, депонированные в рассматриваемых слоях подстилки, что отражают данные табл. 6.

Ее анализ выявил практически одинаковое содержание органического вещества и углерода в свежем опаде слоя L обоих насаждений. Однако в более глубоких слоях подстилки осинника данные показатели оказались заметно ниже, что указывает на большую степень разложения составляющих их растительных остатков. При этом наибольшие различия в содержа-

нии органического вещества и углерода с ельником отмечаются в слое ферментации F, в котором процессы разложения идут наиболее активно [Карпачевский, 1983].

Меньшее содержание данных компонентов в сочетании с невысокими запасами слоев подстилки осинника (особенно, слоя Н – табл. 3), обусловили и существенно более низкие величины депонированных в них органического вещества и углерода, втрое уступающие аналогичным показателям ельника (табл. 6).

В значительной степени более активное разложение подстилки в осиннике обусловлено известным по литературным данным [Кузнецов, 2010; Тарасов и др., 2015] меньшим содержанием трудно разлагаемых химических соединений (смола, лигнина, дубильных веществ), а также более благоприятными для микрофлоры физико-химическими показателями. Последнее в полной мере подтверждают данные табл. 7.

Таблица 5

Фракционный состав слоев подстилки (числитель – запас, г/м²; знаменатель – содержание, %)

Слой	Пассивные фракции						Активные фракции						
	ветки > 5 мм	шишки	кора	мох	частицы почвы	всего	ветки < 5 мм	корни	травы	почки	хвоя, листья	труха	всего
Осинник													
L	–	–	–	–	<u>0,22</u> 3,53	<u>0,22</u> 3,53	<u>0,58</u> 9,31	–	<u>3,82</u> 61,32	<u>0,04</u> 0,64	<u>1,57</u> 25,20	–	<u>6,01</u> 96,47
F	–	–	<u>0,10</u> 1,08	–	<u>3,8</u> 29,13	<u>3,9</u> 30,21	<u>0,75</u> 3,99	<u>1,18</u> 7,17	<u>1,85</u> 14,28	<u>0,17</u> 1,47	<u>1,07</u> 6,59	<u>1,50</u> 36,29	<u>5,77</u> 69,79
H	–	–	–	–	<u>6,96</u> 42,26	<u>6,96</u> 42,26	–	<u>1,85</u> 15,88	<u>0,53</u> 3,03	<u>0,09</u> 0,88	<u>0,86</u> 4,53	<u>5,30</u> 33,42	<u>8,63</u> 57,74
Ельник													
L	<u>3,11</u> 15,03	<u>7,35</u> 30,39	–	<u>1,87</u> 10,85	–	<u>12,33</u> 56,27	–	<u>0,19</u> 1,33	<u>1,68</u> 9,69	–	<u>9,11</u> 30,17	<u>1,14</u> 2,54	<u>12,12</u> 43,73
F	–	<u>1,07</u> 2,67	–	<u>0,17</u> 0,70	<u>18,92</u> 55,0	<u>20,16</u> 58,37	<u>0,70</u> 3,45	<u>4,72</u> 11,6	<u>2,48</u> 5,8	–	<u>0,19</u> 0,44	<u>8,81</u> 20,34	<u>16,9</u> 41,63
H	<u>0,77</u> 4,11	<u>0,66</u> 2,75	<u>0,79</u> 2,11	–	<u>23,24</u> 47,68	<u>25,46</u> 56,65	–	<u>1,50</u> 3,87	<u>0,63</u> 3,04	–	<u>0,15</u> 0,65	<u>14,43</u> 35,79	<u>16,71</u> 43,35

Таблица 6

Содержание, %, и запас, г/м², органического вещества и углерода в слоях подстилки

Слой	Органическое вещество		Углерод	
	содержание, %	запас, г/м ²	содержание, %	запас, г/м ²
Осинник				
L	78,40	393,10	39,20	196,55
F	46,80	222,76	23,40	111,38
H	41,22	54,82	20,61	27,41
Подстилка в целом	–	670,68	–	335,34
Ельник				
L	78,66	519,54	39,33	259,77
F	57,96	509,76	28,98	254,88
H	45,56	932,34	22,78	466,17
Подстилка в целом	–	1961,64	–	980,82

Ее анализ указывает на меньшее проявление всех форм почвенной кислотности в слоях подстилки осинника при большем содержании в них обменных оснований и степени насыщенности ими. При этом наибольшие различия рассматриваемых показателей наблюдаются в верхнем слое L, что обусловлено более высоким содержанием в листовом опаде осины зольных элементов основного характера (кальция и магния). Так, согласно данным С. В. Зонна (1954), листья осины содержат в 1,5–2 раза больше зольных веществ, чем хвоя.

Известно, что подстилка является специфическим верхним горизонтом лесных почв [Морозов, 1949; Ткаченко, 1952; Ремезов, Погребняк, 1965; Ведрова, 1997], формирование которого тесно взаимосвязано с гумусообразованием [Географические аспекты..., 2013]. Поэтому при ее исследованиях необходимо рассматривать и непосредственно граничащий с ней гумусовый горизонт, что обусловлено существенным влиянием процессов трансформации подстилки не только на содержание в нем гумуса, но и физико-химические показатели.

В связи с этим, были сделаны почвенные прикопки до глубины 30 см, рассмотрение которых позволило диагностировать верхние минеральные горизонты ельника и осинника, как серо-гумусовые АУ [Классификация и диагностика..., 2004], и обнаружило близость большинства их морфологических признаков. В обоих насаждениях данный горизонт имеет тяжело-суглинистый гранулометрический состав, мелкокомковатую структуру, рыхлое сложение, многочисленные включения корней трав и серый цвет. Вместе

с тем, в осиннике он несколько темнее и более мощный (23 см), чем в ельнике (15 см). Результаты агрохимических исследований образцов из данных горизонтов показаны уже в приведенной выше табл. 6.

Исходя из значений водного и солевого pH, серогумусовый горизонт АУ в ельнике характеризуется сильнокислой реакцией почвенного раствора и высокой обменной кислотностью, что объясняется значительным поступлением в него кислых продуктов разложения подстилки. В осиннике же актуальная реакция данного горизонта слабокислая, а обменная и гидролитическая формы потенциальной кислотности проявляются в меньшей степени. Кроме того, здесь, по сравнению с ельником, в полтора раза выше содержание обменных оснований (25 против 16 м-экв./100 г) и более чем вдвое – степень насыщенности почвы ими (72,4 против 32,5 %). Главной причиной более благоприятных физико-химических показателей серо-гумусового горизонта АУ в осиннике является уже отмеченное ранее высокое содержание в его листьях зольных элементов основного характера (кальция, магния, калия), нейтрализующих часть кислых продуктов разложения подстилки и способствующих накоплению гумуса. Вследствие этого, горизонт АУ в осиннике содержит 6 % гумуса, тогда как в ельнике – 4,3 %.

В завершении следует отметить, что отмеченные различия основных параметров рассматриваемых подстилок соответствующим образом сказались и на их классификационном положении, приведенном в табл. 8.

При этом ее анализ показал как различия на уровне подтипа и подвида, так и общность таких таксономических рангов, как тип, род и вид.

Таблица 7
Физико-химические показатели слоев подстилки и серо-гумусового горизонта АУ
(числитель – осинник, знаменатель – ельник)

Слои	pH		Гидролитическая кислотность	Сумма обменных оснований	Степень насыщенности основаниями, %
	H ₂ O	KCl	милли-экв. на 100 г почвы		
L	<u>6,31</u>	<u>5,92</u>	<u>14,7</u>	<u>145,0</u>	<u>90,8</u>
	5,75	5,48	15,0	34,0	69,4
F	<u>5,99</u>	<u>5,61</u>	<u>19,5</u>	<u>30,0</u>	<u>60,6</u>
	5,51	5,27	20,9	24,0	53,5
H	<u>5,96</u>	<u>5,76</u>	<u>17,9</u>	<u>29,0</u>	<u>61,8</u>
	5,48	5,05	18,3	20,0	52,2
AY	<u>5,49</u>	<u>4,46</u>	<u>9,5</u>	<u>25,0</u>	<u>72,4</u>
	4,56	3,34	10,8	16,0	32,5

Таблица 8
Классификационное положение исследуемых лесных подстилок [Богатырев, 1990]

Таксономический ранг	Осинник	Ельник
Тип	гумифицированная	гумифицированная
Подтип	сверхсопряженная	сильносопряженная
Род	сложная	сложная
Вид	очень маломощная	очень маломощная
Подвид	лиственно-травяная	хвойная

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обобщающий анализ всех результатов сравнительных исследований лесной подстилки показал, что в производном осиннике биологический круговорот веществ идет активнее. Благодаря этому

происходит более быстрый возврат в почву элементов питания и увеличение их содержания, что при обратной смене пород будет способствовать успешному развитию хозяйственно ценных хвойных древостоев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Абатуров, Ю. Д. Влияние сосновых и березовых лесов на почвы Южного Урала // Почвоведение. 1961. № 6. С. 59–67.
2. Белов С. В. Лесоводство : учебное пособие для вузов. М. : Лесн. пром-сть, 1983. 352 с.
3. Богатырев Л. Г. Образование подстилок – один из важнейших процессов в лесных экосистемах // Почвоведение. 1996. № 4. С. 501–511.
4. Богатырев Л. Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
5. Богатырев Л. Г. Элементарные процессы в лесных подстилках // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 1987. № 4. С. 13–21.
6. Ведрова Э. Ф. Влияние сосновых насаждений на свойства почв. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1980. 101 с.
7. Ведрова Э. Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.
8. Ведрова Э. Ф., Решетникова Т. В. Масса подстилки и интенсивность ее разложения в 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
9. Втюрина О. П., Соколов В. А. Динамика лесов Приангарья // Организация устойчивого лесопользования в Красноярском крае. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. С. 105–114.
10. Географические аспекты функционирования лесных подстилок / Л. Г. Богатырев, А. В. Смагин, М. М. Акишина [и др.] // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 1. С. 30–36.
11. Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении. М. : МГУ, 1995. 320 с.
12. Зонн С. В. Взаимодействие и взаимовлияние лесной растительности с почвами // Почвоведение. 1956. № 7. С. 90–92.
13. Зонн С. В. Влияние леса на почву. М. : Гослесбумиздат, 1954. 160 с.
14. Карпачевский Л. О. Лес и лесные почвы. М. : Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.
15. Карпачевский Л. О. Подстилка – особый биогеогоризонт лесного биогеоценоза // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М. : Изд-во АН СССР, 1983. С. 88–89.
16. Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедев [и др.]. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
17. Кузнецов М. А. Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60.
18. Мелехов И. С. Лесоведение : учеб. для вузов. М. : Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.
19. Морозов Г. Ф. Учение о лесе. М. : Гослесбумиздат, 1949. 455 с.
20. Мякина Н. Б., Аринушкина Е. В. Методическое пособие для чтения результатов химических анализов почв. М. : Изд-во МГУ, 1979. 62 с.
21. Попова Э. П., Горбачев В. Н. Особенности формирования и свойства подстилок лесных биогеоценозов Среднего Приангарья // Почвоведение. 1988. № 1. С. 109–116.

22. Похитон П. П. Влияние различных древесных пород на почву // Почвоведение. 1958. № 6. С. 49–55.
23. Практикум по почвоведению / И. С. Кауричев, Н. П. Панов, М. В. Стратонович [и др.] ; под ред. И. С. Кауричева. М. : Колос, 1980. 272 с.
24. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18.08. 2014 № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации» (ред. от 19.02.2019). [Зарегистрирован в Минюсте России 29.09.2014 № 34186]. М. : Минприроды России, 2014. 24 с.
25. Растворова О. Г. Физика почв (практическое руководство). Л. : Изд-во ЛГУ, 1983. 96 с.
26. Ремезов Н. П. Роль биологического круговорота элементов в почвообразовании под пологом леса // Почвоведение. 1956. № 7. С. 68–80.
27. Ремезов Н. П., П. С. Погребняк. Лесное почвоведение. М. : Лесн. пром-сть, 1965. 324 с.
28. Роде А. А. К вопросу о роли леса в почвообразовании // Почвоведение. 1954. № 5. С. 50–63.
29. Сапожников А. П. Лесная подстилка – номенклатура, классификация, индексация // Почвоведение. 1984. № 5. С. 96–105.
30. Сапожников А. П. Об использовании признаков лесной подстилки в оценке гумусного состояния почв // Почвоведение. 1987. № 9. С. 26–31.
31. Смольянинов И. И., Мигунова Е. С., Гладкий А. С. Почвенная лаборатория лесхоза. М. : Лесн. пром-сть, 1966. 144 с.
32. Сукачев В. Н. Дендрология с основами лесной геоботаники. Л. : Гослестехиздат, 1938. 576 с.
33. Тарасов П. А. Оценка влияния смены сосны березой на свойства почв в условиях Приангарья // Лесной журнал. 2012. № 2. С. 14–19.
34. Тарасов П. А., Тарасова А. В., Иванов В. А. Основные характеристики лесной подстилки производных мелколиственных насаждений // Вестник КрасГАУ. 2015. № 2. С. 197–200.
35. Тарасов П. А., Тарасова А. В. Оценка влияния на почву смены сосняков березняками в зеленой зоне Красноярска, 2022.
36. Ткаченко М. Е. Влияние отдельных древесных пород на почву // Почвоведение. 1939. № 10. С. 3–17.
37. Ткаченко М. Е. Общее лесоводство. М.-Л. : Гослесбумиздат, 1952. 599 с.

REFERENCES

1. Abaturov Yu. D. Vliyanie sosnovykh i berezovykh lesov na pochvy Yuzhnogo Urala // Pochvovedenie. 1961. № 6. S. 59–67.
2. Belov S. V. Lesovodstvo. Uchebnoe posobie dlya vuzov. M. : Lesn. prom-st', 1983. 352 s.
3. Bogatyrev L. G. Obrazovanie podstilok – odin iz vazhnejshikh processov v lesnykh ehkositemakh // Pochvovedenie. 1996. № 4. S. 501–511.
4. Bogatyrev L. G. O klassifikacii lesnykh podstilok // Pochvovedenie. 1990. № 3. S. 118–127.
5. Bogatyrev L. G. Ehlementarnye processy v lesnykh podstilkakh // Vestnik MGU. Ser. 17. Pochvovedenie. 1987. № 4. S. 13–21.

6. Vedrova Eh. F. Vliyanie sosnovykh nasazhdenij na svojstva pochv. Novosibirsk : Nauka, Sib. otd-nie, 1980. 101 s.
7. Vedrova Eh. F. Razlozhenie organicheskogo veshchestva lesnykh podstilok // Pochvovedenie. 1997. № 2. S. 216–223.
8. Vedrova Eh. F., Reshetnikova T. V. Massa podstilki i intensivnost' ee razlozheniya v 40-letnikh kul'turakh osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sibiri // Lesovedenie. 2014. № 1. S. 42–50.
9. Vtyurina O. P., Sokolov V. A. Dinamika lesov Priangar'ya // Organizaciya ustojchivogo lesopol'zovaniya v Krasnoyarskom krae. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN, 2009. S. 105–114.
10. Geograficheskie aspekty funkcionirovaniya lesnykh podstilok / L. G. Bogatyrev, A. V. Smagin, M. M. Aki-shina [i dr.] // Vestnik MGU. Ser. 17. Pochvo-vedenie. 2013. № 1. S. 30–36.
11. Dmitriev E. A. Matematicheskaya statistika v pochvovedenii. M. : MGU, 1995. 320 s.
12. Zonn S. V. Vzaimodejstvie i vzaimovliyanie lesnoj rastitel'nosti s pochvami // Pochvovedenie. 1956. № 7. S. 90–92.
13. Zonn S. V. Vliyanie lesa na pochvu. M. : Goslesbumizdat, 1954. 160 s.
14. Karpachevskij L. O. Les i lesnye pochvy. M. : Lesn. prom-st', 1981. 264 s.
15. Karpachevskij L. O. Podstilka – osobyj biogeogorizont lesnogo biogeocenoza // Rol' podstilki v lesnykh biogeocenozach. M. : Izd-vo AN SSSR, 1983. S. 88–89.
16. Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii / L. L. Shishov, V. D. Tonkonogov, I. I. Lebedev [i dr.]. Smolensk : Ojkumena, 2004. 342 s.
17. Kuznecov M. A. Vliyanie uslovij razlozheniya i sostava opada na kharakteristiki i zapas podstilki v srednetaezhnom chernichno-sfagnovom el'nike // Lesovedenie. 2010. № 6. S. 54–60.
18. Melekhov I. S. Lesovedenie: Ucheb. dlya vuzov. M. : Lesn. prom-st', 1980. 408 s.
19. Morozov G. F. Uchenie o lese. M. : Goslesbumizdat, 1949. 455 s.
20. Myakina N. B., Arinushkina E. V. Metodicheskoe posobie dlya chteniya rezul'tatov khimicheskikh analizov pochv. M. : Izd-vo MGU, 1979. 62 s.
21. Popova Eh. P., Gorbachev V. N. Osobennosti formirovaniya i svojstva podstilok lesnykh biogeocenzov Srednego Priangar'ya // Pochvovedenie. 1988. № 1. S. 109–116.
22. Pokhiton P. P. Vliyanie razlichnykh drevesnykh porod na pochvu // Pochvovedenie. 1958. № 6. S. 49–55.
23. Praktikum po pochvovedeniyu / I. S. Kaurichev, N. P. Panov, M. V. Stratonovich [i dr.] ; pod red. I. S. Kauricheva. M. : Kolos, 1980. 272 s.
24. Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ehkologii Rossijskoj Federacii ot 18.08. 2014 № 367 «Ob utverzhdenii Perechnya lestorastitel'nykh zon Rossijskoj Federacii i Perechnya lesnykh rajonov Rossijskoj Federacii» (red. ot 19.02.2019). [Zaregistrovan v Minyuste Rossii 29.09.2014 № 34186]. – M. : Minprirody Rossii, 2014. 24 s.
25. Rastvorova O. G. Fizika pochv (prakticheskoe rukovodstvo). L. : Izd-vo LGU, 1983. 96 s.
26. Remezov N. P. Rol' biologicheskogo krugovorota ehlementov v pochvoobrazovanii pod pologom lesa // Pochvovedenie. 1956. № 7. S. 68–80.
27. Remezov N. P., P. S. Pogrebnyak. Lesnoe pochvovedenie. M. : Lesn. prom-st', 1965. 324 s.
28. Rode A. A. K voprosu o roli lesa v pochvoobrazovanii // Pochvovedenie. 1954. № 5. S. 50–63.
29. Sapozhnikov A. P. Lesnaya podstilka – nomenklatura, klassifikaciya, indeksaciya // Pochvovedenie. 1984. № 5. S. 96–105.
30. Sapozhnikov A. P. Ob ispol'zovanii priznakov lesnoj podstilki v ocenke gumusnogo sostoyaniya pochv // Pochvovedenie. 1987. № 9. S. 26–31.
31. Smol'yaninov I. I., Migunova E. S., Gladkij A. S. Pochvennaya laboratoriya leskhoza. M. : Lesn. prom-st', 1966. 144 s.
32. Sukachev V. N. Dendrologiya s osnovami lesnoj geobotaniki. L. : Goslestekhzdat, 1938. 576 s.
33. Tarasov P. A. Ocenka vliyaniya smeny sosny berezoy na svojstva pochv v usloviyakh Priangar'ya // Lesnoj zhurnal. 2012. № 2. S. 14–19.
34. Tarasov P. A., Tarasova A. V., Ivanov V. A. Osnovnye kharakteristiki lesnoj podstilki proizvodnykh melkolistvennykh nasazhdenij // Vestnik KraSGAU. 2015. № 2. S. 197–200.

© Тарасов П. А., Тарасова А. В., 2026

Поступила в редакцию 23.10.2025
Принята к печати 27.04.2026

ОЦЕНКА ПРИЗНАКА ТРЁХХВОЙНОСТИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В КАЧЕСТВЕ РАННЕГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ СКОРОСТИ РОСТА ДЕРЕВЬЕВ*

Н. А. Демина, Д. Х. Файзулин

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства
Российская Федерация, 163062, г. Архангельск, ул. Никитова, 13
E-mail: monitoringlesov@sevniilh-arh.ru

Аннотация. Скорость роста деревьев представляет собой один из ключевых показателей, оказывающих влияние на продуктивность насаждений и определяющих темпы накопления биомассы и прироста древесины. Диагностика важных показателей на ранней стадии онтогенеза является перспективным методом выявления быстрорастущих особей. Результаты фенотипической оценки сеянцев и молодых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) показывают, что особи с признаком трёххвойности характеризуются более интенсивными темпами роста и развития. Результаты научных исследований свидетельствуют о перспективности использования данного показателя в качестве раннего диагностического критерия скорости роста, что открывает возможности для его практического применения в лесном хозяйстве. В статье представлены результаты обследования 39-летних испытательных культур сосны обыкновенной, произрастающих в Вологодской области, которые создавались для долгосрочной оценки диагностической ценности признака трёххвойности, как маркера ранней идентификации быстрорастущих особей. Цель исследований – оценка влияния признака трёххвойности сосны обыкновенной на рост деревьев в испытательных культурах 2 класса возраста. В 8-летнем возрасте «трёххвойные» деревья достоверно превосходили «двуххвойные» по высоте на 9 % и по диаметру на 38 %. Установлено, что к 39 годам преимущество «трёххвойных» вариантов сохраняется по диаметру: превышение составило 7,4 %. Отбор «трёххвойных» особей на ранней стадии развития растений дает положительный эффект. По результатам обследования испытательных культур 2 класса возраста можно сделать вывод о том, что признак «трёххвойности» сосны обыкновенной может служить диагностическим маркером для раннего отбора перспективных сеянцев. Но в связи с тем, что по объёму ствола между «трёххвойными» и «двуххвойными» вариантами статистически значимых различий не выявлено, то для формирования доказательной базы, подтверждающей лесоводственную и экономическую эффективность проводимого отбора, наблюдения следует продолжить.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, трёххвойность, двуххвойность, ранняя диагностика, быстрорастущие особи, испытательные культуры, лесовосстановление.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 60–64

EVALUATION OF THE THREE-NEEDLE TRAIT OF SCOTS PINE AS AN EARLY DIAGNOSTIC CRITERION OF TREE GROWTH RATE

N. A. Demina, D. Kh. Fayzulin

Northern Research Institute of Forestry
13, Nikitova St., 163062, Arkhagelsk, Russian Federation
E-mail: monitoringlesov@sevniilh-arh.ru

Abstract. Tree growth rate is a key indicator affecting stand productivity and determining the rate of biomass accumulation and wood increment. Early diagnostics of these key indicators is a promising method for identifying fast-growing individuals. Phenotypic evaluation of seedlings and young trees of *Pinus sylvestris* demonstrates that individuals with the three-needle trait exhibit more intensive growth and development. These findings demonstrate the potential of this indicator as an early diagnostic criterion for growth rate, opening up opportunities for its practical application in forestry. This article presents the results of a survey of 39-year-old test culture of *Pinus sylvestris* growing in the Vologda Region. These cultures were created for the long-term assessment of the diagnostic value of the three-needle trait as a marker for the early identification of fast-growing individuals. The objective of this study was to evaluate the effect of the three-needle trait in *Pinus sylvestris* on tree growth in age-class 2 test culture. At 8 years of age, three-

* **Благодарность.** Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства. Регистрационный номер темы: 122020300231-2.

needle trees significantly exceeded two-needle trees in height by 9% and in diameter by 38 %. It was found that by 39 years, the advantage of three-needle trees in diameter remained: the excess was 7.4 %. Selecting three-needle trees early in plant development has a positive effect. Based on the results of the examination of age-class 2 test culture, it can be concluded that the three-needle trait in Scots pine can serve as a diagnostic marker for the early selection of promising seedlings. However, due to the fact that no statistically significant differences were found in terms of trunk volume between the "three-needle" and "two-needle" variants, observations should be continued to form an evidence base confirming the silvicultural and economic efficiency of the selection being carried out.

Keywords: *Pinus sylvestris L., three-needle, two-needle, early diagnostics, fast-growing trees, test culture, reforestation.*

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос эффективности фенотипического отбора быстрорастущих деревьев хвойных пород вызывает дискуссии в научном сообществе. Некоторые исследователи указывают на низкую эффективность такого отбора [1; 2]. Но существуют примеры успешных селекционных работ, где фенотипический отбор показывает положительные результаты [3; 4]. В настоящее время фенотипическая оценка остаётся основным инструментом селекции при правильной ее организации, особенно в условиях, когда современные генетические методы недоступны, несовершенны или экономически нецелесообразны. Ранняя диагностика быстрорастущих растений повышает эффективность фенотипической оценки и ускоряет селекционный процесс. Ряд исследователей с целью поиска перспективных по росту и устойчивых экземпляров в раннем возрасте проводили оценку прямых и косвенных признаков, таких как высота деревьев до 10-летнего возраста, строение коры, характер ветвления, тип мутовчатости, фенологические особенности и другие морфологические признаки [5–7].

Признак трёххвойности сосны обыкновенной – косвенный признак, который можно считать относительно простым для изучения и исполнения прикладных задач. Возможность применения признака треххвойности в практике лесного хозяйства подтверждается научными исследованиями. Так, растения с преобладанием трёххвойных пучков представляют собой ценный селекционный материал, который может быть использован для эффективного создания лесных культур, при создании плантаций сосны и постоянных лесосеменных участков, при проведении рубок ухода [8–11].

Особь сосны обыкновенной с наличием треххвойных пучков в ювенильной стадии развития растут значительно лучше двуххвойных и обладают повышенной устойчивостью [9]. Усиленный рост растений с преобладанием треххвойных пучков происходит за счет увеличения ассимиляционной поверхности и усиления защитных функций. С ростом числа треххвойных пучков у сосны возрастает число смоляных каналов в хвое и лубе [11], а также высота, диаметр ствола, годичный прирост, протяженность и диаметр кроны [12]. В некоторых исследованиях отмечается достоверная положительная корреляция между признаком наличия треххвойных пучков и количеством верхушечных почек, биомассой хвоинок и стволиков, диаметром у корневой шейки, количеством боковых побегов [13].

В 1970–1980-х гг. АИЛиЛХ (Архангельский институт леса и лесохимии, ныне Северный научно-

исследовательский институт лесного хозяйства) занимался разработкой методов ранней диагностики наследования хозяйственно-ценных признаков, где была создана сеть испытательных культур. Одним из признаков, выбранных для изучения, стал признак треххвойности сосны обыкновенной, где ставились задачи по выявлению особенностей роста и развития деревьев с наличием признака и без него, и обоснованию раннего диагностического значения треххвойности при селекции. В настоящее время испытательные культуры сосны достигли возраста, соответствующего требованиям для проведения оценочных мероприятий.

Целью исследования является оценка влияния признака треххвойности сосны обыкновенной на рост деревьев в испытательных культурах 2 класса возраста.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытательные культуры сосны созданы в Устюженском лесничестве Устюженского лесхоза Вологодской области на вырубке из-под сосняка верескового в 1978 году. Почва участка характеризовалась сильноподзолистой и глубокопесчаной. Рельеф участка ровный. Проводили корчевку пней, планировку участка. В качестве посадочного материала использовали сеянцы с признаком треххвойности и без этого признака. Сортировку 2-летних сеянцев сосны на «треххвойные» и «двуххвойные» производили при выкопке посадочного материала. К «треххвойным» относили все особи, у которых было по 1 и более треххвойных пучков на центральном побеге. В категорию «двуххвойных» относили растения без треххвойных пучков. Сеянцы высаживали в мае под меч Колесова в 3-х повторностях. Схема посадки – 2,5×0,7 м. Густота культур 5000 сеянцев на 1 га. Дополнение опытных культур сделали в конце июля 1979 г. За посадками в опытных культурах ухода не проводили, за исключением удаления погибших сеянцев.

На момент исследования культур возраст составил 39 лет (рис. 1). Деревья имеют хорошее состояние и развитие. Сомкнутость деревьев высокая. Наблюдается интенсивное очищение стволов от сучьев.

В период изучения испытательных культур сосны сохранность вариантов каждой повторности определяли сплошным пересчетом деревьев. Диаметры ствола на высоте 1,3 м измеряли у всех здоровых особей. Высоту в каждом варианте во всех испытательных культурах измеряли при помощи оптического высотомера не менее чем у 60 сосен, распределенных пропорционально представленности деревьев по ступеням толщины. При изучении динамики роста изучаемых вариантов использовали материалы научных от-

четов Архангельского института леса и лесохимии, Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства за 1985 и 2015 гг.



Рис. 1. Испытательные культуры сосны

Математическая обработка данных проводилась в соответствии с общепринятыми в лесном хозяйстве методиками с использованием редактора *Microsoft Office Excel*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сохранность варианта испытательных культур сосны с признаком трёххвойности в 39-летнем возрасте была равна 51,9 %, без признака трёххвойности – 58,1 %.

Замеры высот, диаметров у особей разного типа морфогенеза в 8-летнем возрасте показали превосходство «треххвойных» над «двуххвойными» (табл. 1).

В 8-летнем возрасте «треххвойные» сосны опережали «двуххвойные» растения по высоте на 11 см, по диаметру на 0,5 м высоте – на 0,3 см. Статистический анализ полученных данных указывает на достаточную точность эксперимента. Отмечается чуть меньшая относительная изменчивость высоты и диаметра у треххвойных вариантов. Обе группы характеризуются схожим разбросом значений, что говорит о схожей степени неоднородности деревьев внутри каждой группы. Также при изучении в данном возрасте испытательных культур отмечалось у сосен с преобладанием треххвойности более развитая крона, интенсивный прирост по высоте, повышенное количество боковых побегов и степень охвоения. Различия между «двуххвойными» и «треххвойными» растениями по высоте и диаметру в возрасте сосен 8 лет достоверные ($t = 3,7$; $6,0$ при $t_{st} = 2,6$, $p = 0,99$).

Изучение 39-летних сосен, выращенных из «треххвойных» и «двуххвойных» семян показало, что выявленная в более раннем возрасте тенденция преобладания «треххвойных» растений над «двуххвойными» по диаметру сохраняется. Различия по диаметру ствола на высоте груди значимы ($t = 5,1$ при $t_{st} = 2,6$, $p = 0,99$). Графическое представление динамики роста сосен разных вариантов показывает, что наблюдается превышение по высоте «треххвойных» растений над «двуххвойными» (рис. 2). Расчет показал, что различия по высоте в 39-летнем возрасте культур между вариантами с наличием треххвойных брахибластов и без их наличия статистически не значимы ($t < t_{st}$). Превышение по диаметру «треххвойных» сосен над «двуххвойными» составляет 0,9 см. Аналогично 8-летним культурам, коэффициент изменчивости высоты и диаметра деревьев сосны оказался чуть меньше у треххвойных вариантов, степень неоднородности деревьев каждой группы близка по значению.

Таблица 1

Статистическая характеристика изучаемых показателей роста 8- и 39-летних деревьев сосны, выращенных из «двуххвойных» и «треххвойных» семян в испытательных культурах

Показатели роста	Количество наблюдений	Средний показатель с ошибкой	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент изменчивости	Точность опыта	Достоверность
<i>8-летние испытательные культуры</i>						
Высота, см						
«двуххвойные»	200	127±2,1	29,00	22,9	1,62	61,9
«треххвойные»	200	138±2,1	29,12	21,1	1,49	67,0
Диаметр на 0,5 м, см						
«двуххвойные»	200	0,5±0,04	0,37	33,1	3,39	29,5
«треххвойные»	200	0,8±0,03	0,32	26,4	2,31	43,2
<i>39-летние испытательные культуры</i>						
Высота, м						
«двуххвойные»	66	16,3±0,4	2,91	16,9	2,08	48,0
«треххвойные»	65	15,9±0,3	2,04	12,1	1,49	66,8
Диаметр на 1,3 м, см						
«двуххвойные»	1018	12,1±0,12	3,88	31,6	0,99	100,9
«треххвойные»	786	13,0±0,13	3,66	28,5	1,02	98,5

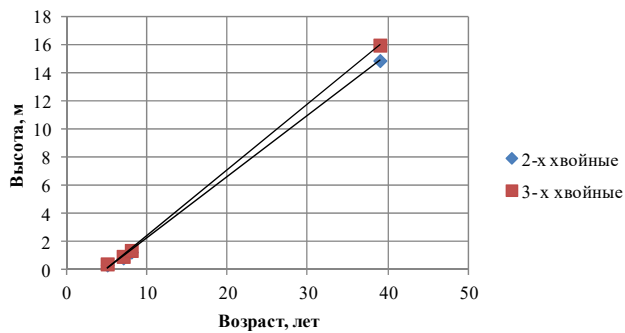


Рис. 2. Динамика роста по высоте двух- и треххвойных сосен в испытательных культурах

Выявление деревьев с высоким потенциалом роста позволяет: увеличить выход деловой древесины за счёт сохранения лидеров роста и сократить сроки выращивания древесины, поэтому оценка объема древесины также вызывает интерес (табл. 2).

Таблица 2
Объем ствола 39-летних испытательных культур сосны по вариантам

Вариант	Количество наблюдений	Средний показатель с ошибкой
С преобладанием двуххвойных сосен	66	0,118±0,011
С преобладанием треххвойных сосен	65	0,118±0,009

Опытные данные показывают равенство объёмов двух испытываемых вариантов в 39-летнем возрасте, но это не исключает преимуществ трёххвойных форм в более старшем возрасте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объект испытательных культур сосны обыкновенной 1979 года создания имеет достаточно хорошее состояние для оценки перспективности признака треххвойности при ранней диагностике быстрорастущих растений.

Установлено, что ростовые показатели (высота и диаметр) между особями, выращенных из «двуххвойных» или «треххвойных» семян на разных этапах развития достоверно различаются. Исключение составляет показатель высоты в 39-летнем возрасте.

Преимущество показали «треххвойные» деревья, интенсивность роста которых, как в раннем возрасте, так и на последующих этапах онтогенеза, выше. В 8-летнем возрасте превышение по высоте достигло 9 %, по диаметру – 38 %. В 39-летнем возрасте «треххвойные» сосны имеют показатель радиального роста больше на 7,4 %.

По результатам анализа полученных данных следует, что признак треххвойности может стать диагностическим признаком метода ранней диагностики на быстроту роста.

Положительный эффект, полученный при отборе особей с признаком треххвойности в 2-летнем возрасте, указывает на то, что данный признак можно использовать в селекционных работах и в лесокультурном деле. При сортировке посадочного материала в

группу перспективных следует относить наиболее развитые сеянцы с признаком треххвойности.

Оценку опытных культур можно считать практически завершённой в соответствии с документами, регулирующими вопросы оценки объектов лесного семеноводства, включая испытательные культуры [14]. Возраст сосны обыкновенной составил 39 лет, что составляет половину возраста рубки, принятого для данного вида лесных растений в условиях Вологодской области. Но, несмотря на достаточную репрезентативность данных, целесообразно продолжить наблюдения до достижения испытательных культур возраста спелости. Это позволит подтвердить или опровергнуть преимущества трёххвойных форм сосны и обосновать экономическую эффективность от применения данного признака.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Видякин А. И. Эффективность плюсовой селекции древесных растений // Хвойные бореальной зоны. XXVII. № 1-2, 2010. С. 19–24.
2. Рогозин М. В. Уроки истории лесной селекции // Лесное хозяйство. 2013. № 6. С. 20–23.
3. Naapanen M., Hynynen J., Ruotsalainen S., Siipilehto J., Kilpelainen M.-L. Realised and projected gains in growth, quality and simulated yield of genetically improved Scots pine in southern Finland // European J. Forest Research. 2016. Vol. 135, № 6. P. 997–1009.
4. Федорков А. Л. Фенотипический отбор в лесной селекции // Лесоведение. 2019. №6. С. 580–584.
5. Мерзленко М. Д., Брынцев В. А., Коженкова А. А. Ранняя диагностика лесоводственного эффекта деревьев в лесных культурах сосны обыкновенной // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 3. С. 51–55. DOI 10.53374/1993-0135-2024-3-51-55. EDN ZHOXBZ.
6. Иозус А. П. Завьялов А. А., Крючков С. Н. Оценка отобранного генофонда *Pinus sylvestris* L. по росту полусибсов // Научно-агрономический журнал. 2022. № 4(119). С. 81–87. DOI 10.34736/FNC.2022.119.4.012.81-87. EDN GTVJXX;
7. Ларина Ю. А., Ильинчик П. В., Блинцов А. И. Оценка состояния деревьев ели с разными фенотипическими признаками в насаждениях с нарушенной устойчивостью // Наука – инновационному развитию лесного хозяйства : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 11–13 ноября 2015 года / отв. ред. А. И. Ковалевич. Гомель : Ин-т леса НАН Беларуси, 2015. С. 243–245. EDN YZRPBR
8. Беляев В. В. Эффективность отбора посадочного материала хвойных пород по прямому и косвенным признакам при создании лесных культур // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1999. № 6. С. 41–48.
9. Беляев В. В. Эффективность использования сеянцев с наличием треххвойных пучков при создании культур сосны обыкновенной // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1995. № 2-3. С. 16–19.
10. Попов В. Я., Тучин П. В., Файзулин Д. Х., Жариков В. М. Создание плантаций сосны обыкновенной семенного происхождения на селекционной основе : метод. пособие. Архангельск, 2001 21 с.

11. Жариков В. М., Попов В. Я. К вопросу о трёххвойности сосны обыкновенной и ее значение для селекции // Тезисы докладов к отчетной сессии Лаборатории лесоведения и лесоводства за 1969 год. Архангельск, 1970. С. 25–29.

12. Тарханов С. Н., Бирюков С. Ю. Формовое разнообразие *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в бассейне Северной Двины // Растительные ресурсы. 2013. Т. 49, № 4. С. 481–490. EDN RCFEUB.

13. Мордась А. А., Раевский Б. В., Данилова Е. В. Изменчивость и взаимосвязь морфологических признаков и биометрических показателей сеянцев сосны обыкновенной // Лесной вестник. 2006. № 6. С. 26–33.

14. Приказ МПР и экологии Российской Федерации от 25 апреля 2025 года № 231 «Об утверждении Правил создания, выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков, других лесных насаждений, лесных растений, используемых в целях производства (выращивания, сбора) семян лесных растений, саженцев, сеянцев лесных древесных пород, а также сохранения генофонда и изучения наследственных свойств лесных растений), ухода за такими объектами». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312970713> (дата обращения: 29.12.2025).

REFERENCES

1. Vidyakin A. I. Effektivnost' plusovoy selektsii drevesnykh rasteniy // Khvoynyye boreal'noy zony. XXVII. № 1-2, 2010. S. 19–24.

2. Rogozin M. V. Uroki istorii lesnoy selektsii // Lesnoye khozyaystvo. 2013. № 6. S. 20–23.

3. Haapanen M., Hynynen J., Ruotsalainen S., Siipilehto J., Kilpelainen M.-L. Realised and projected gains in growth, quality and simulated yield of genetically improved Scots pine in southern Finland // European J. Forest Research. 2016. Vol. 135. № 6. P. 997–1009.

4. Fedorkov A. L. Fenotipicheskiy otbor v lesnoy selektsii // Lesovedeniye. 2019. № 6. S. 580–584.

5. Merzlenko M. D., Bryntsev V. A., Kozhenkova A. A. Rannaya diagnostika lesovodstvennogo effekta derev'yev v lesnykh kul'turakh sosny obyknovnoy // Khvoynyye boreal'noy zony. 2024. Т. 42, № 3. S. 51–55. DOI 10.53374/1993-0135-2024-3-51-55. EDN ZHOXBZ.

6. Iozus A. P., Zav'yalov A. A., Kryuchkov S. N. Otsenka obohrannogo genofonda *Pinus sylvestris* L. po rostu polusibov // Nauchno-agronomicheskii zhurnal. 2022. № 4(119). S. 81–87. DOI 10.34736/FNC.2022.119.4.012.81-87. EDN GTVJXX;

7. Larina Yu. A., Il'inchik P. V., Blintsov A. I. Otsenka sostoyaniya derev'yev yeli s raznymi fenotipicheskimi priznakami v nasazhdeniyakh s narushennoy ustoychivost'yu // Nauka – innovatsionnomu razvitiyu lesnogo khozyaystva: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Gomel', 11–13 noyabrya 2015 goda / Otvetstvennyy redaktor: A. I. Kovalevich. Gomel' : Institut lesa NAN Belarusi, 2015. S. 243–245. EDN YZRPHR

8. Belyayev V. V. Effektivnost' otbora posadochnogo materiala khvoynykh porod po pryamomu i kosvennym priznakam pri sozdanii lesnykh kul'tur // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 1999. № 6. S. 41–48.

9. Belyayev V. V. Effektivnost' ispol'zovaniya seyantsev s nalichiyem trekhkhvoynykh puchkov pri sozdanii kul'tur sosny obyknovnoy // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 1995. № 2-3. S. 16–19.

10. Popov V. Ya., Tuchin P. V., Fayzulin D. Kh., Zharikov V. M. Sozdaniye plantatsiy sosny obyknovnoy semennogo proiskhozhdeniya na selektsionnoy osnove : metod. posobiye. Arkhangel'sk, 2001 21 s.

11. Zharikov V. M., Popov V. Ya. K voprosu o trekhkhvoynosti sosny obyknovnoy i yeye znachenie dlya selektsii // Tezisy dokladov k otchetnoy sessii Laboratorii lesovedeniya i lesovodstva za 1969 god. Arkhangel'sk, 1970. S. 25–29.

12. Tarkhanov S. N., Biryukov S. Yu. Formovoye raznoobrazie *Pinus sylvestris* (Pinaceae) v basseynе Severnoy Dviny // Rastitel'nyye resursy. 2013. Т. 49, № 4. S. 481–490. EDN RCFEUB.

13. Mordas' A. A., Rayevskiy B. V., Danilova Ye. V. Izmenchivost' i vzaimosvyaz' morfologicheskikh priznakov i biometricheskikh pokazateley seyantsev sosny obyknovnoy // Lesnoy vestnik. 2006. № 6. S. 26–33.

14. Prikaz MPR i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 25 aprelya 2025 goda № 231 «Ob utverzhdenii Pravil sozdaniya, vydeleniya ob'yektov lesnogo semenovodstva (lesosemennykh plantatsiy, postoyannykh lesosemennykh uchastkov, drugikh lesnykh nasazhdeniy, lesnykh rasteniy, ispol'zuyemykh v tselyakh proizvodstva (vyrashchivaniya, sbora) semyan lesnykh rasteniy, sazhentsev, seyantsev lesnykh drevesnykh porod, a takzhe sokhraneniya genofonda i izucheniya nasledstvennykh svoystv lesnykh rasteniy), ukhoda za takimi ob'yektami». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312970713> (data obrashcheniya: 29.12.2025).

© Демина Н. А., Файзулин Д. Х., 2026

Поступила в редакцию 20.01.2026
Принята к печати 27.04.2026

**МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА,
ВЫРАЩИВАЕМОГО В ЛЕСНЫХ ПИТОМНИКАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ****Г. А. Копылова**

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17
E-mail: galina.kopylova2017@yandex.ru

Аннотация. Фитопатогенные микромицеты являются значимым фактором, снижающим качество посадочного материала, предназначенного для лесовосстановительных мероприятий. В связи с этим, научный интерес сосредоточен на применении методов ранней диагностики патогенов, поражающих посадочный материал. В настоящей работе представлен детальный анализ результатов молекулярно-генетической диагностики посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L. Karst.), культивируемого в лесных питомниках Архангельской области. Возрастной диапазон исследуемых сеянцев и саженцев ели европейской составлял от одного до пяти лет, а сосны обыкновенной – от одного до четырех лет. Диагностика проводилась с использованием семи родо- и видоспецифичных праймеров, каждый из которых обеспечивает амплификацию специфического маркерного участка генома патогенного микромицета. В ходе исследования были идентифицированы следующие фитопатогенные организмы: *Fusarium* Link, *Phoma* Sacc., *Cladosporium* Link, *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., *Lophodermium seditiosum* Minter, Staley & Millar и *Lophodermium pinastri* (Schrad.) Chevall. Установлены закономерности между частотой встречаемости идентифицированных патогенных микромицетов в зависимости от возраста посадочного материала и его породой. Фитопатогенные организмы заселяют посадочный материал уже на первом году жизни. В это время идентифицируется наиболее опасный для всходов патоген рода *Fusarium*. На втором году жизни растений происходит полтора-двакратное возрастание количества патогенов. В последующие годы патогенная нагрузка на растения снижается. Также отмечено, что сеянцы ели европейской заселены большим количеством патогенных микромицетов.

Ключевые слова: посадочный материал; молекулярно-генетический анализ; фитопатогенные микромицеты; основные лесобразующие породы.

*Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 65–70***MOLECULAR GENETIC DIAGNOSTICS OF PLANTING MATERIAL GROWN
IN FOREST NURSERIES OF THE ARKHANGELSK REGION****G. A. Kopylova**

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation
E-mail: galina.kopylova2017@yandex.ru

Abstract. Phytopathogenic micromycetes are a significant factor reducing the quality of planting material intended for reforestation activities. In this regard, scientific interest is focused on the application of methods for the early diagnosis of pathogens affecting the planting material. This paper presents a detailed analysis of the results of molecular genetic diagnostics of planting material of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* L. Karst. cultivated in forest nurseries of the Arkhangelsk region. The age range of the studied seedlings and seedlings of *Picea abies* ranged from one to five years, and of the *Pinus sylvestris* – from one to four years. The diagnosis was performed using seven genus- and species-specific primers, each of which provides amplification of a specific marker region of the genome of the pathogenic micromycete. The following phytopathogenic organisms were identified during the study: *Fusarium* Link, *Phoma* Sacc., *Cladosporium* Link, *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., *Lophodermium seditiosum* Minter, Staley & Millar and *Lophodermium pinastri* (Schrad.) Chevall. Patterns have been established between the frequency of occurrence of identified pathogenic micromycetes, depending on the age of the planting material and its breed. Phytopathogenic organisms colonize the planting material already in the first year of life. At this time, the most dangerous pathogen of the genus *Fusarium* is identified for seedlings. In the second year of plant life, there is a one-and-a-half-fold increase in the number of pathogens. In subsequent years, the pathogenic load on plants decreases. It was also noted that *Pinus sylvestris* seedlings are populated by a large number of pathogenic micromycetes.

Keywords: planting material; molecular genetic analysis; phytopathogenic micromycetes; main forest-forming species.

ВВЕДЕНИЕ

Фитопатогенные организмы представляют особую опасность для молодых растений, выращиваемых в лесных питомниках. В посевах они влияют на рост и развитие сеянцев и саженцев лесобразующих пород. Заражение растений – один из ключевых факторов, вызывающих гибель посадочного материала и приводящих к значительным экономическим потерям [12]. Одним из способов недопущения развития заболеваний посадочного материала является своевременная диагностика сеянцев и саженцев на наличие патогенной микрофлоры.

В рамках работ по государственному лесопатологическому мониторингу и мониторингу при воспроизводстве лесов целесообразно проведение молекулярно-генетических анализов в том числе для идентификации патогенных организмов посадочного материала основных лесобразующих пород. Такие методы диагностики на ранних этапах заражения обеспечивают точное и быстрое определение возбудителей заболеваний, что позволяет предупредить распространение инфекции и возникновение эпифитотий в лесных питомниках¹.

Цель работы – анализ фитосанитарного состояния посадочного материала основных лесобразующих пород от семени до сеянца/саженца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование охватило семь питомников Архангельской области. В четырех из них культивируется посадочный материал как ели европейской (*Picea abies* L. Karst.), так и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Остальная часть производит только сеянцы и саженцы ели европейской.

Тестирование проведено для 222 образцов растительного материала сосны обыкновенной и ели европейской. Для исследования отобраны лишь те сеянцы и саженцы, которые имели повреждения ассимиляционного аппарата. Посадочный материал ели европейской имел возраст от одного до пяти лет, тогда как возраст саженцев сосны обыкновенной составлял от одного до четырех лет.

Идентификация патогенов молодых растений выполнена при помощи ДНК-диагностики. В качестве материала использовали пораженные участки хвои сеянцев и саженцев основных лесобразующих пород [3]. Экстракция ДНК проведена с применением экстрагирующего буфера (СТАВ 3 %) [7]. Диагностика осуществлена посредством амплификации (многократного копирования) маркерного участка с применением родо- и видоспецифических праймеров (ITS-Fu1, Ph, Cls, Het, AAF2/AAR3, Ls11-12, Lp3-6) [4; 6; 14; 16–20]. Протоколы амплификации приведены в табл. 1.

Разделяли полученные продукты реакции при помощи горизонтального электрофореза в 1,5 % агарозном геле (Se-2, Хеликон) с последующим окрашиванием в растворе бромистого этидия. Регистрация ам-

пликонов проведена в гель-документирующей системе (Gel Imager-2, Хеликон) [2; 6].

Также для определения источника инфекции проанализированы документы о качестве семенного материала. Оценен показатель зараженности патогенными организмами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

У образцов молодых растений, предположительно зараженных патогенными организмами, выявлен генетический материал следующих микромицетов: *Fusarium* Link, *Phoma* Sacc., *Cladosporium* Link, *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., *Lophodermium seditiosum* Minter, Staley & Millar и *Lophodermium pinastri* (Schrad.) Chevall. (рис. 1). В обследованных лесных питомниках было выявлено 167 случаев заражения фомозом и 166 – кладоспориозом. Одной из наиболее благоприятных сред обитания для возбудителей этих заболеваний является почва [11; 15], через которую и может происходить заражение молодых растений. Также стоит отметить, что возбудители фомоза отличаются своей устойчивостью к фунгицидным веществам [11].

У всех обследованных образцов ели европейской и сосны обыкновенной встречаются патогены родов *Fusarium*, *Phoma*, *Cladosporium*, *Heterobasidion*. Определено, что перечисленные микромицеты, как правило, в большей степени заселяют молодые растения сосны обыкновенной. Однако, генетический материал патогенов рода *Lophodermium* диагностируется только у сеянцев и саженцев ели европейской (рис. 2).

На первом году жизни сеянцев основных лесобразующих пород идентифицируется генетический материал 4 родов фитопатогенных организмов. Наиболее распространенными патогенами являются *Cladosporium* spp. Большое количество патогенных микромицетов входит в состав рода *Cladosporium*, и более десятка из них способны развиваться на сельскохозяйственных культурах. Наиболее подвержены их воздействию растения со слабо развитыми или нарушенными покровными тканями и с ослабленным иммунитетом [15]. На втором году жизни сеянцев количество выявленных патогенов возрастает в 1,5 раза. Единично диагностируется генетический материал микромицетов, вызывающих заболевание шютте обыкновенное, летальность от которого у одно-, двухлетних растений составляет практически 100 % [13]. На третьем и четвертом году жизни растений доля патогенов незначительно уменьшается, их процент встречаемости относительно стабилен. У пятилетних растений количество выявленных фитопатогенных грибов сокращается. Стоит отметить, что значительно возрастает встречаемость *Lophodermium pinastri*. Большое количество исследований описывает негативное воздействие *Lophodermium seditiosum* на молодые растения. Однако, хотелось бы отметить, что *L. pinastri* оказывает влияние как на взрослые, так и на молодые растения [5] (рис. 3).

Наиболее опасный период роста и развития приходится на второй год жизни растений. Однако стоит обратить внимание, что заражение патогенными организмами происходит на уровне всходов и однолет-

¹ Лесной кодекс РФ от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2025).

них растений. У посадочного материала ели европейской обнаружен патоген, вызывающий полегание всходов (*Fusarium* spp.) [1; 8]. По мнению многих исследователей, он является наиболее вредоносным

возбудителем указанного заболевания, так как большинство видов *Fusarium* spp. обладают высокой жизнестойкостью и имеют широкий диапазон оптимальных условий для развития [9].

Таблица 1
Режимы амплификации для ДНК патогенных грибов

Наименование праймера	1 этап	2 этап			3 этап
	Предварительная денатурация, t, T	Денатурация, t, T	Отжиг, t, T	Элонгация, t, T	Заключительная элонгация, t, T
ITS-Fu1	3 мин, 94 °C	30 циклов			10 мин, 72 °C
		1 мин, 94 °C	1 мин, 58 °C	2 мин, 72 °C	
Ph	3 мин, 95 °C	35 циклов			10 мин, 72 °C
		30 с, 95 °C	30 с, 60 °C	1 мин, 72 °C	
Cls	3 мин, 95 °C	35 циклов			10 мин, 72 °C
		30 с, 95 °C	30 с, 60 °C	1 мин, 72 °C	
Het	3 мин, 95 °C	40 циклов			1 мин, 72 °C
		1 с, 99 °C	15 с, 60 °C	45 с, 72 °C	
AAF2/AAR3	3 мин, 95 °C	30 циклов			10 мин, 72 °C
		30 с, 95 °C	30 с, 70 °C	1 мин, 72 °C	
Ls11-12, Lp3-6	5 мин, 95 °C	35 циклов			7 мин, 72 °C
		20 с, 95 °C	25 с, 60 °C	45 с, 72 °C	

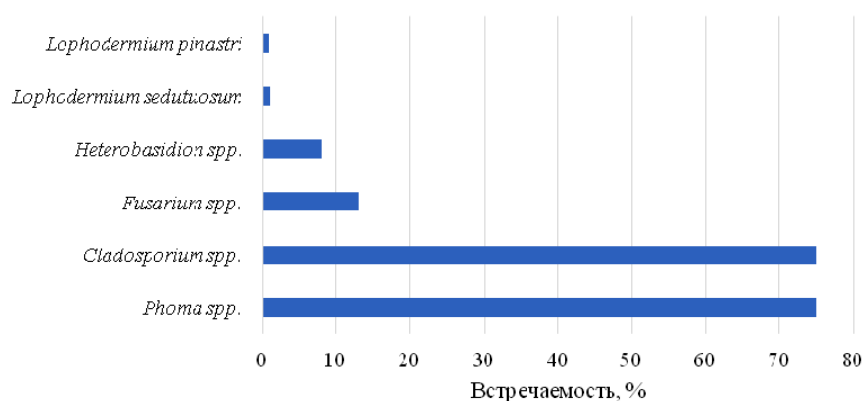


Рис. 1. Встречаемость патогенных микромицетов у посадочного материала основных лесобразующих пород Архангельской области

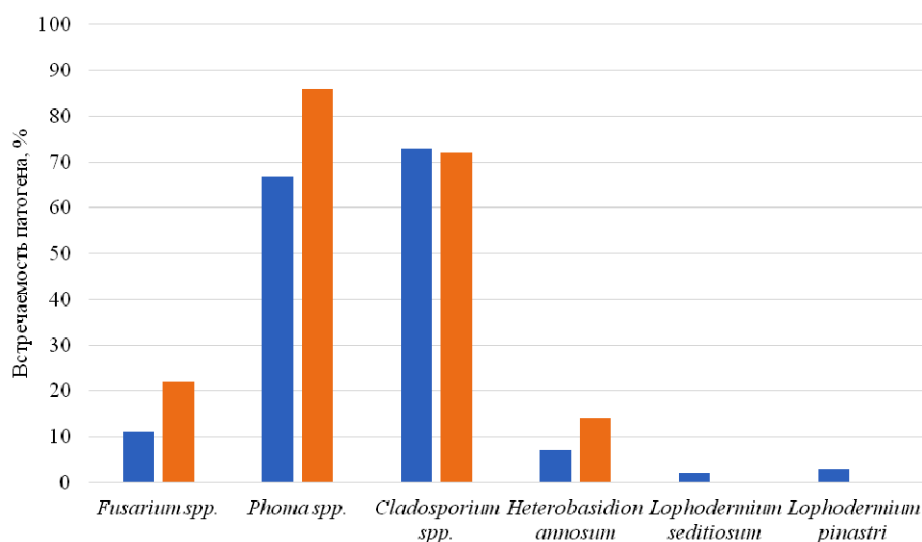


Рис. 2. Встречаемость патогенных микромицетов у образцов сосны обыкновенной и ели европейской в зависимости от породы

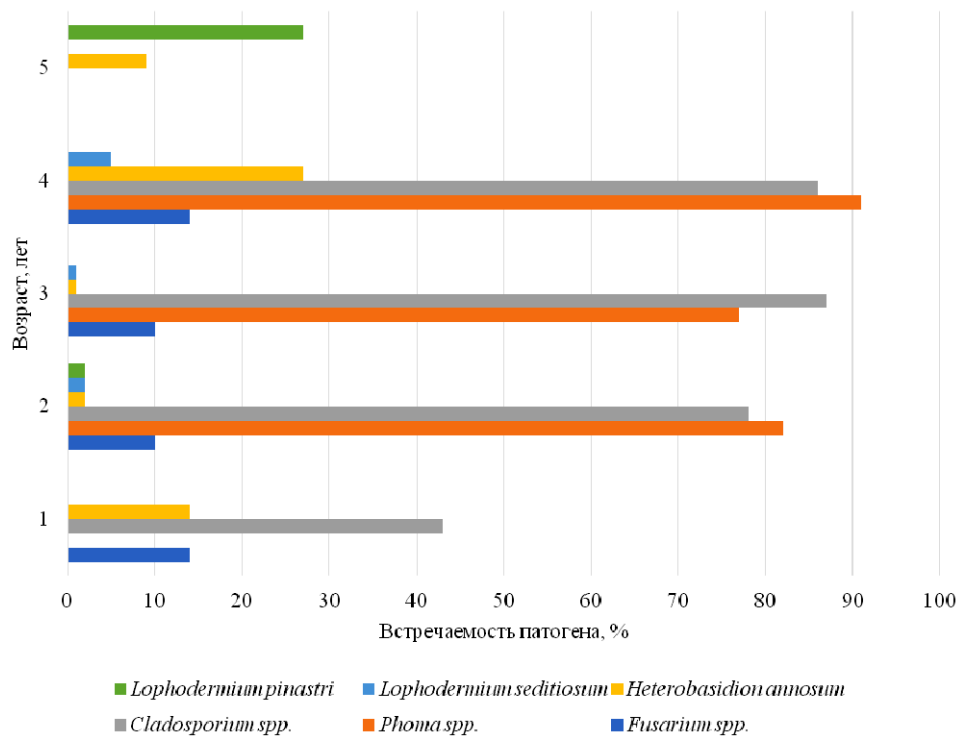


Рис. 3. Встречаемость патогенных микромицетов у образцов растительного материала основных лесообразующих пород

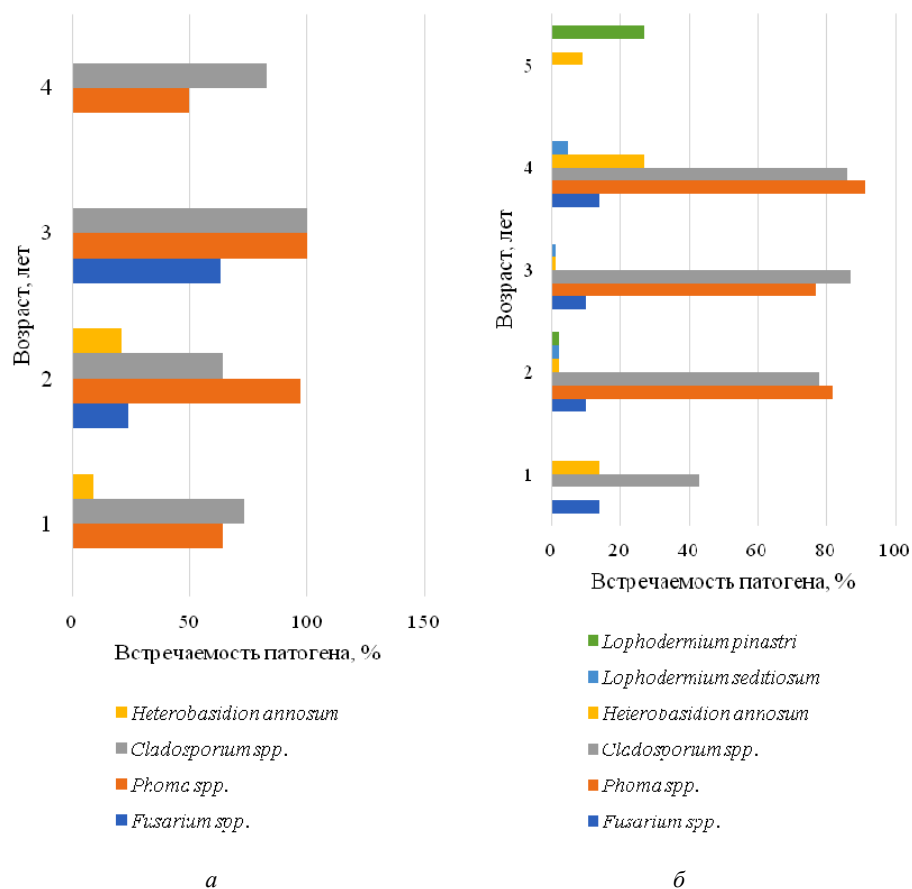


Рис. 4. Встречаемость патогенов:

а – сосны обыкновенной в зависимости от ее возраста; б – ели европейской в зависимости от ее возраста

При анализе документов о качестве семян определено, что у двух партий репродуктивного материала диагностировано по одному патогенному организму (*Verticillium* spp. и *Alternaria* spp.). Представители этих родов особо опасны для всходов и сеянцев первого года жизни, поскольку вызывают сосудистые поражения растений [10]. Стоит отметить, что эти микромицеты при помощи ДНК-диагностики нами зафиксированы не были. Вероятней всего на предотвращение заражения этими патогенами повлияла обработка фунгицидными препаратами, применяемыми перед посевом семян в грунт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам нашего исследования, генетический материал патогенных микромицетов можно выявить уже в первый год жизни растений. На втором году жизни наблюдается полуторакратное увеличение поражения растений патогенными грибами, после чего их количество постепенно уменьшается. Предполагается, что данная закономерность обусловлена элиминацией (гибелью и утилизацией) пораженного посадочного материала. К третьему году жизни выживают наиболее адаптированные саженцы ели и сосны.

Следует также отметить видовые различия в спектре патогенов: у ели европейской выявлено шесть таксонов, тогда как у сосны обыкновенной – четыре. Кроме того, внимание следует уделить тому, что возбудители обыкновенного шютте часто обнаруживаются на посадочном материале ели, что может быть важным фактором при обработке саженцев.

Эти данные позволяют сделать вывод о том, что применение молекулярно-генетических методов диагностики заболеваний посадочного материала является целесообразным для выращивания здоровых растений, применяемых для лесовосстановления, особенно на первом и втором году жизни, когда патогенная нагрузка чрезвычайно велика.

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. № 1. С. 3–9.
2. Алимова Т. С. [и др.]. Применение методов молекулярной генетики для анализа наличия фитопатогенов в лесных насаждениях и питомниках Российской Федерации // Сибирский лесной журнал. 2014. № 4. С. 35–41.
3. Бедрицкая Т. В. Применение молекулярно-генетических методов для диагностики фитопатогенов посадочного материала // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России : материалы Науч.-практ. конф. Архангельск, 2023. С. 248–254.
4. Ганнибал Ф. Б. Мониторинг альтернариозов сельскохозяйственных культур и идентификация грибов рода *Alternaria* // Российская академия сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений (ВИЗР) : метод. пособие. СПб., 2011. С. 26.

5. Гродницкая И. Д., Сенашова В. А. Новое для лесопитомников Сибири заболевание сеянцев сосны обыкновенной // Защита и карантин растений. 2012. № 2. С. 48–50.

6. Копылова Г. А. Молекулярно-генетическая диагностика посадочного материала хвойных пород // Растительный покров Европейского Севера и Арктики: Перфильевские научные чтения, посвящ. 140-летию со дня рождения Ивана Александровича Перфильева : сб. материалов Межрегион. науч. конф. Архангельск, 2022. С. 206–212.

7. Кутлунина Н. А. Молекулярно-генетические методы в исследовании растений : учеб.-метод. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 142 с.

8. Павлов И. Н. [и др.]. К вопросу исследования наиболее вредоносных возбудителей болезней древесных растений в лесных и парковых ландшафтах Черноморского побережья России и Абхазии // Бюллетень ГНБС. 2023. № 149. С. 72–80.

9. Праходский С. А., Каплич В. М., Ярмолович В. А. Инфекционное полегание сеянцев сосны обыкновенной в условиях защищенного грунта // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2010. С. 297–301.

10. Сенашова В. А., Сафронова И. Е., Вилкова Т. Л. Фитопатогенные микромицеты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) На территории Нижнего Приангарья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 228. С. 250–265.

11. Середич М. О. Культурально-морфологические особенности гриба *Phoma* sp. 1 – возбудителя фомоза посадочного материала хвойных пород // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2016. № 1 (183). С. 182–186.

12. Сорока С. В. Перспективы повышения эффективности защиты растений в Республике Беларусь на 2021–2030 гг. // Защита растений в условиях перехода к точному земледелию : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию со дня основания РУП «Институт защиты растений». Минск, 2021. С. 7–20.

13. Федоренко С. И. Обыкновенное шютте сосны в лесных питомниках Свердловской области // Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург, 1999. Вып. 19. С. 253–257.

14. Шуваев Д. Н., Кальченко Л. И. Идентификация очагов корневой губки в Алтайском крае с помощью методов ДНК-анализа // Сибирский лесной журнал. 2016. № 5. С. 147–152.

15. Ярмолович В. А. [и др.]. Кладоспориоз и альтернариоз в лесных питомниках Беларуси // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2015. № 1 (174). С. 203–206.

16. Arif M. U., Chawla S., Zaidi M. W., Rayar J. K., Variar M., Singh U. S. Development of specific primers for genus *Fusarium* and *F. solani* using rDNA sub-unit and transcription elongation factor (TEF-1α) gene. Afr. J. Biotechnol. 2012, 11, 444–447.

17. Konstantinova P., Bonants P. J. M. etc. Development of specific primers for detection and identification of *Alternaria* spp. in carrot material by PCR and compa-

rison with blotter and plating assays // The British Mycological Society, Mycol. Res. 106 (1), 2002. P. 23–33.

18. Maja Bentele, Kristin Morgenstern, Doris Krabel *Lophodermium seditiosum* Minter, Staley & Millar seed-borne on *Pinus sylvestris* // Journal of Forest and Landscape Research. 2014. № 1. P. 1–8.

19. Ondrušková E. et al. Checking the balance between pathogenic and mutualistic pine needle fungi of the genus *Lophodermium* in forested and urban areas of Slovakia. Scandinavian Journal of Forest Research. 2023. P. 39–48.

20. Stenström E., Ihrmark K. Identification of *Lophodermium seditiosum* and *L. pinastri* in Swedish forest nurseries using species-specific PCR primers from the ribosomal ITS region. For. Pathol. 2005, № 35. C. 163–172.

REFERENCES

1. Amyaga E. N., Isaev S. P. Opreделение vidovoj pri nadlezhnosti listvennic v Evrejskoj avtonomnoj oblasti i ocenka ee fitosanitarnogo sostoyaniya // Regional'nye problemy. 2021. № 1. S. 3–9.

2. Alimova T. S. [i dr.]. Primenenie metodov molekulyarnoj genetiki dlya analiza nalichiya fitopatogenov v lesnyh nasazhdeniyah i pitomnikah Rossijskoj Federacii // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2014. № 4. S. 35–41.

3. Bedrickaya T. V. Primenenie molekulyarno-geneticheskikh metodov dlya diagnostiki fitopatogenov posadochnogo materiala // Aktual'nye voprosy taezhnogo i pritundrovogo lesovodstva na Evropejskom Severe Rossii : materialy Nauchno-prakticheskoy konferencii, Arhangel'sk, 2023. S. 248–254.

4. Gannibal F. B. Monitoring al'ternariozov sel'skohozyajstvennyh kul'tur i identifikaciya gribov roda *Alternaria* // Rossijskaya akademiya sel'skohozyajstvennyh nauk, Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut zashchity rastenij (VIZR), Metodicheskoe posobie, SPb., 2011. S. 26.

5. Grodnickaya I. D., Senashova V. A. Novoe dlya lesopitomnikov Sibiri zabolevanie seyancev sosny obyknovnoy // Zashchita i karantin rastenij. 2012. № 2. S. 48–50.

6. Kopylova G. A. Molekulyarno-geneticheskaya diagnostika posadochnogo materiala hvoynyh porod // Rastitel'nyj pokrov Evropejskogo Severa i Arktiki: Perfil'evskie nauchnye chteniya, posvyashchennye 140-letiyu so dnya rozhdeniya Ivana Aleksandrovicha Perfil'eva : Sbornik materialov Mezhhregional'noj nauchnoj konferencii, Arhangel'sk, 2022. S. 206–212.

7. Kutlunina N. A. Molekulyarno-geneticheskie metody v issledovanii rastenij : ucheb.-metod. Posobie / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Ural. feder. un-t. Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2017. 142 s.

8. Pavlov I. N. [i dr.]. K voprosu issledovaniya naibolee vredonosnyh vozбудitelej boleznej drevesnyh rastenij v lesnyh i parkovyh landshaftah Chernomorskogo poberezh'ya Rossii i Abhazii // Byulleten' GNBS. 2023. № 149. S. 72–80.

9. Prahodskij S. A., Kaplich V. M., Yarmolovich V. A. Infekcionnoe poleganie seyancev sosny obyknovnoy v

usloviyah zashchishchennogo grunta // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov. 2010. S. 297–301.

10. Senashova V. A., Safronova I. E., Vilkova T. L. Fitopatogennye mikromicety sosny obyknovnoy (*Rinus sylvestris* L.) Na territorii Nizhnego Priangar'ya // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2019. Vyp. 228. S. 250–265.

11. Seredich M. O. Kul'tural'no-morfologicheskie osobennosti griba *Phoma* sp. 1 – vozбудitelya fomoza posadochnogo materiala hvoynyh porod // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov. 2016. № 1 (183). S. 182–186.

12. Soroka S. V. Perspektivy povysheniya effektivnosti zashchity rastenij v Respublike Belarus' na 2021–2030 gg. // Zashchita rastenij v usloviyah perekhoda k tochnomu zemledeliyu : Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoy 50-letiyu so dnya osnovaniya RUP «Institut zashchity rastenij», Minsk, 2021. S. 7–20.

13. Fedorenko S. I. Obyknovnoe shyutte sosny v lesnyh pitomnikah Sverdlovskoj oblasti // Lesa Urala i hozyajstvo v nih / M-vo obshch. i prof. obrazovaniya RF, Ural. gos. lesotekhn. akademiya. Ekaterinburg, 1999. Vyp. 19. S. 253–257.

14. Shuvaev D. N., Kal'chenko L. I. Identifikaciya ochagov kornevoj gubki v Altajskom krae s pomoshch'yu metodov DNK-analiza // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2016. № 5. S. 147–152.

15. Yarmolovich V. A. [i dr.]. Kladosporioz i al'ternarioz v lesnyh pitomnikah Belarusi // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov. 2015. № 1 (174). S. 203–206.

16. Arif M. Yu. [i dr.]. Development of specific primers for genus *Fusarium* and *F. solani* using rDNA sub-unit and transcription elongation factor (TEF-1 α) gene. Afr. J. Biotechnol. 2012, 11, 444–447.

17. Konstantinova P., Bonants P. J. M. etc. Development of specific primers for detection and identification of *Alternaria* spp. in carrot material by PCR and comparison with blotter and plating assays // The British Mycological Society, Mycol. Res. 106 (1), 2002. R. 23–33.

18. Maja Bentele, Kristin Morgenstern, Doris Krabel *Lophodermium seditiosum* Minter, Staley & Millar seed-borne on *Pinus sylvestris* // Journal of Forest and Landscape Research. 2014. № 1. R. 1–8.

19. Ondrušková E. et al. Checking the balance between pathogenic and mutualistic pine needle fungi of the genus *Lophodermium* in forested and urban areas of Slovakia. Scandinavian Journal of Forest Research. 2023. P. 39–48.

20. Stenström E., Ihrmark K. Identification of *Lophodermium seditiosum* and *L. pinastri* in Swedish forest nurseries using species-specific PCR primers from the ribosomal ITS region. For. Pathol. 2005, № 35. S. 163–172.

© Копылова Г. А., 2026

ОПЫТ ВЫРАЩИВАНИЯ КЕДРА СИБИРСКОГО В ПОДТАЕЖНОЙ ЗОНЕ СИБИРИ

Г. С. Вараксин¹, М. Е. Валетчик¹, А. А. Вайс²

¹ФИЦ КНЦ СО РАН «Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН»
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28
 E-mail: varaksings@mail.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: vais6365@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты лесоводственно-таксационной оценки эффективности создания культур кедров сибирского на территории подтаёжной зоны Средней Сибири. Объектом исследования являлись культуры 2000 года посадки. Проанализирована динамика приживаемости от момента посадки до перевода культур в покрытые лесной растительностью земли, а также современное состояние насаждений по данным таксации 2025 года. Установлено, что применяемая агротехника (подготовка почвы проведена трактором ЛХТ-55 с плугом ПКЛ-70 (бороздная), посадка в дно борозды лесопосадочной машиной МЛУ-1и комплекс агротехнических уходов) обеспечила высокую приживаемость и сохранность культур. Выявлено, что 25-летние кедровые культуры представляют собой высокопродуктивные насаждения I класса бонитета с плотностью 1269 шт./га.

Ключевые слова: лесные культуры, *Pinus sibirica*, лесоводственно-таксационная оценка, плотность, продуктивность.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 71–75

EXPERIENCE OF CULTIVATING SIBERIAN CEDAR PINE
IN THE SUBTAIGA ZONE OF SIBERIAG. S. Varaksin¹, M. Ye. Valetchik¹, A. A. Vais²

¹KSC SB RAS “Institute of Forest named after. V. N. Sukacheva SB RAS”
 50, build. 28, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation
 E-mail: varaksings@mail.ru

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: vais6365@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a silvicultural assessment of the effectiveness of establishing Siberian pine plantations in the subtaiga zone of Central Siberia. The study focused on trees planted in 2000. The study analyzed the survival dynamics from planting to the transition of the trees to forested lands and the current state of the stands based on the 2025 inventory. It was established that the applied agricultural technology (soil preparation using an LHT-55 tractor with a PKL-70 furrow plow, planting into the furrow bottom using an MLU-1 forest planting machine, and a set of agricultural management tools) ensured high survival and survival of the trees. It was revealed that 25-year-old cedar crops are highly productive plantations of the first quality class with a density of 1269 pcs/ha.

Keywords: forest crops, *Pinus sibirica*, silvicultural assessment, density, productivity.

ВВЕДЕНИЕ

Создание устойчивых и высокопродуктивных культур кедров сибирского является одной из приоритетных задач лесоводства и лесных культур в Сибири [1–6].

Особую актуальность эта проблема приобретает в зоне интенсивного лесопользования и вблизи населенных пунктов, где требуется восстановление ценных хвойных насаждений [7; 8].

Исследованием приживаемости, сохранности и особенностей роста культур кедров сибирского занимались многие ученые [9–26]. Подтаёжная зона Сибири характеризуется преобладанием производных березняков и осинников на месте хвойных лесов и представляет собой типичный пример территории, нуждающейся в активных лесовосстановительных мероприятиях. Однако недостаток работ, обобщающих многолетний опыт создания культур кедров сибирского

го в конкретных лесорастительных условиях, затрудняет разработку оптимальных лесоводственных рекомендаций [27].

В связи с этим, оценка долговременной эффективности ранее созданных культур представляет значительный научный и практический интерес.

Цель работы – провести лесоводственный анализ эффективности создания культур кедра сибирского в условиях подтаежной зоны Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – опытно-производственные культуры кедра сибирского, созданные в 2000 году на территории Большемурутинского лесничества Красноярского края (рис. 1).

Общая площадь участка – 62 га. Категория площади – пастбище. Тип леса – кедрач разнотравный. Почва – серая лесная среднесуглинистая относительно дренированная. Подготовка почвы проведена трактором ЛХТ-55 с плугом ПКЛ-70 (бороздами). Посадка отсортированных 3-летних сеянцев осуществлена в дно борозды механизированным способом – лесопосадочной машиной МЛЮ-1. Схема посадки кедр – $4,5 \times 0,8$ м. Первоначальная густота – 2735 шт./га. Дополнение проведено весной 2001 года на площади 33 га (700 шт./га). Агротехнические уходы проводились механизированным способом (культиватором КЛБ-1,7) и через 2 года после посадки культур химическим способом (смесь гербицидов анкор + нитосорг).

Культуры таксировали методом закладки временных пробных площадей (ПП) в соответствии с требованиями ОСТ 16128-90 «Пробные площади лесоустойчивые». Всего заложено 2 пробные площади

(ПП). Перечеты деревьев вели по рядам. На ПП проводился сплошной пересчет с измерением у части деревьев морфологических показателей (диаметр на высоте 1,3 м, высоту, высоту начала кроны, высоту наибольшего диаметра кроны, радиусы кроны в ряду и между рядами). Использовались стандартные таксационные и статистические методы обработки [28]. Бонитет определялся по общепринятым в лесоводстве и таксации методам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Анализ данных по приживаемости и сохранности показал высокую эффективность примененной технологии создания культур. Приживаемость культур кедр сибирского в первый год составила 90,1 %, что свидетельствует о высоком качестве посадочного материала и оптимальных сроках проведения лесопосадочных работ. К пятому году сохранность оставалась на высоком уровне – 87,3 %, что является хорошим показателем, достигнутым благодаря своевременному дополнению и системе агротехнических уходов (табл. 1).

На момент перевода культур в покрытые лесной растительностью земли сохранность кедр сибирского от исходной густоты посадки составила 57,8 %. Данная густота является оптимальной для формирования устойчивых насаждений.

Комбинированная система уходов (механизированный + химический) доказала свою высокую эффективность. Однократный химический уход в 2003 году позволил полностью отказаться от дальнейших механизированных уходов вследствие длительного подавления живого напочвенного покрова, что указывает на его высокую лесоводственную и экономическую эффективность.



Рис. 1. Фотография культур кедр сибирского. Возраст – 25 лет.
Фото М. Е. Валетчика

По данным натурного обследования 25-летних культур, можно констатировать, что они представляют собой сомкнутые, высокопродуктивные насаждения. Количество деревьев кедров сибирского на 1 га – 1269 шт./га. Необходимо отметить естественный отпад, что является нормальным процессом самоизреживания в густых молодняках. Класс бонитета – I. Это указывает на высокий показатель продуктивности, свидетельствующий об оптимальных лесорастительных условиях и правильной агротехнике создания культур. Категория состояния – хорошее, деревья здоровые, со сформированными кронами правильной конфигурации.

Сомкнутость полога – 0,8–0,9. Культуры вступили в стадию плодоношения. Отмечается успешное естественное возобновление под пологом, что указывает на формирование устойчивой лесной экосистемы.

Для более детального исследования морфологических показателей культур выполнен статистический анализ основных признаков деревьев (табл. 2).

Следует отметить небольшие различия в морфологии деревьев участков – по высоте деревьев, высоте расположения наибольшего диаметра кроны и диаметрам кроны как в рядах, так и между рядами. Особый интерес представляет значительный разброс показателей средней высоты на разных пробных площадях (от 8,1 до 8,9 м) при практически одинаковом среднем диаметре (табл. 2). Это может быть объяснено как микроклиматическими и почвенными различиями в пределах участка (микрорельеф, изменение мощности почвенного профиля), так и генетической неоднородностью посадочного материала. Подобная дифференциация является естественным процессом и

в дальнейшем приведет к формированию сложной ярусной структуры древостоя, что характерно для коренных кедровников [29].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что комплексный подход к созданию культур является залогом долговременного успеха. Высокая продуктивность насаждений (I класс бонитета) через 25 лет после закладки является индикатором лесоводственной эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведенных исследований установлена высокая эффективность создания культур кедров сибирского на территории подтаёжной зоны Средней Сибири. Комплекс агротехнических приемов обеспечил формирование устойчивых высокопродуктивных насаждений I класса бонитета.

2. Динамика приживаемости и сохранности культур кедров сибирского характеризуется высокими показателями (приживаемость на 5-й год – 87,3 %, сохранность к моменту перевода культур в покрытые лесной растительностью земли – 57,8 %), что подтверждает правильность выбранной технологии.

3. Таксационная оценка 25-летних культур подтверждает, что они представляют собой высокопродуктивные насаждения со средними диаметрами $12,3 \pm 0,68$ см и $12,3 \pm 0,55$ см и средними высотами $8,9 \pm 0,15$ м и $8,1 \pm 0,11$ м, а также оптимальной для данного возраста густотой 1269 шт./га.

4. Выявленная изменчивость по средней высоте (от 8,1 до 8,9 м) требует дальнейшего изучения для выявления причин данного явления и может быть использована при планировании лесоводственных уходов.

Таблица 1
Динамика приживаемости и сохранности кедровых культур, %

1-й год (2001 г)	3-й год (2003 г)	5-й год (2005 г)	На момент перевода культур в покрытые лесной растительностью земли (сохранность от исходной густоты), %
90,1	89,7	87,3	57,8 (1580/2735)

Таблица 2
Морфологические характеристики лесных культур кедров сибирского

Статистика	D _{1,3} , см	H, м	ННК, м	НМК, м	ДКВ, м	ДКМ, м	LB, м
III 1							
Среднее	12,3±0,68	8,9±0,15	1,4±0,24	4,3±0,23	2,3±0,19	3,2±0,12	1,5±0,28
Минимум	6	7,2	0,2	2	0,7	2,2	0,4
Максимум	18	10,1	4,2	7,3	3,6	4,4	5
CV, %	27,0	8,3	87,0	26,5	40,6	18,5	89,7
P, %	5,5	1,7	17,8	5,4	8,3	3,8	18,3
III 2							
Среднее	12,3±0,55	8,1±0,11	0,4±0,04	4,9±0,11	1,7±0,09	3,0±0,10	1,8±0,21
Минимум	5,5	7,5	0,15	4,1	0,9	2,2	0,7
Максимум	17	9,5	1	5,9	2,4	4,2	5
CV, %	22,6	6,9	56,4	11,6	27,9	17,0	59,2
P, %	4,5	1,4	11,3	2,3	5,6	3,4	11,8

Примечание: D_{1,3} – диаметр на высоте груди, см; H – высота дерева, м; ННК – высота начала кроны, м; НМК – высота максимального диаметра кроны; ДКВ – диаметр кроны в ряду, м; ДКМ – диаметр кроны между рядами, м; LB – расстояние между деревьями в рядах, м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Родин А. Р., Мерзленко М. Д. Лесоводственные основы выращивания культур кедров сибирского. М. : ВНИИЛМ, 2008. 256 с.
2. Петров А. П., Сидоров В. В. Эффективность различных способов подготовки почвы под создание культур кедров сибирского в Средней Сибири // Лесное хозяйство. 2020. № 3. С. 45–49.
3. Буторова О. Ф. Биоэкологические основы выращивания сеянцев и лесных культур в Восточной Сибири : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 1996. 44 с.
4. Буторова О. Ф. Применение крупномерного посадочного материала для ускорения лесовосстановления // Проблемы лесовосстановления в таежной зоне СССР. Красноярск, 1988. С. 38–40.
5. Перспективы выращивания сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) в условиях Крайнего Севера / Н. П. Братилова, Ю. Е. Щерба, А. В. Мантулина, Д. А. Коновалова // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42(2). С. 38–44.
6. Вараксин Г. С. Искусственное лесовосстановление в равнинных условиях южной тайги Сибири : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 2004. 40 с.
7. Лесной план Красноярского края на 2024–2033 гг. [Электронный ресурс]. Красноярск, 2024. URL: <http://mlx.krskstate.ru/lesplan?eyes=no>.
8. Вараксин Г. С., Вайс А. А., Валетчик М. Е. Рост культур кедров (*Pinus sibirica*), пройденных рубками ухода в таежной зоне // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений : сб. науч. материалов XVIII Междунар. науч. конф. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2025.
9. Вараксин Г. С. Лесные культуры в равнинной подзоне южной тайги Сибири. Красноярск : КрасГАУ ; Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2013. 251 с.
10. Вараксин Г. С., Поляков В. И., Петрова М. А. Оценка состояния и ход роста опытных культур ели и кедров в подзоне южной тайги Средней Сибири // Лесная таксация и лесоустройство. 2001. С. 18–23.
11. Вараксин Г. С., Лоскутов Р. И. Перспективный способ искусственного выращивания кедров сибирского // Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока : материалы Междунар. конф. ; Лесная Служба, Департамент Сельского Хозяйства США, Исследовательская Станция северо-запада, г. Портленд, шт. Орегон, США, 2000. С. 173–174.
12. Вараксин Г. С. Создание лесных культур в подзоне южной тайги Красноярского края : науч.-практ. рекомендации ; Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. Красноярск, 2000. 20 с.
13. Особенности формирования и роста хвойных культур в южно-таежной зоне Сибири / Г. С. Вараксин, В. И. Поляков, С. В. Инюшкин, М. Петрова // Лесной журнал. 2005. № 5. С. 12–20.
14. Состояние лесных культур кедров сибирского в горных условиях Хакасии / В. Н. Воробьев, И. А. Бех, В. В. Пинаев [и др.] // Лесное хозяйство. 2001. № 5. С. 32–34.
15. Дроздов И. И., Баранов М. И. Выращиваем кедр в Подмосковье // Лесное хозяйство. 1990. № 7. С. 53–54.

16. Ермоленко П. М., Кузьмичев В. В., Овчинникова Н. Ф. Рост культур кедров и пихты на этапе формирования // Лесное хозяйство. 2002. № 2. С. 36–39.
17. Сохранность лесных культур на рекультивируемом гранитном карьере / В. С. Котова, А. Е. Осипенко, Р. А. Осипенко, Л. А. Старыгин, С. В. Залесов // Хвойные бореальной зоны. 2025. 43(5). С. 43–51.
18. Лоскутов Р. И., Вараксин Г. С. Восстановление кедров сибирского на вырубках крупномерными саженцами // Лесное хозяйство. 1997. № 1. С. 24–25.
19. Масленков П. Г., Морозов А. В. Восстановление кедров сибирского в лесах низкогогорья Западного Саяна // Лесное хозяйство. 1999. № 2. С. 29–30.
20. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф. Особенности выращивания посадочного материала и лесных культур хвойных пород в Восточной Сибири. Красноярск : Изд-во КГТА, 1997. 200 с.
21. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Колосовский Э. В. Влияние сомкнутости полога древостоя на рост культур сосны кедровой сибирской (участок «Горный 2») / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. 208 с.
22. Огиевский В. В. Интенсивность роста культур кедров сибирского на территории Сибири // Воспроизводство лесов на Урале и в Западной Сибири. Свердловск, 1981. С. 56–59.
23. Приживаемость культур сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) в условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры / А. Е. Осипенко, Л. А. Белов, К. А. Башегуров, С. В. Залесов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27, № 5. С. 92–99.
24. Паневин В. С. Лесоводственная эффективность восстановления кедров на вырубках // Лесное хозяйство. 1989. № 5. С. 39–41.
25. Терехов Г. Г., Андреева Е. М., Стеценко С. К. Оценка культур кедров сибирского в конце первого класса возраста // Известия вузов. Лесной журнал. Вып. 6. 2021. С. 56–68.
26. Ширская М. Н. Лесоводственное обоснование культур кедров сибирского посадкой в горных лесах Сибири // Проблемы кедров : материалы Науч.-производств. конф. по комплексному использованию и воспроизводству кедровых лесов, 15–17 сентября 1959 г. Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1960. С. 169–174.
27. Анучин Н. П. Лесная таксация. М. : Лесная пром-ть, 1982. 550 с.
28. Гланц С. Медико-биологическая статистика / пер. с англ. М. : Практика, 1998. 459 с.
29. Ирошников А. И. Формирование и структура кедровых лесов Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск : Наука, 2007. 210 с.

REFERENCES

1. Rodin A. R., Merzlenko M. D. Lesovodstvenny'e osnovy` vy`rashhivaniya kul'tur kedra sibirskogo. M. : VNIILM, 2008. 256 s.
2. Petrov A. P., Sidorov V. V. E'ffektivnost' razlichny'x sposobov podgotovki pochvy` pod sozdanie kul'tur kedra sibirskogo v Srednej Sibiri // Lesnoe hozyajstvo. 2020. № 3. S. 45–49.
3. Butorova O. F. Bioe`kologicheskie osnovy` vy`rashhivaniya seyancev i lesny'x kul'tur v Vostochnom Sibiri : avtoref. dis. ... d-ra s.-x. nauk. Krasnoyarsk, 1996. 44 s.

4. Butorova O. F. Primenenie krupnomernogo posadochnogo materiala dlya uskoreniya lesovosstanovleniya // Problemy lesovosstanovleniya v taezhnoy zone SSSR. Krasnoyarsk, 1988. S. 38–40.
5. Perspektivy vy'rashhivaniya sosny' kedrovoj sibirskoj (*Pinus sibirica* Du Tour.) v usloviyax Krajnego Severa // N. P. Bratilova, Yu. E. Shherba, A. V. Mantulina, D. A. Konovalova // Xvojny'e boreal'noj zony'. 2024. T. 42, № 2. S. 38–44. URL: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-38-44>.
6. Varaksin G. S. Iskusstvennoe lesovosstanovlenie v ravninny'x usloviyax yuzhnoj tajgi Sibiri : avtoref. dis. ... d-ra s.-x. nauk. Krasnoyarsk, 2004. 40 s.
7. Lesnoj plan Krasnoyarskogo kraja na 2024–2033 gg. [Elektronnyj resurs]. Krasnoyarsk, 2024. URL: <http://mlx.krskstate.ru/lesplan?eyes=no> (data obrasheniya: 11.10.2025).
8. Varaksin G. S., Vajs A. A., Valetchik M. E. Rost kul'tur kedra (*Pinus sibirica*), projdenny'x rubkami uxoda v taezhnoy zone // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukciya drevesny'x rastenij : sb. nauch. materialov XVIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Krasnoyarsk : Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii im. akademika M. F. Reshetneva, 2025.
9. Varaksin G. S. Lesny'e kul'tury v ravninnoj podzone yuzhnoj tajgi Sibiri. Krasnoyarsk : KrasGAU ; Institut lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN, 2013. 251 s.
10. Varaksin G. S., Polyakov V. I., Petrova M. A. Ocenka sostoyaniya i xod rosta opy'tny'x kul'tur eli i kedra v podzone yuzhnoj tajgi Srednej Sibiri // Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo. 2001. S. 18–23.
11. Varaksin G. S., Loskutov R. I. Perspektivnyj sposob iskusstvennogo vy'rashhivaniya kedra sibirskogo // Mat. Mezhd. konf. «Kedrovo-shirokolistvenny'e lesa Dal'nego Vostoka» ; Lesnaya Sluzhba, Departament Sel'skogo Khozyajstva SSHA, Issledovatel'skaya Stanciya severozapada, g. Portlend, sht. Oregon, SSHA, 2000. S. 173–174.
12. Varaksin G. S. Sozdanie lesny'x kul'tur v podzone yuzhnoj tajgi Krasnoyarskogo kraja : nauch.-prakt. Rekomendacii ; In-t lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN. Krasnoyarsk, 2000. 20 s.
13. Osobennosti formirovaniya i rosta xvojny'x kul'tur v yuzhno-taezhnoy zone Sibiri / G. S. Varaksin, V. I. Polyakov, S. V. Inyushkin, M. Petrova // Lesnoj zhurnal. 2005. № 5. S. 12–20.
14. Sostoyanie lesny'x kul'tur kedra sibirskogo v gorny'x usloviyax Xakasii / V. N. Vorob'ev, I. A. Bex, V. V. Pinaev [i dr.] // Lesnoe khozyajstvo. 2001. № 5. S. 32–34.
15. Drozdov I. I., Baranov M. I. Vy'rashhivaem kedr v Podmoskov'e // Lesnoe khozyajstvo. 1990. № 7. S. 53–54.
16. Ermolenko P. M., Kuz'michev V. V., Ovchinnikova N. F. Rost kul'tur kedra i pixty' na e'tape formirovaniya // Lesnoe khozyajstvo. 2002. № 2. S. 36–39.
17. Soxrannost' lesny'x kul'tur na rekul'tiviruemom granitnom kar'ere // V. S. Kotova, A. E. Osipenko, R. A. Osipenko, L. A. Stary'gin, S. V. Zalesov // Xvojny'e boreal'noj zony'. 2025. T. 43, № 5. S. 43–51. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-5-43-51>.
18. Loskutov R. I., Varaksin G. S. Vosstanovlenie kedra sibirskogo na vy'rubkax krupnomerny'mi sazhencami // Lesnoe khozyajstvo. 1997. № 1. S. 24–25.
19. Maslenkov P. G., Morozov A. V. Vosstanovlenie kedra sibirskogo v lesax nizkogor'ya Zapadnogo Sayana // Lesnoe khozyajstvo. 1999. № 2. S. 29–30.
20. Matveeva R. N., Butorova O. F. Osobennosti vy'rashhivaniya posadochnogo materiala i lesny'x kul'tur xvojny'x porod v Vostochnoj Sibiri. Krasnoyarsk : Izd-vo KGTA, 1997. 200 s.
21. Matveeva R. N., Butorova O. F., Kolosovskij E'. V. Vliyanie somknutosti pologa drevostoya na rost kul'tur sosny' kedrovoj sibirskoj (uchastok «Gornyj 2»). Krasnoyarsk : Izd-vo SibGU im. M. F. Reshetneva, 2020. 208 s.
22. Ogievskij V. V. Intensivnost' rosta kul'tur kedra sibirskogo na territorii Sibiri // Vospriizvodstvo lesov na Urale i v Zapadnoj Sibiri. Sverdlovsk, 1981. S. 56–59.
23. Prizhivaemost' kul'tur sosny' kedrovoj sibirskoj (*Pinus sibirica* Du Tour.) v usloviyax Xanty'-Mansijskogo avtonomnogo okruga – Yugry' / A. E. Osipenko, L. A. Belov, K. A. Bashegurov, S. V. Zalesov // Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin, 2023. T. 27, № 5. S. 92–99. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-92-99.
24. Panevin V. S. Lesovodstvennaya e'ffektivnost' vosstanovleniya kedra na vy'rubkax // Lesnoe khozyajstvo. 1989. № 5. S. 39–41.
25. Terexov G. G., Andreeva E. M., Stecenko S. K. Ocenka kul'tur kedra sibirskogo v konce pervogo klassa vozrasta // Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal. Vy'p. 6. 2021. S. 56–68. doi:10.37482/0536-1036-2021-6-56-68.
26. Shirskaya M. N. Lesovodstvennoe obosnovanie kul'tur kedra sibirskogo posadkoj v gorny'x lesax Sibiri // Problemy kedra: materialy' nauchno-proizvodstvennoj konferencii po kompleksnomu ispol'zovaniyu i vospriizvodstvu kedrov'x lesov, 15–17 sentyabrya 1959 g. Novosibirsk : Izd-vo SO AN SSSR, 1960. S. 169–174.
27. Anuchin N. P. Lesnaya taksaciya. M. : Lesnaya prom-t', 1982. 550 s.
28. Glancz S. Mediko-biologicheskaya statistika / per. s angl. M., Praktika, 1998. 459 s.
29. Iroshnikov A. I. Formirovanie i struktura kedrov'x lesov Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirsk : Nauka, 2007. 210 s.

© Вараксин Г. С., Валетчик М. Е., Вайс А. А., 2026

Поступила в редакцию 03.12.2025

Принята к печати 27.04.2026

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ЕЛИ В СТАРОВОЗРАСТНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ

Д. В. Татарников

Институт лесоведения РАН

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

Аннотация. В трех старовозрастных березняках-черничниках со вторым ярусом из первого поколения подпологовой ели зафиксировано появление второго поколения ели. По мере старения березы и изреживания ели первого поколения условия под их пологом улучшаются, вследствие чего число выживающих семян ели постепенно растет. Плотный кустарничковый и моховой покров препятствует успешному приживанию елового самосева, тогда как участки с голой и нарушенной подстилкой выживанию семян благоприятствуют. Рост елового возобновления под материнским пологом очень медленный. Второе поколение ели в свой начальный период жизни растет в семь-девять раз медленнее, чем первое поколение ели росло под пологом березы в тот же период жизни.

Ключевые слова: возобновление ели, всходы ели, самосев ели, возрастная динамика древостоев, производные березняки, поколения ели.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 76–81

FEATURES OF THE SECOND GENERATION OF SPRUCE IN OLD-AGED BIRCH FORESTS

D. V. Tatarnikov

Institute of Forest Science of Russian Academy of Sciences

21, Sovetskaya Str., Uspenskoe, Odintsovo district, Moscow region, 143030, Russian Federation

Abstract. In three old-aged birch forests with second tree layer of spruce of first generation the spruce recruitment of second generation was discovered. The conditions under wood canopy become better as birch ages and the second layer of spruce is thinning. The quantity of survived spruce seedlings is increasing as a consequence of such age-related dynamic of the birch forests. Dense dwarf shrub and moss cover interferes the successful survival of spruce seedlings, bare and disturbed litter improves it. The growth of the young spruces of second generation beneath maternal canopy is very slow. It was in seven-nine times slower than the growth of the spruces of first generation under birch canopy at early period of their life.

Keywords: spruce recruitment, spruce seedlings, young spruce development, age-related dynamic of forests, secondary birch forests, spruce generations.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе многолетних исследований возрастной динамики производных березняков в южной тайге выявлено образование второго поколения подпологовой ели (*Picea abies*) в старовозрастных березняках, двух-ярусные древостои которых составляют первый ярус березы (*Betula pendula*) и второй ярус из подпологовой ели первого поколения. Появление нового поколения ели связано с началом активного семеношения ели первого поколения. Несмотря на значительную смертность самосева ели в первые годы жизни, его выживаемость существенно выше, чем в средневозрастных березняках с сомкнутым пологом елового подраста, и постепенно в фитоценозе происходит накопление молодых экземпляров елового подраста второго поколения. Наблюдаемый процесс является началом формирования устойчивого круговорота поколе-

ний коренной породы еще до окончания демулационной смены пород и образования ельника на месте производного березняка. Длительный период наблюдений за появлением, выживанием и ростом елового самосева (в первом учете – возрастом до десяти лет) на постоянных пробных площадях – с 1995 до 2024 годов, позволил выявить возрастную структуру и закономерности роста второго поколения ели в его первый сорокалетний возрастной интервал. Поскольку в разновозрастных коренных лесах отдельные поколения деревьев выделяют по их принадлежности к сорокалетним возрастным интервалам, то полученные результаты позволяют увидеть в деталях, как выглядит на первой возрастной ступени своего существования поколение ели, образовавшееся под пологом уже сформировавшегося елового яруса древостоя.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования возрастной динамики производных березняков проводятся в южной тайге Рыбинского района Ярославской области на объектах лесной опытной станции Института лесоведения РАН с 1992 года. В частности в старовозрастных березняках-черничниках с сомкнутым на большей части однородных выделов вторым ярусом ели в 1995 году были заложены три пробные площади размером 0,33, 0,14 и 0,14 га (пп17,18,19). Таксационные характеристики древостоев на этих пробах при первом и третьем (2015) учетах приведены в табл. 1. Возраст березы на пробах варьирует от 93 до 74 лет, тогда как средний возраст ели, образующей второй ярус, практически одинаковый – 69–67 лет. Хотя поселение ели под пологом березняка процесс растянутый во времени, вариация возраста ели второго яруса небольшая, составляя чуть больше 20 лет, так что основная часть экземпляров (92 %) относится к одному классу возраста [5].

Различная скорость роста первого поколения ели отчасти связана с разным временем его поселения в березняке. В процессе возрастного развития одно-возрастных древостоев их конкурентное воздействие на подчиненные ярусы постепенно ослабевает, поэтому чем позже поселяется ель под пологом березового древостоя, тем меньшее сдерживающее влияние со стороны березы она испытывает. Период возобновления ели на пп17 (разность возраста березы и ели первого поколения) – 14 лет, а на пп19 – всего 7 лет. Кроме того, условия роста на пп17 лучше – рядом с ней протекает ручей, тогда как пп18 и пп19 находятся на небольших возвышениях возле заболоченных западин. Хотя по характеру травяно-кустарничкового покрова все три пробы – это типичные свежие черничники.

Основной доминант – черника (*Vaccinium myrtillus*), образующая местами сомкнутые заросли. Часто встречаются виды бореального мелкотравья (*Trientalis europaea*, *Majanthemum bifolium*, *Oxalis acetosella*, *Luzula pilosa*, *Gymnocarpium dryopteris*, *Orthilia secunda*, *Linnaea borealis*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), щитовники (*Dryopteris spinulosa*, реже *Dryopteris austriaca*), костяника (*Rubus saxatilis*). В хорошо развитом моховом покрове доминируют кукушкин лен (*Polytrichum commune*) и зеленые таежные мхи (*Pleurozium schreberi*, *Dicranum scoparium*, *Dicranum polysetum*, реже *Rhytidiadelphus triquetrus*, *Hylocomium splendens*), по микрозападинам встречается *Sphagnum girgensohnii*. Подлесок практически отсутствует. Отдельные чахлые рябины высотой до 2 метров систематически объединяются лосем. На части пп17 в момент закладки отмечено некоторое количество древовидной рябины, которая потом полностью выпала из состава фитоценоза.

Сомкнутость травяно-кустарничкового и особенно мохового покрова наибольшая на пп18, которая с трех сторон окружена разреженными березняками по сфагновым западинам, что создает благоприятный световой режим под пологом древостоя из-за значительного бокового осветления. Условия для приживания всходов ели на этой пробе наименее благоприят-

ные из-за высокой плотности мохового покрова. Напротив, на пп19 в центре площади имеются обширные участки голой подстилки, почти лишенной живого покрова. Очевидно, что высокая сомкнутость елового подростка в прошлом обусловила образование под ним мертвопокровных участков. Рост и изреживание первого поколения ели протекают на этой пробе с меньшей скоростью, и только недавно нижние части крон растущих елей оторвались от поверхности земли. Условия под пологом улучшились, а кустарнички, лесные травы и мхи еще не успели разрастись на голых участках подстилки. Эти участки наиболее благоприятны для успешного елового возобновления.

На пп17 на некоторых участках подстилка была содрана до минерального горизонта (кабаны порои), что произошло уже после закладки пробы. На таких участках и начальное число всходов ели в год появления, и их выживаемость в первые годы жизни были заметно выше, чем на участках с ненарушенной подстилкой. Но повторные порои на тех же участках практически нивелировали разницу с участками ненарушенными [7]. Для части пробы, где локализованы порои, на момент закладки было отмечено существенное участие древовидной рябины, составлявшей с елью общий сомкнутый полог. Но затем она полностью выпала как вследствие достижения ею предельного возраста, так и вследствие ухудшения условий ее существования, вызванного продолжающимся ростом елей. Световой режим у поверхности подстилки вследствие массового отмирания рябины стал лучше. Никаких других фитоценологических или флористических особенностей у участков, где локализованы кабаны порои, не отмечено.

Можно добавить, что совокупное проективное покрытие поверхности кустарничками, травами и мхами составляет на пп17 40–70 %, на пороях не более 20 %; на пп18 70–100 %; на пп19 40–70 %, на бывших мертвопокровниках 10–30 %.

Методика учета предполагала нумерацию всех экземпляров древесных пород высотой более 10 см на момент закладки проб для их повторных учетов. Еловые всходы и самосев, а также их последующие выживание и рост учитывались на учетных лентах метровой ширины, отбитых колами в пределах проб. Общая площадь всех лент составляла 8 % от площади каждой пробы. Расположение обнаруженных всходов и самосева ели на лентах фиксировалось для точности повторных учетов. У каждого экземпляра определялись возраст и высота, при повторных учетах прирост в высоту за последние пять лет, а при наличии развитой кроны ее диаметр, что наилучшим образом характеризовало жизненное состояние молодой ели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все еловое возобновление появляется в годы массового появления всходов, следующие сразу за семенными годами. В период наблюдений и в течение 10 лет перед ним [1] появление еловых всходов происходило в следующие годы: 1985, 1989, 1993, 1997, 2000, 2004, 2008, 2012, 2015, 2017, 2021, 2022. В большинстве случаев появлялись единичные всходы, от которых из-за высокой смертности в первые

годы жизни почти ничего не оставалось. Наиболее массово всходы появлялись в 1997, 2008 и 2015 годах. Таким образом, еловое возобновление разделяется на отдельные генерации по году своего появления.

Подробности текущего возобновления ели и детали роста молодых еловых семян были уже описаны ранее [7]. В данной статье внимание будет сосредоточено на результате – формировании второго поколения ели под пологом первого и влиянии на этот процесс возрастных изменений древостоев.

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ ЕЛОВОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ

Условия появления всходов ели в старовозрастных березняках не остаются неизменными. Древостой березы стареет, его рост замедляется, начинается распад. Второй ярус ели активно изреживается. Эти изменения положительно сказываются на выживаемости всходов. Взросление ели первого поколения ведет к активизации ее семеношения, что вызывает увеличение числа появляющихся всходов после семенных лет. На примере численности елового самосева самых массовых генераций в восьмилетнем возрасте можно видеть наблюдаемую динамику елового возобновления (табл. 2). На пп17 виден ступенчатый рост числа елового самосева, на пп19 численность выживающего к восьми годам елового возобновления растет непрерывно. На пп18 изменения в древостое сnivelированы наличием выраженного бокового осветления и высокой плотностью кустарничкового и мохового покрова.

Наблюдаемая картина результат совместного действия трех факторов: обильности семеношения первого поколения ели, степени всхожести семян и выживаемости елового самосева в первые годы жизни.

В 2015 году удалось определить число всходов в год их массового появления в старовозрастных березняках, оценивая отдельно массовость появления всходов. В пересчете на гектар на пп17 появилось 122 тысячи всходов ели, на пп19 – 61 тысяча, а на пп18 – только 15.6 тысяч. Роль плотного напочвенного покрова и подстилки в подавлении прорастания семян ели отражает сравнение числа появившихся всходов ели на пп17 на участках с нарушенной подстилкой (порои кабанов) – 265 тысяч шт/га и на ненарушенных участках – 56 тысяч шт/га. Последнее значение близко к полученному на пп19.

Динамика выживаемости массовых генераций с трех до девяти лет (генерации 2008 и 2015 годов) и с 8 до 16 лет (генерации 1997 и 2008 годов) в старовозрастных березняках приведена в табл. 3 и 4.

Так, на пп17 условия выживаемости елового самосева остаются стабильными: за период 2011–2017 выжило 18 % экземпляров генерации 2008 года, за период 2018–2024 выжило 17 % экземпляров генерации 2015 года. Относительно низкая сохранность елового возобновления на этой пробе связана с вторными пороями на участках, где оказались сконцентрированы еловые всходы. По мере взросления молодых елей их устойчивость растет. В возрасте от 8 до 16 лет в период 2005–2013 выживает 40 % елового самосева генерации 1997 года, в период 2016–2024 выжило 47 % экземпляров генерации 2008 года. Особенно высокие показатели выживаемости отмечены на пп19 за счет участков с сильно разреженным живым напочвенным покровом. А на пп18 при невысокой общей численности елового возобновления его выживаемость за время наблюдений снижается.

Таблица 1

Таксационные характеристики древостоев старовозрастных березняков при первом (1995) и третьем (2015) учетах

Порода	Возраст, лет	Густота, штга ⁻¹	Высота, м	Диаметер, см	Запас, м ³ га ⁻¹	Порода	Возраст, лет	Густота, штга ⁻¹	Высота, м	Диаметер, см	Запас, м ³ га ⁻¹
1995 г.						2015 г.					
Пп 17											
Береза	93	310	27	31	270	Береза	113	175	29.6	34.8	209
Осина	93	30	26.9	33.4	32	Осина	113	20	29.6	38.6	37
Ель	69	730	14.6	14.2	84	Ель	89	540	17.9	18.6	128
Пп 18											
Береза	80	420	26.4	29.6	327	Береза	100	260	29.1	35	329
Осина	80	15	26.5	30.3	12	Осина	100	10	29.1	39.2	18
Ель	69	960	12.8	12.3	74	Ель	89	880	15.3	14.5	127
Пп 19											
Береза	74	580	25.4	22.2	245	Береза	94	360	29.1	26.4	244
Ель	67	980	13.7	11.8	74	Ель	87	670	15.9	15.1	94

Таблица 2

Динамика обилия елового самосева массовых генераций 1997, 2008 и 2015 годов в возрасте восемь лет в старовозрастных березняках со вторым еловым ярусом

Годы	2005	2016	2023
Пп 17			
Возраст березы, лет	103	114	121
Возраст ели 2 яруса, лет	79	90	97
Генерация	1997	2008	2015
Штга ⁻¹	2000	13440	11350

Окончание табл. 2

Годы	2005	2016	2023
Пп 18			
Возраст березы, лет	90	101	108
Возраст ели 2 яруса, лет	79	90	97
Генерация	1997	2008	2015
Штга ⁻¹	2460	1000	2700
Пп 19			
Возраст березы, лет	84	95	102
Возраст ели 2 яруса, лет	77	88	95
Генерация	1997	2008	2015
Штга ⁻¹	760	4150	18800

Таблица 3

Сохранность елового самосева генераций 2008 и 2015 годов за период с трех до девяти лет их жизни в старовозрастных березняках со вторым еловым ярусом

Годы	2011	2017		2018	2024	
Пп 17						
Возраст березы, лет	109	115		116	122	
Возраст ели 2 яруса, лет	85	91		92	98	
Генерация 2008 года			сохранность	Генерация 2015 года		сохранность
Штга ⁻¹	42200	7680	18 %	44100	7550	17 %
Пп 18						
Возраст березы, лет	96	102		103	109	
Возраст ели 2 яруса, лет	85	91		92	98	
Генерация 2008 года			сохранность	Генерация 2015 года		сохранность
Штга ⁻¹	1530	920	60 %	6120	2140	35 %
Пп 19						
Возраст березы, лет	90	96		97	103	
Возраст ели 2 яруса, лет	83	89		90	96	
Генерация 2008 года			сохранность	Генерация 2015 года		сохранность
Штга ⁻¹	5150	3850	71 %	28500	17000	60 %

Таблица 4

Сохранность елового самосева генераций 1997 и 2008 годов за период с 8 до 16 лет их жизни в старовозрастных березняках со вторым еловым ярусом

Годы	2005	2013		2016	2024	
Пп 17						
Возраст березы, лет	103	111		114	122	
Возраст ели 2 яруса, лет	79	87		90	98	
Генерация 1997 года			сохранность	Генерация 2008 года		сохранность
Штга ⁻¹	2000	810	40 %	13440	6260	47 %
Пп 18						
Возраст березы, лет	90	98		101	109	
Возраст ели 2 яруса, лет	79	87		90	98	
Генерация 1997 года			сохранность	Генерация 2008 года		сохранность
Штга ⁻¹	2460	1230	50 %	1000	380	38 %
Пп 19						
Возраст березы, лет	84	92		95	103	
Возраст ели 2 яруса, лет	77	85		88	96	
Генерация 1997 года			сохранность	Генерация 2008 года		сохранность
Штга ⁻¹	760	600	79 %	4150	2400	58 %

ОСОБЕННОСТИ РОСТА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ЕЛИ

Рост елового возобновления под материнским пологом очень сильно отличается как от свободного роста молодых елей на открытых участках, так и от роста первого поколения ели, поселившегося под пологом производных древостоев светолюбивых пород. Характерной чертой новых поколений в разновозрастных ельниках является их крайне медленный рост в

начальный период жизни. Анализ хода роста деревьев господствующих поколений в древостоях разновозрастных ельников показал, что для их подавляющего числа характерен длительный начальный период депрессии роста [2]. Условия существования молодых елей под многослойным материнским пологом крайне неблагоприятные, наилучшей стратегией выживания оказывается минимальная активность жизнедеятельности и роста в ожидании внезапного улучшения

локальных условий в результате нарушений: гибели отдельных взрослых деревьев и появления разрывов в материнском пологе. Появляющееся второе поколение ели в старовозрастных березняках под пологом сомкнутого второго яруса ели оказывается в похожих условиях существования и обнаруживает схожие особенности роста.

Если в средневозрастных березняках растущий под пологом березы еловый подрост первого поколения к тридцати годам имеет среднюю высоту около трех метров [3], то самая старая массовая генерация второго поколения ели под пологом двухярусных березово-еловых древостоев к 27 годам жизни достигает в среднем всего 30–40 см высоты (табл. 5). Это дает ежегодный прирост в высоту у второго поколения ели в семь-девять раз меньше, чем у первого. Близкие значения зафиксированы для возобновления ели в коренных разновозрастных лесах [2; 6].

Таблица 5

Параметры еловых сеянцев генераций 1997, 2004 и 2008 годов в 2024 году: средняя высота, средний ежегодный прирост в высоту, диапазон высот, средний диаметр крон, число экземпляров

Генерация	1997	2004	2008
Возраст, лет	27	20	16
Пп17			
H, см	40.5	–	25.4
dH, см	1.5	–	1.6
H min – H max, см	22-78	–	14-47
Диаметр крон, см	35	–	18
N, шт	15	–	184
Пп18			
H, см	30.5	–	20
dH, см	1.1	–	1.25
H min – H max, см	20-58	–	14-24
Диаметр крон, см	24	–	12
N, шт	13	–	5
Пп19			
H, см	31.8	31.6	26.8
dH, см	1.2	1.6	1.7
H min – H max, см	27-43	18-65	15-50
Диаметр крон, см	35	30	21
N, шт	4	12	31

Сравнение разных генераций и пробных площадей показывает, что рост в высоту второго поколения ели на пп17 стабильно лучше, чем на пп18, а на пп19 происходит значительное ускорение роста более молодых генераций 2004 и 2008 годов в сравнении с генерацией 1997 года, что указывает на значительное улучшение условий для елового самосева. Рост в высоту генерации 1997 года на пп19 соответствует уровню пп18, тогда как рост в высоту следующих генераций 2004 и 2008 годов уже соответствует уровню пп17.

Дальнейшие перспективы роста выживших еловых сеянцев более благоприятны ввиду происходящих возрастных изменений в древостоях: распад березового древостоя и изреживание елового яруса ведут к улучшению условий под их пологом, а из-под влияния живого напочвенного покрова уцелевшие сеянцы старших генераций уже вышли. Но для новых генераций ситуация не так однозначна, так как более плот-

ные заросли кустарничков и моховой покров, характерные для разреженных древостоев, существенно подавляют как всхожесть семян ели, так и выживаемость елового самосева в первые годы жизни. Роль трав в черничном типе леса в подавлении роста елового возобновления несущественна, за исключением папоротников. Обилие разлагающихся крупных древесных остатков вследствие массового отпада березы создает множество благоприятных локаций, где еловый самосев может избегать неблагоприятного влияния густого кустарничкового и мохового покрова [4].

СТРУКТУРА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ЕЛИ

Еловые сеянцы до 10 лет нами отнесены к самосеву, так как из-за медленного роста к 10 годам они едва достигают 10 см высоты и еще не имеют развитой кроны – нескольких боковых побегов, направленных в разные стороны. Более старшие экземпляры отнесены к подросту.

На пп17 в 2024 году второе поколение ели было представлено подростом в числе 6870 шт/га и самосевом в числе 10780 шт/га. Возрастная структура второго поколения следующая: экземпляры возрастом 27 лет – 510 шт/га, 20 лет 100 шт/га, 16 лет 6260 шт/га, 9 лет 7550 шт/га, 2–3 года 3230 шт/га. Имеются также единичные экземпляры возрастом 39 лет (генерация 1985 года) в числе менее 100 шт/га.

На наименее продуктивной несмотря на боковое освещение пп18 второе поколение ели в 2024 году было представлено подростом в числе 1530 шт/га и самосевом в числе 9780 шт/га. Возрастная структура второго поколения ели: 27 лет 1000 шт/га, 20 лет 150 шт/га, 16 лет 380 шт/га, 9 лет 2140 шт/га, 2–3 года 7640 шт/га.

На пп19 второе поколение ели в 2024 году составляли подрост в числе 3700 шт/га и самосев в числе 22620 шт/га. Возрастная структура второго поколения: 27 лет 380 шт/га, 20 лет 920 шт/га, 16 лет 2400 шт/га, 9 лет 17100 шт/га, 2–3 года 5520 шт/га.

Так как экземпляры, появившиеся ранее 1997 года, в составе второго поколения ели практически отсутствуют, то очевидно до полного формирования первой 40-летней возрастной ступени поколения ели, появившегося под сомкнутым материнским пологом, требуется еще примерно десять лет. Формирование второго поколения ели под пологом первого на всех трех пробных площадях начинается после достижения елью первого поколения среднего возраста 70 лет.

Для горизонтально сомкнутых ельников, находящихся в процессе формирования устойчивого круговорота поколений, указывается, что после достижения еловым возобновлением возраста 30 лет популяционные волны затухают, так как количество локаций, пригодных для выживания елового подростка, в таких фитоценозах очень мало [4]. Такое представление в данном случае применимо для елового возобновления в более ранний период, когда ель первого поколения была сомкнута на большей части площади. Действительно, экземпляры елового подростка более старших возрастов встречаются единично. Изреживание первого поколения ели в старовозрастных березняках сделало условия более неоднородными, что

привело к значительному увеличению выживаемости елового самосева в фитоценозе. Это особенно заметно для пп19 (табл. 2). Поэтому затухания популяционных волн в изученных фитоценозах не наблюдается. Такая картина более характерна для низкополнотных коренных ельников, где неоднородность полога обеспечивает большее количество локаций, пригодных для выживания елового подроста [6].

В дальнейшем условия существования второго поколения ели будут улучшаться в результате распада березы и разреживания елового яруса первого поколения. Доля семян более поздних лет появления в составе второго поколения будет выше, сорокалетняя возрастная ступень подпологового поколения ели будет состоять преимущественно из экземпляров младшего класса возраста. Рост семян, появившихся позднее, может быть менее подавлен, так что разница между сеянцами, появившимися в разные годы в течение сорокалетнего возрастного интервала, может быть сnivelирована из-за постепенного улучшения условий их существования. Отдельные сеянцы, оказавшиеся в локациях, где вследствие распада древостоя образовались разрывы в сомкнутом пологом, могут резко ускорить свой рост, что приведет к увеличению различий между сеянцами, появившимися одновременно. Связь высоты с возрастом станет слабее из-за разной скорости роста экземпляров одной генерации, что очень характерно для поколений ели в разновозрастных коренных лесах [2].

ВЫВОДЫ

Появление второго поколения подпологовой ели в старовозрастных березняках отмечается после достижения первым поколением ели 70-летнего возраста.

По мере старения древостоя березы и изреживания второго яруса, образованного первым поколением ели, условия под их пологом улучшаются, что ведет к увеличению выживаемости еловых семян в первые годы жизни. В результате число экземпляров второго поколения ели в ходе возрастного развития старовозрастных березняков растет.

Плотный кустарничковый и моховой покров препятствует прорастанию еловых семян и выживанию елового самосева, тогда как наличие участков с голой (мертвопокровники) и нарушенной подстилкой (порой) выживанию елового самосева благоприятствует.

Рост второго поколения ели под многослойным пологом медленный. Средний прирост в высоту в первые десятилетия жизни экземпляров второго поколения ели в семь-девять раз меньше, чем у ели первого поколения в тот же возрастной период, растущего в том же березняке. У экземпляров второго поколения ели отчетливо выражена депрессия роста в на-

чальный период жизни, характерная для елового возобновления, растущего под материнским пологом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Глазов М. В. Роль животных в экосистемах еловых лесов. М. : Пасва, 2004. 240 с.
2. Дыренков С. А. Структура и динамика таежных ельников. Л. : Наука, 1984. 174 с.
3. Комплексные стационарные исследования в лесах южной тайги (Памяти М. В. Рубцова). М. : КМК, 2017. 348 с.
4. Пугачевский А. В. Ценопопуляции ели: структура, динамика, факторы регуляции. Минск : Наука и техника, 1992. 204 с.
5. Рубцов М. В., Дерюгин А. А. Динамика возрастной структуры популяции ели под пологом южнотаетежных березняков русской равнины // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 1-2. С. 9–14.
6. Стороженко В. Г. Коренные девственные ельники как эталоны биоразнообразия и устойчивости зональных формаций // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. XXXVII, № 1. С. 55–60.
7. Татарников Д. В. Текущее возобновление ели в производных южнотаетежных фитоценозах в ходе демутационных сукцессий // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. XXXVII, № 6. С. 432–442.

REFERENCES

1. Glazov M. V. Rol' zhivotnykh v ekosistemakh elovykh lesov. Moscow : Pas'va, 2004. 240 p.
2. Dyrenkov S. A. Struktura i dinamika taezhnykh el'nikov. Leningrad : Nauka, 1984. 174 p.
3. Kompleksnye statsionarnye issledovaniya v lesakh yuzhnoi taigi (Pamyati M. V. Rubtsova). Moscow : KMK, 2017. 348 p.
4. Pugachevskii A. V. Tsenopopulyatsii eli: struktura, dinamika, faktory regul'yatsii. Minsk : Nauka i tekhnika, 1992. 204 p.
5. Rubtsov M. V., Deryugin A. A. Dinamika vozrastnoi struktury populyatsii eli pod pologom yuzhnotaezhnykh bereznyakov russkoi ravniny // Khvoynye boreal'noi zony. 2013. Vol. XXXI. № 1-2. P. 9–14.
6. Storozhenko V. G. Korennye devstvennye el'niki kak etalony bioraznoobraziya i ustoichivosti zonal'nykh formatsii // Khvoynye boreal'noi zony. 2019. Vol. XXXVII, № 1. P. 55–60.
7. Tatarnikov D. V. Tekushchee vozobnovlenie eli v proizvodnykh yuzhnotaezhnykh fitotsenozakh v khode demutatsionnykh suktsessii // Khvoynye boreal'noi zony. 2019. Vol. XXXVII, № 6. P. 432–442.

© Татарников Д. В., 2026

ДИНАМИКА РОСТА СМЕШАННЫХ ХВОЙНЫХ КУЛЬТУР К. Ф. ТЮРМЕРА

П. Г. Мельник^{1,2}, Н. Ю. Насыпайко³, М. Д. Мерзленко²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) – Мытищинский филиал,
Российская Федерация, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1

²Институт лесоведения РАН

Российская Федерация, 140030, Московская обл., с. Успенское, ул. Советская, 21

³ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»,
Российская Федерация, 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, 15

E-mail: melnik_petr@bk.ru

Аннотация. Приведены результаты многолетнего опыта выращивания смешанных лесных культур из лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.), сосны обыкновенной и ели европейской в западном Подмосковье. Насаждение создано в 1870 г. лесоводом-классиком Карлом Францевичем Тюрмером на территории Порецкой лесной дачи графа Алексея Сергеевича Уварова. Изучением хода роста этого долговременного опыта регулярно занимались лесоводы разных поколений. В настоящее время искусственный древостой перешигнул полутораветковой рубеж. Благодаря изначально большому размеру постоянной пробной площади, были проанализированы изменения в распределении деревьев лиственницы европейской по ступеням толщины за последние 53 года. В древостое просматривается наличие очень крупных стволов деревьев, максимальная ступень толщины в 101-летних культурах составила 64 см, а в 154-летних – 80 см. Исследования показали достижение этими смешанными лесными культурами к VIII классу возраста очень высоких запасов стволовой древесины, превышающих 1400 м³/га, не считая поступлений от рубок промежуточного пользования. Сосна обыкновенная в 130-летнем возрасте полностью выпадает из состава смешанных хвойных лесных культур. Ель европейская изначально отставала в росте по высоте от лиственницы европейской. Однако в отличие от ели второго яруса, рост по высоте ели первого яруса был стабильно синхронен (особенно в возрасте 50–110 лет) по отношению к положу лиственницы. Как компонент искусственного дендроценоза, ель положительно укрепляет вертикальный профиль насаждения. Лиственница европейская в сочетании с елью европейской формирует долговечные, высокопроизводительные, устойчивые искусственные древостои.

Ключевые слова: Карл Францевич Тюрмер, лиственница европейская, *Larix decidua* Mill., сосна обыкновенная, ель европейская, тип лесных культур, динамика роста, лесоводственный эффект, интродукция.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 82–88

DYNAMICS OF GROWTH OF MIXED CONIFEROUS CROPS BY K. F. TYURMER

P. G. Melnik^{1,2}, N. Yu. Nasypayko³, M. D. Merzlenko²

¹Bauman Moscow State Technical University (National Research University) – Mytishchi branch
1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russian Federation

²Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences,
21, Sovetskaya St., 140030, Uspenskoe, Moscow reg., Russian Federation

³All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization
15, Institutskaya str., Pushkino, Moscow region, 141202, Russian Federation

E-mail: melnik_petr@bk.ru

Abstract. The results of many years of experience in growing mixed forest crops from European larch (*Larix decidua* Mill.), Scots pine and European spruce in the western Moscow region are presented. The plantation was created in 1870 by the classic forester Karl Frantsevich Tyurmer on the territory of the Poretskaya Lesnaya Dacha (Forest Estate) of Count Alexei Sergeevich Uvarov. Foresters of different generations regularly studied the growth of this long-term experience. Currently, the artificial stand has crossed the century-and-a-half milestone. Due to the initially large size of the permanent sample area, changes in the distribution of European larch trees by thickness over the past 53 years have been analyzed. The tree stand shows the presence of very large tree trunks, the maximum thickness in 101-year-old crops was 64 cm, and in 154-year-old crops – 80 cm. Studies have shown that these mixed forest crops have reached very high stocks of stem wood by age class VIII, exceeding 1400 m³/ha, not counting

revenues from logging of intermediate use. At the age of 130, the common pine completely falls out of the composition of mixed coniferous forest crops. The European spruce initially lagged behind the European larch in height. However, unlike the spruce of the second tier, the growth in height of the spruce of the first tier was consistently synchronous (especially at the age of 50–110 years) with respect to the canopy of the larch. As a component of artificial dendrocenosis, spruce positively strengthens the vertical profile of the plantation positively. European larch in combination with European spruce forms durable, high-performance, stable artificial stands.

Keywords: Karl Frantsevitch Tyurmer, European larch, *Larix decidua* Mill., Scots pine, European spruce, forest plantation type, growth dynamics, silvicultural effect, species introduction.

ВВЕДЕНИЕ

При создании смешанных насаждений подбирают породы, благоприятно влияющие друг на друга, или, по крайней мере, смягчающие остроту конкуренции, особенно остроту конкуренции второстепенных пород по отношению к главной. Если избранные породы соответствуют условиям местообитания и сочетание их удачное, можно достигнуть повышения продуктивности, устойчивости насаждений против вредных влияний и в ряде случаев улучшения качества древесины [15]. Выдающийся лесовод П. С. Погребняк на V Всемирном Лесном конгрессе в США, широко пропагандировал отечественный опыт создания смешанных насаждений для международного применения, аргументируя тем, что: «...лесоводство располагает более широкими, чем агрономия, перспективами для использования отношений между растениями в интересах повышения их продуктивности» [15].

В Московской области высокопроизводительные смешанные насаждения лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) с елью и сосной, создавались лесоводом К. Ф. Тюрмером начиная с 50-х годов XIX века в Порецкой лесной даче графа А. С. Уварова по сельскохозяйственному пользованию на выпашанных почвах [23]. Деятельность лесничего К. Ф. Тюрмера – это тот эталон, который отражает должную суть профессиональной деятельности лесовода и является образцом классического ведения лесного хозяйства в средней полосе России [9]. К. Ф. Тюрмер – питомец классического немецкого лесоводства – не последовал в своей лесохозяйственной деятельности господствующему в Германии шаблону, а разнообразил технические приемы и типы создаваемых искусственных насаждений в зависимости от условий местопроизрастания и биологических особенностей пород. Почти все его искусственные насаждения лиственницы были смешанными, состоящими из двух-трех хвойных пород [7]. Этот бесценный опыт изучался на протяжении полутора века многими поколениями лесоводов и показал успешный рост, высокую продуктивность и устойчивость разнообразных типов лесных культур [8; 19; 20; 23; 26]. Особенно удачным оказался тип лиственнично-еловых лесных культур с пониженной густотой посадки, который способствует формированию высокопроизводительных насаждений, достигающих к VIII–IX классам возраста запаса стволовой древесины свыше 1400 м³/га [12].

Лиственница в пределах Центрального федерального округа (ЦФО), на территории Брянской, Владимирской, Воронежской, Калужской, Курской, Липецкой, Московской, Орловской, Рязанской, Смоленской, Тамбовской, Тверской, Тульской и Ярославской об-

ластей является интродуцентом, по данным Государственного лесного реестра на 01.01.2023 г. она представлена в лесных культурах на площади 6,6 тыс. га. Первый успешный опыт интродукции лиственницы в Центральной России был заложен ещё в 1840 году в лесной даче «Загон» Смоленской губернии [10]. В условиях Подмоскovie лиственница произрастает на площади 2,2 тыс. га и характеризуется устойчивостью [22; 25], быстрым ростом [5; 8], высокой продуктивностью [11; 16; 22], а также имеет качественную древесину [3; 23]. Прекрасный ход естественного возобновления лиственницы европейской за пределами ареала распространения говорит об устойчивости и жизнеспособности интродуцента в новых условиях [4; 6]. Явное преимущество в депонировании углерода лиственницы европейской перед такой коренной породой, как сосна обыкновенная, которое выражается фактически двукратным превышением по накопленному углероду, свидетельствует о весьма желательном использовании лиственницы в качестве ценного интродуцента для создания лесных культур [13]. Несмотря на успешный 185-летний опыт интродукции лиственницы в центре Русской равнины, результаты его оказались совершенно не востребованными в последние десятилетия, во всех субъектах ЦФО лесные культуры лиственницы, за исключением отдельных экспериментов [2], не создаются.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является анализ динамики роста, состояния и производительности смешанных хвойных лесных культур VIII класса возраста лесовода К. Ф. Тюрмера в условиях западного Подмоскovie.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения лесоводственного опыта К. Ф. Тюрмера, осенью 2024 г. были проведены исследования на постоянной пробной площади (ППП 1Т), заложенной в 1963 году профессором В. П. Тимофеевым, в лиственнично-сосново-еловом типе лесных культур. Насаждение произрастает на мощнодерновом среднеподзоленном опесчанном среднем суглинке, подстилаемом карбонатной мореной, в кислом типе леса. Тип условий местопроизрастания – влажная сложная суборь С₃. В 1870 г. К. Ф. Тюрмер по сельскохозяйственному пользованию заложил относительно редкие посадки, высаживая лиственницу в смешении с елью и сосной сеянцами в гребни плужных борозд и в опрокинутую дернину. Лиственница европейская и сосна обыкновенная высажены в одинаковом количестве: по 530 шт. на 1 га, а ель евро-

пейская – 1140 шт. на 1 га (всего густота посадки 2200 шт./га) [23]. Первоначальный уход заключался в скашивании травы. Появляющийся самосев берёзы и осины вырубался с целью осветления и прочисток. Рубки ухода проводились по низовому методу с вырубкой деревьев – усыхающих и неправильной формы. В годы Великой Отечественной войны в насаждении было вырублено 209 м³/га, в основном удалялась ель.

В основу методов исследований смешанных хвойных лесных культур К. Ф. Тюрмера VIII класса возраста положены принятые в лесоводстве и лесной таксации приёмы изучения насаждений [17; 24]. По достижению смешанными хвойными культурами 154-летнего возраста была выполнена инструментальная таксация на ППП 1Т в соответствии с ОСТ 56-69–83 [14].

При поперечных перечётах у всех живых деревьев замерялась длина окружности ствола на высоте 1,3 м с точностью до 1 см, по величине которой рассчитывался диаметр. Высота деревьев измерялась высотомером Блюме–Лейсса с точностью до 0,1 м. Запас стволовой древесины (м³/га) исчислялся по формуле

$$M = H \times F \times G, \quad (1)$$

где H – средняя высота насаждения, м; F – видовое число; G – сумма площадей сечения, м²/га.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования особенности роста лиственницы в посадках, смешанных с сосной и елью в Поречком лесничестве, показали, что в насаждениях лиственницы с сосной до 35–40-летнего возраста между породами идёт упорная борьба за жизнь и лиственница имеет слабое превосходство по средней высоте и по среднему диаметру. Только после 40 лет лиственница, дав значительный отпад, за счёт сохранившихся более развитых деревьев I и II классов Крафта перегнала сосну и стала вытеснять ее. В насаждениях лиственницы с елью, лиственница с первых лет совместного произрастания обгоняет по высоте и диаметру ель, задерживает её рост и осаживает во II ярус, сама же растёт с замедленной дифференциацией деревьев и с большим количеством деревьев низших классов роста (III–IV), поэтому средний диаметр у нее меньший, чем в насаждениях с сосной, но больший запас за счёт большего количества сохранившихся деревьев лиственницы и особенно ели [1].

Первые сведения о росте лиственнично-сосново-еловых лесных культур на ППП 1Т были получены в 1963 г. В. В. Надеждиным, учеником профессора В. П. Тимофеева (см. таблицу). К 93-летнему возрасту смешанных культур лиственница почти полностью вытеснила своих спутников сосну и ель из I яруса. При этом светолюбивая сосна, отставая в росте, практически выпала, а теневыносливая ель перешла во 2-й ярус, отдельные экземпляры ели оставались в верхнем ярусе [23]. Таксационная характеристика I яруса формируемого лиственницей была: высота 36,5 м, средний диаметр 40,3 см, запас 700 м³/га, средний прирост 7,5 м³; для 2 яруса средняя высота 21,0 м, средний диаметр 20,3 см, запас 155 м³/га, средний прирост 1,7 м³.

По данным А. Н. Полякова средняя высота лиственницы только в 80 лет соответствует Ia классу бонитета, а в дальнейшем – выше данных общеклассификационной шкалы М. М. Орлова [16]. К 101-летнему возрасту культур лиственница росла по Ib классу бонитета, средняя высота лиственницы составила 37,3 м, сосны 34,0, ели 27,1 м; средний диаметр соответственно 42,4, 34,1 и 28,1 см. Ель европейская во 2-м ярусе достигла средней высоты 21,6 м и запаса 102 м³/га. Запас стволовой древесины лиственницы – 779 м³/га; общий запас – 881 м³/га. Лиственница хорошо сохранилась в смешанном насаждении, почти вытеснив светолюбивую сосну и теневыносливую ель из I-го яруса.

Повторные исследования на ППП 1Т выполнены А. Н. Поляковым в 1994 г. За исследованный период высота лиственницы изменяется от 37,3 до 40,5 м, а диаметр от 42,4 до 49,2 см. За 23 года наблюдается незначительное уменьшение числа деревьев лиственницы от 335 до 324 экземпляров, в связи с чем суммы площадей сечений возрастают на 10,5 м². Запас стволовой древесины лиственницы увеличивается с 779 в 101 год до 997 м³/га в 124 года. Число деревьев сосны сокращается на 67 % и уменьшается до 2 шт./га, у ели выпало 34 % деревьев. Общий запас стволовой древесины смешанных культур достиг 1108 м³/га.

В 2004 году коллектив ученых под руководством член-корреспондента РАСХН, профессора М. В. Рубцова детально обследовал этот объект, общий запас лиственнично-еловых культур достиг 1244 м³/га, за 10-летний период их роста стволовой запас лиственницы увеличился на 127 м³ или на 11 %, это свидетельствует о том, что древостой имеет нормальный рост и не достиг возраста естественной спелости [18]. К 134-летнему возрасту лесных культур сосна обыкновенная полностью выпала из состава насаждения, ель в I-м ярусе оставалась в незначительном количестве (8 шт./га), во 2-м ярусе отпад ели составил 17 %.

Осенью 2024 года нами были проведены очередные исследования данного объекта в 156-летнем биологическом возрасте лиственницы европейской (рис. 1). В результате обработки полевого материала были получены лесоводственно-таксационные характеристики смешанных лиственнично-еловых лесных культур К. Ф. Тюрмера (таблица). В связи с тем, что разработанные А. Н. Поляковым таблицы хода роста для листвягов высшей продуктивности Ib класса бонитета ограничены 110-летним возрастом [16], при оценке классов бонитета использовали унифицированную систему бонитирования лесных насаждений разработанную А. А. Строчинским и С. М. Кашпором [21]. К 156-летнему возрасту лиственница европейская достигает наибольшей средней высоты 46,3 м, что соответствует росту по Ic классу бонитета, а ель европейская 37,2 м в первом ярусе (Ia класс бонитета) и 27,6 м во втором. Средний диаметр лиственницы 56,4 см у ели 46,2 см, ель второго яруса – 27,6 см. Самая высокая сохранность за 156 лет у лиственницы – 48,5 % (257 шт./га), ель характеризуется низкой сохранностью – 12,3 % (140 шт./га).

Таблица

Динамика таксационных характеристик смешанных хвойных лесных культур К. Ф. Тюрмера на ППП 1Т

Год перечёта, автор(ы)	Возраст лесных культур, лет	Ярус	Состав	Средние		N, шт/га	G, м ² /га	M, м ³ /га	V _{ср} , м ³
				H _{ср} , м	D _{1,3} , см				
1963 г., В. П. Тимофеев, В. В. Надеждин	93	1	10Л+С, Е	36,5	40,3	342	–	700	2,05
	93	2	10Е	21,0	20,3	373	–	155	0,42
				Итого:		715	–	855	
1971 г., В. П. Тимофеев, А. Н. Поляков	101	1	10Л+С,Е	37,3	42,4	335	51,1	779	2,33
	101	2	10Е	21,6	20,1	318	5,3	102	0,32
				Итого:		673	56,4	881	
1994 г., А. Н. Поляков	124	1	10Л	40,5	49,2	324	61,6	997	3,08
	124	1	ед.С	38,0	44,6	2	0,2	4	2,00
	124	2	10Е	24,0	24,5	215	10,1	107	0,50
				Итого:		541	71,9	1108	
2004 г., М. В. Рубцов и др.	134	1	10Л	43,7	49,6	312	60,3	1124	3,60
	134	1	ед.Е	37,8	40,7	8	1,0	18	2,25
	136	2	10Е	23,7	23,7	179	7,9	102	0,57
				Итого:		499	69,2	1244	
2024 г., П. Г. Мельник, Н. Ю. Насыпайко	154	1	10Л	46,3	56,4	257	66,2	1323	5,15
	154	1	ед.Е	37,2	46,2	3	2,9	8	2,67
	154	2	10Е	27,6	27,6	137	8,6	120	0,88
				Итого:		397	77,7	1451	

Примечание. H_{ср} – средняя высота древостоя, м; D_{1,3} – средний диаметр древостоя, см; N – густота стояния (количество) деревьев, шт./га; G – площадь поперечных сечений стволов, м²/га; M – запас стволовой древесины, м³/га; V_{ср} – средний объём ствола дерева, м³.

В VIII классе возраста смешанные хвойные культуры имеют высокие показатели продуктивности – запас лиственницы 1323 м³/га, её средний прирост по запасу за год – 8,6 м³/га, текущий – 10,0 м³/га. Общий запас насаждения – 1451 м³/га, средний прирост по запасу – 9,4 м³, текущий – 10,4 м³/га. Средний объём ствола лиственницы на опытном объекте – 5,15 м³, у ели в 1-м ярусе – 2,67 м³.

Благодаря изначально большому размеру ППП 1Т равному 0,7 га, нами проанализированы изменения в распределении деревьев лиственницы европейской по ступеням толщины за последние 53 года (рис. 2). Как видно из этого рисунка, пик численности согласно кривой распределения в 1971 году, то есть в возрасте 101 год был сдвинут в сторону меньших значений ступеней толщины. В 154 года кривая распределения приобрела более выраженный (наметившийся ещё в 1971 году) двухвершинный характер, где первый меньший пик приходится на ступень 44 (13,3 %), а второй больший пик на ступень 56 (17,2 %). Данный характер кривой можно объяснить продолжившейся дифференциацией деревьев – угнетённых на ранних стадиях развития смешанного древостоя (первый пик) и сумевших выйти в господствующие классы (второй пик), после выпадения сосны и ели из первого яруса. При этом чётко просматривается наличие очень крупных стволов деревьев. Максимальная ступень толщины в 101-летних культурах составила 64 см, а в 154-летних – 80 см.

С увеличением возраста лиственницы от 101 года к 154 годам в разрезе ступеней толщины происходит увеличение значений. В 101-летних культурах деревья распределились в ступенях 16–64, а в 154-летних 32–80 см, однако диапазон разбега диаметров от

самой маленькой ступени к самой большой составил одинаковую величину – 48 см.



Рис. 1. Высокополнотные 154-летние лиственнично-еловые культуры на ППП 1Т.

Фото П. Г. Мельника, 04.11.2024 г.

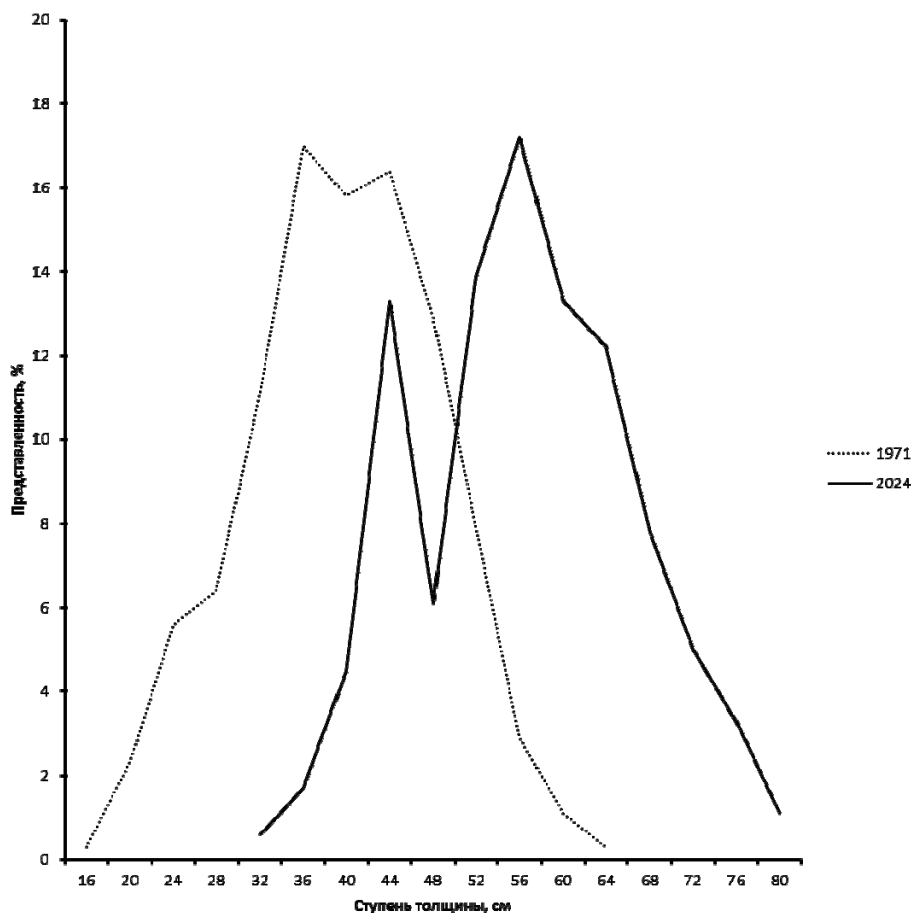


Рис. 2. Распределение деревьев лиственницы европейской по ступеням толщины: 1971 г. – 103 года, 2024 – 156 лет

Характерной особенностью смешанных хвойных культур является лидирующее преимущество лиственницы не только по значениям средних высот и диаметров, но и по запасам стволовой древесины (см. таблицу). Максимальный запас у лиственницы, как основного компонента искусственного насаждения, был зафиксирован в возрасте 154 года и составил – 1323 м³/га. Нам удалось по модельным деревьям, взятым не только на ППП 1Т, но и ещё на двух других участках лиственнично-еловых культур, восстановить картину динамики роста по высоте лиственницы и ели (рис. 3). Приведённая нами на рис. 3 динамика роста лиственнично-еловых культур, применительно к еловому компоненту разделена на ярусы, причём второй ярус ели сложен из отставших в росте деревьев от посадки 1870 года плюс, главным образом, от ели естественного возобновления.

Как видно из рис. 3, ель изначально отставала в росте по высоте от лиственницы европейской. Однако в отличие от ели второго яруса, рост по высоте у ели первого яруса был стабильно синхронен (особенно в возрасте 50–110 лет) по отношению к пологу лиственницы. В целом ель, как компонент искусственного дендроценоза, положительно укрепляет вертикальный профиль насаждения.

Сравнительно высокая интенсивность конкурентных отношений между деревьями в смешанных лесных культурах проявляется в отрицательной дифференциации деревьев лиственницы по классам Крафта (рис. 4).

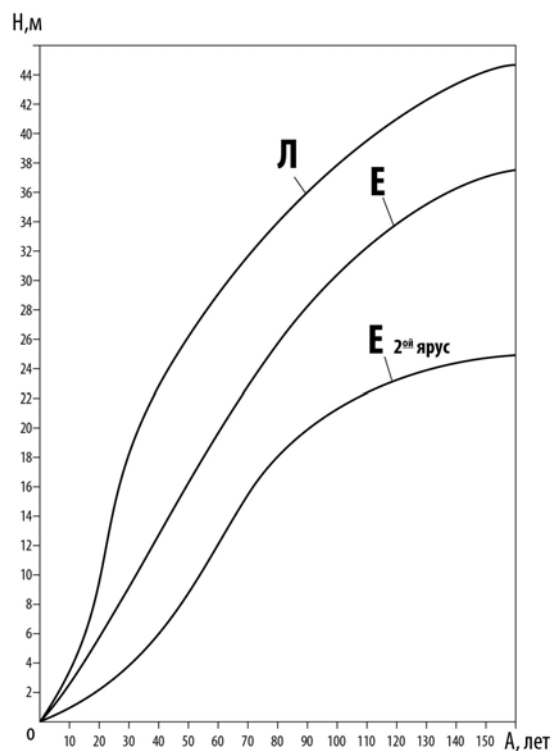


Рис. 3. Ход роста компонентных пород в лиственнично-еловых культурах К. Ф. Тюрмера: Л – лиственница; Е – ель

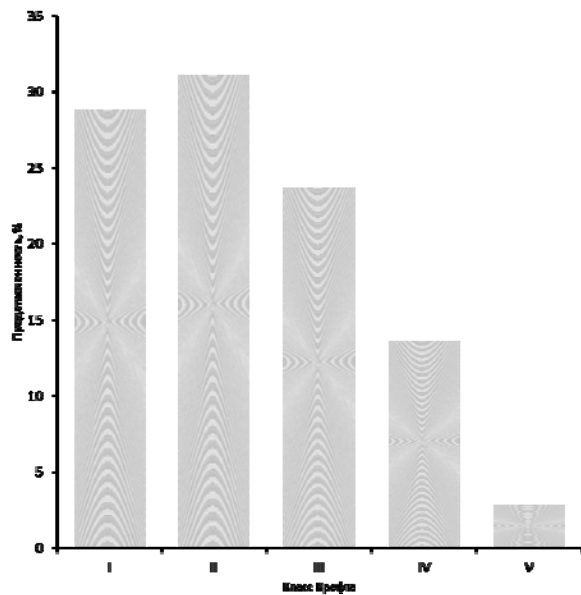


Рис. 4. Представленность деревьев лиственницы в 154-летнем возрасте по классам Крафта на ППП 1Т

Она характеризуется четким сдвигом численности деревьев в сторону высших классов Крафта, преобладают деревья I и II классов, тогда как угнетенные деревья IV и V классов представлены минимальным количеством и составляют соответственно 13,6 % и 2,8 % общего их числа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполненные исследования, позволяют сделать следующие выводы:

1. Полутравековой опыт выращивания лиственницы в искусственных насаждениях Порецкого лесничества имени К. Ф. Тюрмера показал, что в условиях сложных суборей, лесные культуры лиственницы в смешении с елью формируют устойчивые и высокопродуктивные насаждения с максимальными запасами.
2. Смешанные хвойные лесные культуры с пониженной густотой посадки лиственницы европейской способствуют формированию высокопроизводительных насаждений, достигающих запаса стволовой древесины 1451 м³/га, со средним приростом по запасу за год – 9,4 м³/га.
3. Смешение лиственницы европейской с сосной обыкновенной в лесных культурах нецелесообразно по причине высокого светолюбия обеих древесных пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Васильев Я. Я. Насаждения европейской лиственницы в Поречье Уваровского района Московской области // Труды Ботанического института им. В. Л. Комарова АН СССР. Серия 4. Вып. 1. 1950. С. 59–78.
2. Дзубан В. И. Лесные культуры в восстановлении поврежденных насаждений лесопарковой зоны Брянского лесного массива : дис. ... канд. с.-х. наук 06.03.01. Брянск, 2020. 163 с.
3. Мельник Л. П. Особенности диссеминации и естественного возобновления лиственницы европей-

ской в центре Русской равнины : дис. ... канд. с.-х. наук 06.03.02. Успенское, 2022. 144 с.

4. Мельник Л. П., Мерзленко М. Д. Динамика участка лиственницы в составе естественного возобновления за пределами её ареала // Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 4 (52). С. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.4.19>

5. Мельник Л. П., Карасев Н. Н. Результаты интродукции лиственницы в северо-восточное Подмосковье // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2005. № 2 (38). С. 36–40.

6. Мельник Л. П., Насыпайко Н. Ю. Естественное возобновление лиственницы в Центральной России // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 1 (84). С. 74–79.

7. Мерзленко М. Д. Карл Францевич Тюрмер. М. : Изд-во Московского университета, 1986. 62 с.

8. Мерзленко М. Д. Основные итоги лесокультурного наследия лесовода К. Ф. Тюрмера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 201–210. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-5-201-210](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-201-210)

9. Мерзленко М. Д. Эталон деятельности лесовода. М. : Изд. дом Рученькиных, 2022. 174 с.

10. Мерзленко М. Д., Бабич Н. А. Лесные культуры лиственницы на европейской территории России. Архангельск : САФУ, 2021. 128 с.

11. Мерзленко М. Д., Мельник Л. П. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М. : ФБГОУ ВПО МГУЛ, 2015. 112 с.

12. Мерзленко М. Д., Мельник Л. П., Маликов А. Н. Динамика роста лиственнично-еловых лесных культур К. Ф. Тюрмера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 11–16. DOI: [10.18698/2542-1468-2020-2-11-16](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-2-11-16)

13. Мерзленко М. Д., Мельник Л. П., Мельник Л. П. Депонирование углерода стволовой фракцией в 100-летних лесных культурах хвойных пород // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 5–10. DOI: [10.18698/2542-1468-2023-2-5-10](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-2-5-10)

14. ОСТ 56-69–83. Пробные площади лесоустойчивости. Методы закладки. М. : Изд-во стандартов, 1983. 59 с.

15. Погребняк П. С. Повышение продуктивности лесов путём создания смешанных насаждений // Вопросы лесоведения и лесоводства: доклады на V Всемирном Лесном конгрессе. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 95–103.

16. Поляков А. Н., Ипатов Л. Ф., Успенский В. В. Продуктивность лесных культур. М. : Агропромиздат, 1986. 240 с.

17. Родин А. Р., Мерзленко М. Д. Методические рекомендации по изучению лесных культур старших возрастов. М. : ВАСХНИЛ, 1983. 36 с.

18. Рубцов М. В., Глазунов Ю. Б., Николаев Д. К. Лиственница европейская в центре Русской равнины // Лесн. хоз-во. 2011. № 5. С. 26–29.

19. Рубцов М. В., Мерзленко М. Д. Лесные культуры К. Ф. Тюрмера. М. : ЦБНТИлесхоз, 1975. 42 с.

20. Рудзкий А. Ф. Несколько материалов о статике лесных посевов, посадок и прореживаний (Описание

исследований в Порецкой даче графа Уварова) // Лесной журнал. 1872. Вып. IV. С. 36–48.

21. Строчинский А. А., Кашпор С. М. Уніфікована система бонітування лісових насаджень. Лісотаксаційні нормативи. Київ: Видавничий центр НАУ, 2007. 8 с.

22. Тимофеев В. П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 160 с.

23. Тимофеев В. П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесная пром-сть, 1977. 216 с.

24. Чернов Н. Н., Соловьёв В. М., Нагимов З. Я. Методические основы лесокультурных исследований / Уральский гос. лесотех. . Екатеринбург, 2012. 422 с.

25. Яблоков А. С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослестехиздат, 1934. 128 с.

26. Thürmer K. Bewirtschaftung der Privatwäldungen // Allgemeine Forst und Jagzeitung, November, 1877, pp. 385–391.

REFERENCES

1. Vasil'ev Ya. Ya. Nasazhdeniya evropeyskoy listvennitsy v Porech'e Uvarovskogo rayona Moskovskoy oblasti // Trudy Botanicheskogo instituta im. V. L. Komarova AN SSSR. Seriya 4. Vyp. 1. 1950. S. 59–78.

2. Dzuban V. I. Lesnye kul'tury v vosstanovlenii povrezhdennykh nasazhdeniy lesoparkovoy zony Bryanskogo lesnogo massiva: dis. ... kand. s.-kh. nauk 06.03.01. Bryansk, 2020. 163 s.

3. Mel'nik L. P. Osobennosti disseminatsii i estestvennogo vozobnovleniya listvennitsy evropeyskoy v tsentre Russkoy ravniny: dis. ... kand. s.-kh. nauk 06.03.02. Uspenskoe, 2022. 144 s.

4. Mel'nik L. P., Merzlenko M. D. Dinamika uchastiya listvennitsy v sostave estestvennogo vozobnovleniya za predelami ee areala // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2021. №4 (52). S. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.4.19>

5. Mel'nik P. G., Karasev N. N. Rezul'taty introduksii listvennitsy v severo-vostochnoe Podmoskov'e // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik. 2005. № 2 (38). S. 36–40.

6. Mel'nik P. G., Nasypayko N. Yu. Estestvennoe vozobnovlenie listvennitsy v Tsentral'noy Rossii // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik. 2012. № 1 (84). S. 74–79.

7. Merzlenko M. D. Karl Frantsevich Tyurmer. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1986. 62 s.

8. Merzlenko M. D. Osnovnye itogi lesokul'turnogo naslediya lesovoda K. F. Tyurmera // Izv. vuzov. Lesn. zhurn. 2020. № 5. S. 201–210. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-201-210

9. Merzlenko M. D. Etalon deyatel'nosti lesovoda. M.: Izdatel'skiy dom Ruchen'kinykh, 2022. 174 s.

10. Merzlenko M. D., Babich N. A. Lesnye kul'tury listvennitsy na evropeyskoy territorii Rossii. Arkhangel'sk: SAFU, 2021. 128 s.

11. Merzlenko M. D., Mel'nik P. G. Opyt lesovodstvennogo monitoringa v Nikol'skoy lesnoy dache. M.: FBGOU VPO MGUL, 2015. 112 s.

12. Merzlenko M. D., Mel'nik P. G., Malikov A. N. Dinamika rosta listvennichno-elovykh lesnykh kul'tur K. F. Tyurmera // Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2020. T. 24. № 2. S. 11–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-11-16

13. Merzlenko M. D., Mel'nik P. G., Mel'nik L. P. Deponirovanie ugleroda stvolovoy fraktsii v 100-letnikh lesnykh kul'turakh khvoynykh porod // Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023. T. 27. № 2. S. 5–10. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-5-10

14. OST 56-69-83. Probnye ploshchadi lesoustroitel'nye. Metody zakladki. M.: Izd-vo standartov, 1983. 59 s.

15. Pogrebnyak P. S. Povyshenie produktivnosti lesov putem sozdaniya smeshannykh nasazhdeniy // Voprosy lesovedeniya i lesovodstva: doklady na V Vsemirnom Lesnom kongresse. M.: Izd-vo AN SSSR, 1960. S. 95–103.

16. Polyakov A. N., Ipatov L. F., Uspenskiy V. V. Produktivnost' lesnykh kul'tur. M.: Agropromizdat, 1986. 240 s.

17. Rodin A. R., Merzlenko M. D. Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu lesnykh kul'tur starshikh vozrastov. M.: VASKhNIL, 1983. 36 s.

18. Rubtsov M. V., Glazunov Yu. B., Nikolaev D. K. Listvennitsa evropeyskaya v tsentre Russkoy ravniny // Lesn. khoz-vo. 2011. № 5. S. 26–29.

19. Rubtsov M. V., Merzlenko M. D. Lesnye kul'tury K. F. Tyurmera. M.: TsBNTIleskhoz, 1975. 42 s.

20. Rudzkiy A. F. Neskol'ko materialov o statike lesnykh posevov, posadok i prorezhivaniy (Opisanie issledovaniy v Poretskoy dache grafa Uvarova) // Lesnoy zhurnal, 1872. Vyp. IV. – S. 36–48.

21. Strochinsk'iy A. A., Kashpor S. M. Unifikovana sistema bonituvannya lisovikh nasazhden'. Lisotaksatsiyni normativi. Kiïv: Vidavnicchiy tsentr NAU, 2007. 8 s.

22. Timofeev V. P. Rol' listvennitsy v podnyatii produktivnosti lesov. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961. 160 s.

23. Timofeev V. P. Lesnye kul'tury listvennitsy. M.: Lesnaya promyshlennost', 1977. 216 s.

24. Chernov N. N., Solov'ev V. M., Nagimov Z. Ya. Metodicheskie osnovy lesokul'turnykh issledovaniy. Ekaterinburg: FGBOU VPO «Ural'skiy gos. lesotekh. universitet», 2012. 422 s.

25. Yablokov A. S. Kul'tura listvennitsy i ukhod za nasazhdeniyami. M.: Goslестekhizdat, 1934. 128 s.

26. Thürmer K. Bewirtschaftung der Privatwäldungen // Allgemeine Forst und Jagzeitung, November, 1877, pp. 385–391.

© Мельник П. Г., Насыпайко Н. Ю., Мерзленко М. Д., 2026

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
(*PINUS SYLVESTRIS* L.) НА ОБЪЕКТАХ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА****Е. В. Авдеева, Н. Л. Ровных, А. Б. Кочанкина**

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

Аннотация. Оценка состояния сосны обыкновенной в городских зеленых насаждениях варьируется от «здоровых» до «отмирающих». Совокупное влияние антропогенных факторов нередко приводит к усыханию крупных ветвей и вершин, общей деградации насаждений, что вызывает ускоренное биологическое старение и преждевременную гибель деревьев. Результаты дендроиндикационных исследований экологического состояния городских территорий по состоянию хвои сосны обыкновенной на объектах озеленения г. Красноярска показали, что на трех из 22 объектов состояние воздушной среды оценивается как «относительно чистое» – данные объекты расположены в периферийной части города со стороны господствующего ветра; на 6 объектах – в районах, где качество воздуха среды оценивается как «загрязненный»; на 5 – «грязный»; на 9 – «очень грязный» – объекты расположены в центральной части города, а также приближены к автомагистралям. Отмечается значительная изменчивость показателей длины и ширины хвои по всей совокупной выборке ($V = 42,2\%$) в условиях, где качество воздушной среды оценивается как «загрязненное». В «очень грязных» условиях наблюдается уменьшение размеров длины хвои, при этом снижается и изменчивость признака, возле автодороги наблюдаются деревья сосны обыкновенной с возрастом хвои от 1 года до 3 лет, при увеличении расстояния и наличия «зеленого» экрана возраст хвои увеличивается и с расстояния 42 м, встречаются экземпляры, возраст которых составляет 4 года. В силу высокой восприимчивости к изменениям условий произрастания, сосна обыкновенная представляет перспективный тест-объект биоиндикации. Данный вид может эффективно применяться для мониторинга и анализа экологической обстановки городской среды, отражая отклонения от нормативных состояний. Использование сосны обыкновенной в качестве индикатора позволяет оперативно и круглогодично выявлять проблемные зоны и оценивать эффективность природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: объекты озеленения, ассимиляционный аппарат, сосна обыкновенная, городская среда, Красноярск.

*Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 89–94***VARIABILITY OF THE ASSIMILATION APPARATUS OF SCOTS PINE
(*PINUS SYLVESTRIS* L.) AT LANDSCAPING SITES IN KRASNOYARSK****E. V. Avdeeva, N. L. Rovnych, A. B. Kochankina**

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

Abstract. The condition of Scots pine trees in urban green spaces varies from “healthy” to “dying”. The combined impact of anthropogenic factors often leads to the drying out of large branches and tops, as well as general degradation of the stands, which causes accelerated biological aging and premature death of trees. The results of dendroindication studies of the ecological state of urban areas based on the condition of Scots pine needles in Krasnoyarsk green spaces showed that at three of 22 sites, the air quality is assessed as “relatively clean” – these sites are located in the peripheral part of the city on the side of the prevailing wind; at six sites – in areas where the air quality is assessed as “polluted”; at five – “dirty”; at nine – “very dirty” – the sites are located in the central part of the city and also close to highways. Significant variability in needle length and width was observed across the entire sample ($V = 42.2\%$) under conditions where air quality was assessed as “polluted”. Under “very polluted” conditions, a decrease in needle length was observed, along with a reduction in variability. Near the road, Scots pine trees with needles ranging from 1 to 3 years old were observed. With increasing distance and the presence of a “green” screen, needle age increased, and at a distance of 42 m, specimens as old as 4 years were observed. Due to its high sensitivity to changes in growing conditions, Scots pine represents a promising bioindication test object. This species can be effectively used for monitoring and analyzing the environmental situation in the urban environment, reflecting deviations from standard conditions.

Using Scots pine as an indicator allows for the prompt and year-round identification of problem areas and the assessment of the effectiveness of environmental measures.

Keywords: landscaping objects, assimilation apparatus, Scots pine, urban environment, Krasnoyarsk.

ВВЕДЕНИЕ

В текущих условиях развития городских территорий становится крайне важным всестороннее использование полезных свойств зелёных насаждений, формирующих экологическую основу городов. Изучение роста сосны обыкновенной в городских посадках выявило, что её востребованности способствует эстетическая привлекательность, сохраняющаяся даже зимой, адаптивность к почвенным условиям, быстрый рост, морозостойкость, а также значительные санитарные, гигиенические и средозащитные характеристики [2; 9; 12; 13; 19]. Однако состояние сосны обыкновенной в разных городских зонах озеленения варьируется от здорового до критического. Совокупное воздействие антропогенных факторов часто приводит к усыханию крупных ветвей, гибели верхушек, общей деградации насаждений, ускоренному биологическому старению и преждевременной гибели деревьев. Деградация сосновых посадок в городской среде характеризуется неравномерным распределением по территории.

Влияние техногенного загрязнения атмосферы на рост сосны обыкновенной является предметом исследований на протяжении многих лет [9; 11; 14; 15; 17; 18]. Многие исследователи отмечают негативное воздействие практически всех видов выбросов, особенно оксидов серы, частиц тяжёлых металлов, соединений фтора и фотохимических веществ, содержащихся в автомобильных выхлопных газах, что приводит к преждевременному старению растений, разрежению и деформации кроны. [1; 8; 12]. Под влиянием токсиантов хвоя сосны обыкновенной в зонах сильного

загрязнения приобретает тёмно-красную окраску, вызывает у сосны опадание хвои, которая сохраняется лишь на побегах последнего года [3; 4; 7; 10; 20].

Цель исследования заключается в установлении изменчивости показателей ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на объектах озеленения г. Красноярска с различным уровнем антропогенного воздействия и обоснования использования данного вида в качестве вида-индикатора с целью оценки состояния воздушной среды городов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов выступают деревья сосны обыкновенной, произрастающие в городских насаждениях Красноярска. В соответствии с целью исследования, направленной на изучение изменений морфологических характеристик ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в условиях Красноярска, было обследовано 22 участка озеленения, характеризующихся различной степенью воздействия антропогенных факторов.

На каждом объекте озеленения собрано по 100 образцов хвои (2200 шт.) с деревьев сосны обыкновенной на высоте от 1 до 1,5 м на участке побега второго года жизни с внешней стороны насаждения, с учетом состояния территории (без признаков уплотнения почвы). Далее проводилась оценка состояния хвои в соответствии с диагностическими и оценочными характеристиками (табл. 1). Измерения длины и толщины хвои проводились с использованием электронного штангенциркуля «Stayer Professional» с точностью – 0,1 мм.

Таблица 1
Классы повреждения и усыхания хвои

Классы повреждения хвои: 1 – хвоинки без пятен; 2 – хвоинки с небольшим числом мелких пятен; 3 – хвоинки с большим числом черных и желтых пятен	1	2	3			
	Классы усыхания хвои					
	1	1	1	2	2	4
						

Таблица 2
Оценочная шкала «Экспресс-оценка загрязнения воздуха с использованием сосны обыкновенной»

Максимальный возраст хвои, лет	Класс повреждения хвои на побегах второго года жизни		
	1	2	3
4	I	I–II	III
3	I	II	III – IV
2	II	III	IV
2	—	IV	IV – V
1	—	IV	V – VI
1	—	—	VI

Примечания: I – II – III – воздух «относительно чистый»; IV – «загрязненный»; V – «грязный»; VI – «очень грязный»; — – невыполнимые совмещения.

Биоиндикационная экспресс-оценка загрязнения атмосферного воздуха выполнена на основе анализа состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной. В основу метода положена корреляция между уровнем повреждения хвои, представленным в табл. 1, и степенью загрязнения воздуха в зоне произрастания дерева. Данный подход позволяет оперативно оценить качество атмосферного воздуха, используя сосну обыкновенную в качестве тест-объекта. Анализ степени повреждения хвои, как показателя, отражает интегрированное воздействие загрязняющих веществ на растение в течение определенного периода времени [4; 10; 11] (см. табл. 2) [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты дендроиндикационных исследований экологического состояния городских территорий по состоянию хвои сосны обыкновенной на объектах озеленения г. Красноярска показали, что только на трех (из 22 на исследуемых объектах озеленения г. Красноярска) состоянии воздушной среды оценивается как «относительно чистый» – данные объекты расположены в периферийной части города со стороны господствующего ЮЗ ветра (Академгородок, Ботанический бульвар, в районе кампуса СФУ); на 6 объектах – в районах, где качество воздушной среды оценивается как «загрязненный»; на 5 – «грязный»; на 9 – «очень грязный» – объекты расположены в центральной части города, а также приближены к автомагистралям.

Анализ хвои сосны обыкновенной, произрастающей в зонах с разным уровнем антропогенного воздействия, выявил следующие закономерности. Наибольшая продолжительность жизни хвои, достигающая четырех лет, наблюдалась на двух из трех участков озеленения, характеризующихся «относительно чистым» атмосферным воздухом. В то же время минимальная продолжительность жизни хвои, составляющая один год, зафиксирована вблизи крупных автомагистралей с интенсивным движением транспорта, где качество воздуха оценивается как «очень грязное». У деревьев, произрастающих в условиях воздушной среды, классифицируемой как «грязная», возраст хвои не превышал двух лет, при этом отмечалась высокая степень повреждения значительной части ассимиляционного аппарата.

В ходе математической обработки отмечается значительная изменчивость показателей, что подтверждается разбросом средних значений длины хвои по всей совокупной выборке, разница в размерах составляет 73,8 мм. Среднее максимальное значение – 101,6 мм (абсолютное максимальное – 108 мм) отмечено на объекте озеленения Сквер «Мебелев», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», минимальное значение – 27,8 мм (в насаждениях возле цирка, (коэффициент вариации составляет $V = 42,2\%$). Данные объекты расположены в условиях, где качество воздушной среды оценивается как «загрязнённое». В пределах данных условий наблюдается наибольший разброс значений, в условиях с «загрязненной» и «грязной» воздушной средой отмечается увеличение длины хвои по сравнению с длиной хвои у растений, произрастающих в «относительно чистых» условиях. В «очень грязных» условиях состояния воздушной среды наблюдается уменьшение размеров длины хвои, при этом снижается и изменчивость признака (рис. 1).

В ходе проведенных исследований установлена взаимосвязь возраста хвои, класса ее повреждения с качеством воздушной среды (рис. 2).

Результаты исследований показали, что деревья сосны обыкновенной, произрастающие в условиях где качество воздушной среды оценивается как «относительно чистое», имеют хвою возраст которой составляет 3–4 года, при этом 70 % исследуемой хвои не имеет повреждений, 30 % имеет незначительные (рис. 3).

При характеристике воздушной среды как «очень грязная» у всех обследуемых растений выявлены признаки хлорозных и некротических изменений. Наблюдается следующая картина усыхания хвои: 47 % растений отнесены ко 2-му классу, 28 % – к 3-му, 25 % – к 4-му. Растения угнетены, наблюдается их ускоренное старение, имеются участки, где посадки полностью отсутствуют из-за гибели саженцев и их последующего удаления, либо в рядовых посадках отмечены более молодые экземпляры, высаженные взамен ранее погибших. Появление хлороза (потеря хвоей зеленого пигмента в результате разрушения хлорофилла) и некроза (отмирание хвои) приводит к дефолиации (опадению хвои) и, как следствие, к замедлению темпов роста растений.

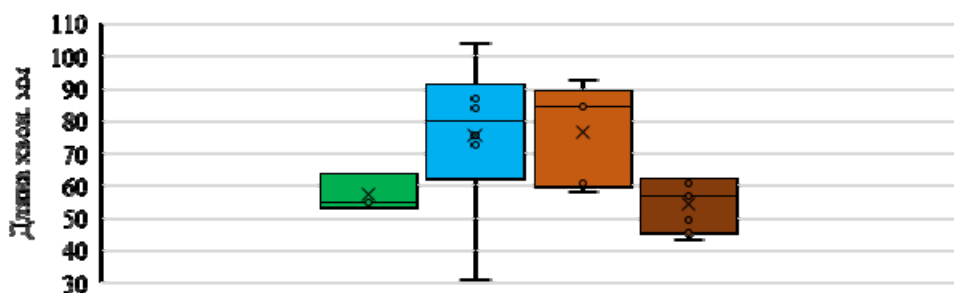


Рис. 1. Изменчивость длины хвои сосны обыкновенной в искусственных насаждениях г. Красноярска.

Состояние воздушной среды на исследуемых объектах озеленения:

■ относительно чистое; ■ загрязненный; ■ грязный; ■ очень грязный

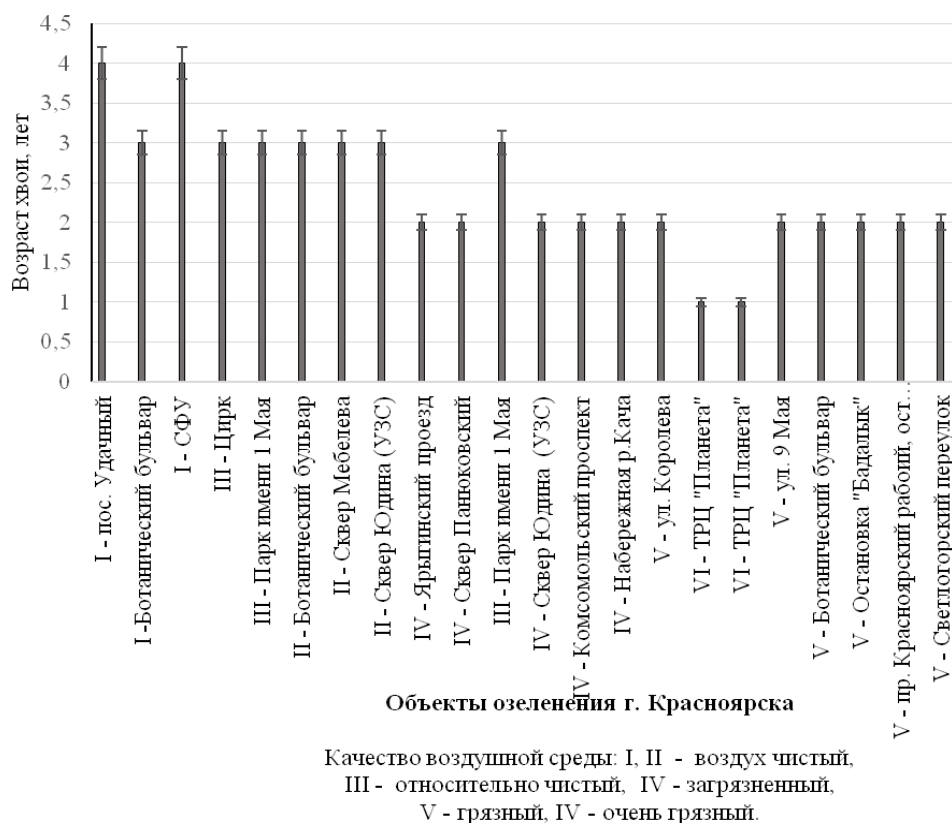


Рис. 2. Взаимосвязь возраста хвои и класса повреждения хвои сосны обыкновенной с качеством воздушной среды на объектах озеленения г. Красноярск

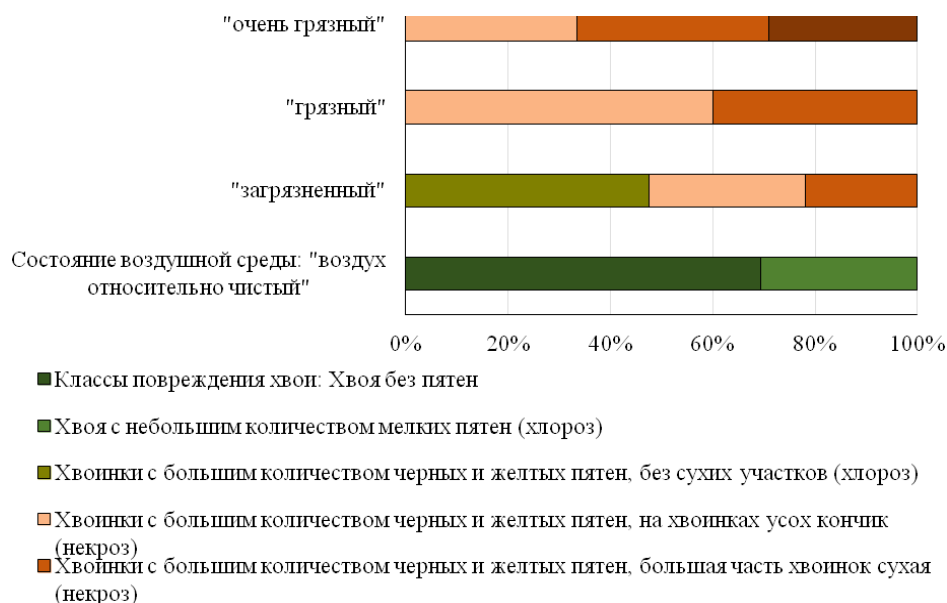


Рис. 3. Повреждения хвои сосны обыкновенной на объектах озеленения г. Красноярск с различным уровнем техногенной нагрузки

Один из объектов озеленения «Ботанический бульвар» располагается в районе с умеренным уровнем фонового загрязнения, при этом растения произрастают на разделительной полосе автомобильной дороги. Анализ состояния хвои сосны обыкновенной показал, что качество воздуха в придорожной зоне, по обеим сторонам которой наблюдается интенсивное движение транспорта, оценивается как «грязное».

Следует подчеркнуть, что метод биотестирования обеспечивает достаточно точную градацию состояния воздушной среды по состоянию ассимиляционного аппарата сосны.

Изучение продолжительности жизни хвои сосны обыкновенной, произрастающей в количестве 83 экземпляров вдоль улицы Обороны (Центральный, наиболее загрязненный, район города) на участке, размещен-

ном вглубь территории на 50 метров от автомагистрали, выявило закономерности изменения возраста хвои в зависимости от удаленности от источника загрязнения. В непосредственной близости к дороге (до 3 метров) доминируют экземпляры с однолетней хвоей, реже встречаются особи с двухлетней. Увеличение возраста хвои наблюдается по мере удаления от источника загрязнения: на расстоянии 42 метров обнаружены экземпляры с четырехлетней хвоей.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной к воздействию автотранспортного загрязнения, что согласуется с данными о восприимчивости данного вида к атмосферным поллютантам. На основании проведенного анализа и результаты предыдущих исследований о влиянии загрязнителей на хвойные породы, рекомендуется организация защитных посадок из более устойчивых лиственных пород по периметру насаждений сосны обыкновенной для снижения негативного воздействия автомобильного транспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Антропогенное воздействие на городскую экосистему оказывает влияние на морфологические и физиологические характеристики *Pinus sylvestris*. Увеличение степени загрязнения приводит к редукции линейных размеров хвои, повышению частоты встречаемости признаков повреждения, а также к сокращению жизненного цикла хвоинок. Сосна обыкновенная, демонстрируя высокую чувствительность к изменениям окружающей среды, может быть эффективно использована в качестве индикаторного вида для мониторинга экологического состояния городских территорий, при условии соблюдения соответствующих методологических требований к растениям-индикаторам, что определяется ее оперативной реакцией на изменения в состоянии окружающей среды. Кроме того, использование хвойных пород в качестве биоиндикаторов является целесообразным на протяжении всего года, что обеспечивает возможность осуществления долгосрочного мониторинга состояния окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бадмаева С. Э., Циммерман В. И. Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха городов Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2015. № 2. С. 27–32.
2. Василевская Н. В., Тумарова Ю. М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. В условиях аэротехногенного загрязнения // Биогеография Карелии: тр. Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 2005. Вып. 7. С. 21–25.
3. Гераськин Д. В., Васильев В. Г., Дикарев Оценка методами биоиндикации техногенного воздействия на популяции *Pinus sylvestris* в районе предприятия по хранению радиоактивных отходов // Экология. 2005. № 4. С. 275.
4. Кизеев А. Н. Изменения морфологических и физиолого-биохимических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 3. С. 120–128.

5. Лебедев А. Г. Анализ изменчивости количественных признаков хвои в популяциях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 5. С. 205–209.
6. Мелехова О. П. и др. Биологический контроль окружающей среды. М. : Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.
7. Неверова О. А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. 2012. Т. 4, № 1. С. 82–92.
8. Панов А. И., Авдеева Е. В. Биоиндикация урбоэкосистем по морфологическим признакам хвойных растений // Хвойные бореальной зоны. Т. XXXV, № 1-2. С. 7–14.
9. Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В., Пляшечник М. А. Оценка экологического состояния сосны обыкновенной на урбанизированных территориях Красноярской лесостепи // Вестник КрасГАУ. 2013. № 11. С. 176–181.
10. Соболева О. М., Кондратенко Е. П., Пинчук Л. Г. Комплексная оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в г. Новокузнецке // Вестн. Алтай. гос. аграр. ун-та. 2009. № 7. С. 33–36.
11. Соболева С. В., Беляева К. С., Почекутов И. С. Сосна обыкновенная как биоиндикатор загрязнения атмосферы // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 25–29.
12. Сомов Е. В., Кучереносова А. Ю., Олейник А. А. Рост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Хабаровска: состояние вопроса, методика исследований, предварительные результаты // Актуальные проблемы лесного комплекса : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-техн. конф. «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития». Брянск : БГИТА, 2008. 230 с.
13. Ярмишко В. Т. Особенности роста и формирования наземной фитомассы сосны // Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л., 1990. С. 55–64.
14. Avdeeva E., Ivanov D., Markelova K. Monitoring of objects urban gardening. Information system “quality management of urban sites greening” // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. “International Science and Technology Conference “Earth Science”, ISTE EarthScience 2022 – Chapter 3”. 2022. С. 042087.
15. Avdeeva E., Panov A. Ecosystem approach to assessing the state of the urbanized environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference “Far-EastCon 2019”. 2020. С. 022032.
16. Aguil, S. Physiological and biochemical response of *Albizia lebbek* (L.) Benth. to coal smoke pollution / S. Aguil, S. H. Ahmad, Z. Reshi [et al.] // Pollution Research. 2003. Vol. 22, № 4. P. 489–493.
17. Bharti V. K., Giri A., Kumar K. Fluoride Sources, toxicity and its amelioration: Reviw. Reviw. Sci Toxicol, 2017. 2(1): 021–032. Doi: 10.17352/aest. 000009
18. Linde M., Oborn I., Gustafsson J. P. Effects of changed soil conditions on the mobility of trace metals in

moderately contaminated urban soils // Water, Air and Soil Pollut. 2007. Vol. 183. P. 69–83.

19. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil of Shanghai, China: concentrations, distribution and sources / Y. Liu, L. Chen, J. Zhao, Y. Wei, Z. Pan, X.-Z. Meng, Q. Huang, W. Li // Organic Geochemistry. 2010. Vol. 41. P. 355–362.

20. Nikolic B., Bojovic S., Marin P. D. Morpho-anatomical Traits of Pinus Peuce Needles from Natural Populations in Montenegro and Serbia // Plant Biosystems. 2015. Vol. 150(5). P. 1038–1045.

REFERENCES

1. Badmaeva S. E., Cimmerman V. I. Antropogennoe zagryaznenie atmosfernogo vozduxa gorodov Krasnoyarskogo kraja // Vestnik KrasGAU. 2015. № 2. S. 27–32.

2. Vasilevskaya N. V., Tumarova Yu. M. Ocenka stabil'nosti razvitiya populyacij Pinus sylvestris L. V usloviyax ae'rotoxnogennogo zagryazneniya // Biogeografiya Karelii: tr. Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Petrozavodsk, 2005. Vy'p. 7. S. 21–25.

3. Geras'kin D. V., Vasil'ev V. G. Dikarev Ocenka metodami bioindikacii toxnogennogo vozdejstviya na populyacii Pinus sylvestris v rajone predpriyatiya po xraneniyu radioaktivny'x otkodov // E'kologiya. 2005. № 4. S. 275.

4. Kizeev A. N. Izmeneniya morfologicheskix i fiziologo-bioximicheskix pokazatelej xvoi sosny' oby'knovennoj v usloviyax ae'rotoxnogennogo zagryazneniya // Molodoj uchenyj. 2011. T. 1. № 3. S. 120–128.

5. Lebedev A. G. Analiz izmenchivosti kolichestvenny'x priznakov xvoi v populyaciyax sosny' oby'knovennoj (Pinus sylvestris L.) // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2014. T. 16, № 5. S. 205–209.

6. Melexova O. P. i dr. Biologicheskij kontrol' okruzhayushhej sredy'. M.: Izdatel'skij centr "Akademiya", 2010. 288 s.

7. Neverova O. A. Primenenie fitoindikacii v ocenke zagryazneniya okruzhayushhej sredy' // Biosfera. 2012. T. 4. № 1. S. 82–92.

8. Panov A. I., Avdeeva E. V. Bioindikaciya urboe'kosistem po morfologicheskim priznakam xvojny'x rastenij // Xvojny'e boreal'noj zony'. T. XXXV, № 1-2. S. 7–14.

9. Skripal'shnikova L. N., Stasova V. V., Plyashech-nik M. A. Ocenka e'kologicheskogo sostoyaniya sosny' oby'knovennoj na urbanizirovanny'x territoriyax krasnoyarskoj lesostepi // Vestnik KrasGAU. 2013. № 11. S. 176–181.

10. Soboleva O. M., Kondratenko E. P., Pinchuk L. G. Kompleksnaya ocenka sostoyaniya assilyacionnogo

apparata sosny' oby'knovennoj v g. Novokuzneczkе // Vestn. Altaj. gos. agrar. un-ta. 2009. № 7. S. 33–36.

11. Soboleva S. V., Belyaeva K. S., Pochekutov I. S. Sosna oby'knoennaya kak bioindikator zagryazneniya atmosfery' // Lesnoj i ximicheskij komplekсы – problemy' i resheniya : sb. st. po materialam Vseros. na uch.-prakt. konf. / SibGU im. M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2017. S. 25–29.

12. Somov E. V., Kucherenosova A. Yu., Olejnik A. A. Rost sosny' oby'knovennoj v zeleny'x nasazhdeniyax Xabarovska: sostoyanie voprosa, metodika issledovaniy, predvaritel'ny'e rezul'taty' // Aktual'ny'e problemy' lesnogo kompleksa. Sb. nauch. tr. po itogam mezhd. nauch.-texn. konf. "Lesnoj kompleks: sostoyanie i perspektivy' razvitiya". Bryansk : BGITA, 2008. 230 s.

13. Yarmishko V. T. Osobennosti rosta i formirovaniya nazemnoj fitomassy' sosny' // Vliyanie promy'shlennogo atmosfernogo zagryazneniya na sosnovy'e lesa Kol'skogo poluostrova. L., 1990. S. 55–64.

14. Avdeeva E., Ivanov D., Markelova K. Monitoring of objects urban gardening. Information system quality management of urban sites greening // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. International Science and Technology Conference Earth Science, ISTC EarthScience 2022 – Chapter 3. 2022. S. 042087.

15. Avdeeva E., Panov A. Ecosystem approach to assessing the state of the urbanized environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference Far-EastCon 2019. 2020. S. 022032.

16. Aguil, S. Physiological and biochemical response of Albizzia lebbek (L.) Benth. to coal smoke pollution / S. Aguil, S. H. Ahmad, Z. Reshi [et al.] // Pollution Research. 2003. Vol. 22, № 4. R. 489–493.

17. Bharti V. K., Giri A., Kumar K. Fluoride Sources, toxicity and its amelioration: Reviv. Reviv. Sci Toxicol, 2017. 2(1): 021–032. Doi: 10.17352/aest. 000009

18. Linde M., Oborn I., Gustafsson J. P. Effects of changed soil conditions on the mobility of trace metals in moderately contaminated urban soils // Water, Air and Soil Pollut. 2007. Vol. 183. P. 69–83.

19. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil of Shanghai, China: concentrations, distribution and sources / Y. Liu, L. Chen, J. Zhao, Y. Wei, Z. Pan, X.-Z. Meng, Q. Huang, W. Li // Organic Geochemistry. 2010. Vol. 41. P. 355–362.

20. Nikolic B., Bojovic S., Marin P. D. Morpho-anatomical Traits of Pinus Peuce Needles from Natural Populations in Montenegro and Serbia // Plant Biosystems. 2015. Vol. 150(5). P. 1038–1045.

© Авдеева Е. В., Ровных Н. Л.,
Кочанкина А. Б., 2026

Поступила в редакцию 12.01.2026
Принята к печати 27.04.2026

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.817

DOI: 10.64430/1993-0135-2026-2-95-104

Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 2. С. 95–104

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛИТНОГО МАТЕРИАЛА РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ ИЗ КОРЫ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ

А. И. Криворотова, В. Д. Эскин, В. Р. Эскина, Р. Р. Литвин

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

Аннотация. В работе представлены результаты исследований физико-механических свойств плитных материалов, изготовленных из гидродинамически обработанных корьевых масс лиственных пород древесины: березы и осины, а также их смеси. В исходном сырье первой группы плитных материалов на основе коры березы практически полностью преобладала внешняя часть коры (береста), во второй группе использовалась кора осины. В третьей группе образцов из смеси коры березы и осины содержание бересты и луба у березы не контролировалось, соотношение коры березы и осины составило 50/50. Плотность плитных материалов варьировалась от 850 до 1050 кг/м³. Прочность при изгибе для плотности 850 кг/м³ в зависимости от породного состава гидродинамически обработанной коревой массы составила от 16,7 до 17,8 МПа, для плотности 950 кг/м³ – от 19,4 до 20,1 МПа и для плотности 1050 кг/м³ – от 21,7 до 24,1 МПа. Показатели водопоглощения за 24 ч составили от 9,62 до 18,24 %, разбухания за 24 ч – от 6,93 до 13,81 % в зависимости от плотности плит и породного состава гидродинамически обработанной коревой массы. Сравнительный анализ свойств плитных материалов, изготовленных из коры лиственных пород древесины, измельченной с использованием метода гидродинамической обработки, показал, что физико-механические свойства плит незначительно зависят от породного состава коревой массы. В большей степени прочность при изгибе, водопоглощение и разбухание плит на основе гидродинамически обработанной коры лиственных пород зависят от плотности плит, чем от породного состава обрабатываемой коры.

Ключевые слова: кора, береза, осина, лиственные породы, луб, береста, измельчение, экстракция, плитный материал, физико-механические свойства, разбухание, водопоглощение, гидродинамическая обработка, прессование, отходы.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 95–104

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF HARDWOOD BARK BOARD MATERIAL WITH VARIOUS DENSITIES

A. I. Krivorotova, V. D. Eskin, V. R. Eskina, R. R. Litvin

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

Abstract. The paper presents the results of the studies of the physico-mechanical properties of board materials made from hydrodynamically treated bark masses of hardwood species: birch and aspen, as well as their mixtures. The initial raw materials of the first group of board materials based on birch bark were almost dominated by the outer part of the bark (birch bark), aspen bark was used in the second group. In the third group of samples from a mixture of birch bark and aspen, the content of birch bark and bast in birch was not controlled, the ratio of birch bark and aspen was 50/50. The density of the board materials ranged from 850 to 1050 kg/m³. The bending strength for a density of 850 kg/m³, depending on the species composition of the hydrodynamically treated bark mass, ranged from 16.7 to 17.8 MPa, for a density of 950 kg/m³ – from 19.4 to 20.1 MPa, and for a density of 1050 kg/m³ – from 21.7 to 24.1 MPa. The water absorption indicators in 24 hours ranged from 9.62 to 18.24 %, swelling in 24 hours – from 6.93 to 13.81 % depending on the density of the boards and the species composition of the hydrodynamically treated bark mass. A comparative analysis of the properties of board materials made from hardwood bark milled with the help of the hydrodynamic

processing method has shown that the physical and mechanical properties of the boards slightly depend on the species composition of the bark mass. To a greater extent, the bending strength, water absorption and swelling of hydrodynamically treated hardwood bark board materials depend on the density of the boards rather than on the species composition of the bark.

Keywords: bark, birch, aspen, hardwoods, bast, birch bark, milling, extraction, board material, physical and mechanical properties, swelling, water absorption, hydrodynamic treatment, pressing, wastes.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным Государственного лесного реестра общий запас древесины в 2024 году на территории Российской Федерации составлял 82,3 млрд м³. Наибольшую долю от площади лесов традиционно занимает лиственница (28,1 %), на втором месте по занимаемой площади находится сосна – 19,2 %, на долю березы приходится 16,4 % площади лесов [1]. Древесина хвойных пород перерабатывается в деловые пиломатериалы для строительства и производства столярных изделий (окна, двери, паркет, мебель). Лиственные породы древесины в основном используются в фанерном производстве для получения лушеного шпона. Объемы производства фанерных плит ежегодно увеличиваются ввиду высокого спроса внутри страны и на рынках Ближнего Востока и Азии. Суммарно 70 % всего объема экспортируемой фанеры приходится на Сингапур, Китай, Турцию, ОАЭ и Азербайджан [2]. По данным источника [3] начало 2024 года характеризовалось достаточно высоким ростом объемов производства фанеры на 21,4 %, что составляет 546 тыс. м³ готовой продукции. Повышение спроса на фанерные плиты также связано с разработкой новых видов продукции, например, высокопрочной композиционной фанеры, огнеупорной, ламинированной, декоративной и водостойкой фанеры. К отдельному виду фанерной продукции можно отнести латофлексы, применяемые при изготовлении мягкой мебели [4].

Высокие объемы производства приводят к генерированию значительного количества отходов. К основным технологическим отходам фанерного производства можно отнести шпон-рванину, карандаши, отторцовки бревен, мелкоразмерный кусковой шпон, не пригодный для ребросклеивания, и отходы коры. Подобные виды отходов за исключением коры могут быть переработаны в древесную стружку, щепу или муку для дальнейшего использования в технологических процессах производства древесно-стружечных или древесно-волоконистых плит, топливных брикетов и гранул, древесно-полимерных композитов. Отходы окорки в таких производствах остаются невостребованными.

Согласно источнику [5] на фанерно-мебельных комбинатах и иных ведущих предприятиях страны ежедневно образуется до 4,3 т неиспользуемой березовой коры и это несмотря на то, что березовая кора является ценным источником бетулина, суберина, таннидов, которые являются востребованным сырьем для химической отрасли [6–8]. Сложность переработки березовой коры для других отраслей заключается в том, что анатомический и химический состав лубяной части коры березы, составляющей ее основную часть (порядка 80 %), и бересты существенно различается

[9]. Вследствие этого для получения полезных продуктов из коры необходимо отделение луба от бересты в процессе ее переработки и, прежде всего, в процессе измельчения.

Качественное измельчение коры до однородной, гомогенной массы, обеспечивающей равномерность свойств в структуре материала, позволит вовлечь её в различного типа технологии, например, получение топливных брикетов и гранул, плитных материалов [10–12]. Существует целый ряд разработок, которые позволяют упростить процесс разделения бересты и луба, однако большая часть из них предназначена для дальнейшего извлечения экстрактивных веществ.

Для отделения лубяной части от бересты автором патента [13] предложен способ, при котором кору березы обрабатывают кипячением в воде в течение 2 часов с целью размягчения луба, после чего механическим воздействием (соскабливанием, прокатыванием коры в барабане) бересту отделяют от луба. Затем бересту сушат до влажности 3–6 %, после чего возможно извлечение из неё дёгтя.

В патенте [14] предложен способ получения бересты путем отбора березовой коры, не имеющей примесей древесины, подсушивание коры до влажности 20–25 % с последующим измельчением и просеиванием массы через сито для отделения луба от бересты. Измельчение производят в молотковой дробилке при скорости вращения вала не более 1800 об/мин. Согласно работе способ позволяет обеспечить получение биологически активных веществ.

Отделение бересты от луба позволяет повышать качество и чистоту извлекаемых из бересты и луба экстрактивных веществ, однако разделение частей коры труднореализуемо и организация такого высокопроизводительного предприятия затруднительна. В работе [15] предложен способ совмещенной переработки бересты и луба путем СВЧ-экстракции. Измельчение коры производилось на дробилке истирающего типа, после чего кора сортировалась по фракциям. В измельченную кору разных фракций добавляли 86%-й спирт и экстрагировали 10 минут. После чего вакуумом отфильтровывали экстракт и получали бетулин.

В работе [16] отмечено, что в процессе измельчения березовой коры без разделения бересты и луба с последующим фракционированием наблюдается явное разделение, береста остается в крупной фракции, частицы луба в большинстве переходят в мелкую фракцию. Данный факт может быть связан с существенными различиями физических свойств лубяной части коры и бересты. Сложности с измельчением коры березы обусловлены в первую очередь многослойным строением бересты [17; 18]. Благодаря слоистому строению береста при механическом воздей-

вии поглощает деформации, не разрушаясь, в отличие от коры хвойной древесины. Лубяная часть коры также обладает высокой прочностью, хотя в значительно лучшей степени подвергается измельчению. Как отмечено в работе [19], основная сложность измельчения заключается в строении березовой коры и её высокой сопротивляемости резанию. С целью получения из коры березы мелкодисперсной гомогенной шихты, применяемой для производства топливных гранул, авторами предложен способ предварительной термомодификации коры при температуре 250 °C с целью повышения её хрупкости.

Известен опыт получения топливных гранул отходов окорки [20]. Авторами получены топливные гранулы из коры сосны и березы. Предварительно кора измельчалась в роторном ножевом измельчителе, затем кора подвергалась воздействию микроволнового излучения, что вызывало выделение из коры водяных паров, после чего на пресс-грануляторе изготавливались топливные гранулы. Отмечается, что гранулы из коры березы более рыхлые и матовые, в сравнении с гранулами, полученными на основе сосновой коры.

Авторами работы [21] предложен способ получения топливных гранул из березовой коры с гомогенизацией и гранулированием после предварительной термомодификации коры. Авторы утверждают, что в процессе термомодификации кора превращается в хрупкое легко измельчаемое тело. Также отмечается, что теплопроводная способность березовой коры сравнима с традиционными древесными отходами (кроме стружки и щепы).

Таким образом, переработка березовой коры в топливные гранулы возможна и обладает существенным потенциалом, однако основной проблемой остаются высокие трудозатраты при подготовке коры к гранулированию.

Аналогичная проблема подготовки коры к использованию существует и в технологических процессах производства плитных материалов. В последнее десятилетие ведутся целенаправленные исследования по поиску возможностей адаптации традиционных подходов измельчения для коры, а также предлагается большое количество инновационных подходов к процессу переработки древесной коры в плитные материалы.

Использование березовой коры в качестве наполнителя или самостоятельного сырья для получения плитных материалов позволит прийти к решению целого ряда задач: снизить себестоимость готовой продукции за счет использования отходов производства, решить экологическую проблему утилизации и переработки отходов древесины, получить экологичную продукцию без использования синтетических связующих.

В работе [22] авторами получен плитный материал из внешней части березовой коры – бересты и коры сосны. Образцы материала изготавливались двумя способами: с использованием связующего (карбамидоформальдегидной смолы) и без использования связующих. Кора высушивалась и измельчалась с дальнейшей сортировкой. Для прессования брали частицы коры с размером от 20 до 40 мм. Измельченные час-

тицы укладывали между листами лущеного шпона. Прессование осуществлялось при 160 °C продолжительностью 20 мин. Средняя плотность образцов с использованием связующего составила порядка 717 кг/м³, без связующего – около 753 кг/м³. Авторами установлено, что при выдерживании образцов, изготовленных без связующего в течение 60 мин в воде, образцы разрушаются. Связующее в составе образцов позволяет повысить устойчивость материала к влаге.

В работе [23] получены плиты из березовой коры. Предварительно измельченная кора с размерами частиц не более 40 мм подвергалась прессованию при температуре 150 °C без использования связующих. Время выдержки 15 минут. Толщина плит составила 13,5 мм. Плотность – 716 кг/м³. Предел прочности при изгибе – 3,02 МПа. Авторы отмечают следующее: помимо низких прочностных показателей плит в процессе их изготовления происходит обугливание поверхностных слоев.

Можно предположить, что неудовлетворительные показатели водостойкости и низкие показатели прочности материалов из коры березы, представленные в работах выше, обусловлены крупными размерами прессуемых частиц. Как результат поверхность контакта между такими частицами недостаточна для образования связей, способных сохранять свою прочность при воздействии влаги. Использование мелкоизмельченных частиц коры должно способствовать обеспечению высоких показателей прочности и водостойкости.

Работа [24] посвящена получению композиционного плитного материала на основе березовой коры, подвергнутой предварительной активации методом взрывного автогидролиза (ВАГ). Гидролизованная кора подвергалась горячему прессованию при температурах 170, 180 и 190 °C. Прочность при статическом изгибе образцов изменялась в диапазоне от 5,6 до 22,8 МПа, плотность от 947 до 1057 кг/м³. Отмечается, что при повышении температуры прессования возрастают показатели прочности. Авторы связывают это с тем, что увеличение температуры сопровождается вовлечением большого числа реакционноспособных групп в процесс поликонденсации, что приводит к увеличению количества связей и, как следствие, к увеличению прочности.

В работе [25] предложен вариант получения древесно-волоконистых плит на основе коры березы. Согласно работе предварительно измельченная березовая кора разделяется на луб и бересту, после чего бересту измельчают до степени помола 20–21 дефибратор-секунд. Далее измельченная кора, смешанная с водой, поступает на отлив. Прессование ковра осуществляется при температуре прессования 190 °C и давлении прессования 5,5 МПа в течение 8 минут. После прессования на поверхность плиты наносят связующее, в качестве которого выступает таловое масло. Затем плита высушивается при температуре 160 °C в течение 5–6 часов. Свойства плит, получаемых данным способом, следующие: предел прочности при изгибе – 55,2 МПа, водопоглощение за 24 часа – 11,8 %, набухание по толщине – 7,1 %.

Принципиально новым способом подготовки березовой коры к прессованию может служить гидродинамическая обработка с эффектом кавитации. В ранее проведенных работах [26; 27] установлена возможность предварительной подготовки коры хвойных пород древесины перед прессованием в гидродинамическом диспергаторе с целью получения однородной гомогенной массы, обладающей большой удельной поверхностью и способной к образованию прочных связей в процессе прессования материала.

Целью работы является исследование возможности получения плитного материала без связующих веществ из гидродинамически обработанной коры березы и осины без разделения лубяной части и бересты для березы с последующим определением основных физико-механических показателей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве сырья для плитного материала без связующих использовалась кора березы и осины, отобранная на предприятии, занимающимся выпуском фанерной продукции. Березовая кора для одной из групп изготовленных образцов не разделялась на луб и бересту, количество лубяной части не нормировалось. Для изготовления образцов другой группы отбиралась кора, в массе которой преобладала внешняя часть коры – береста. Количество древесины в коре не превышало 10 %. Влажность отходов окорки составила от 30 до 75 %. Кора березы и осины по отдельности измельчалась во влажном состоянии в мельнице молоткового типа до фракции не более 7 мм. Измельченная кора осины и березы предварительно замачивалась на 2 часа в воде, что позволяет существенно сократить цикл гидродинамической обработки в диспергаторе РГГД-1 [28]. Обработка при концентрации частиц коры в воде равной 8 % производится до образования однородной массы, не имеющей в составе включений крупных частиц. Размеры частиц коры березы и осины после гидродинамической обработки

составили менее 1 мм. Для обезвоживания используется отливное сито. После отлива влажность корьевых масс составляла от 350 до 500 % для березовой коры и от 420 до 600 % для осиновой коры.

После обезвоживания массы подпрессовывались в пресс-форме. Применение операции подпрессовки позволяет дополнительно отжать корьевую массу и снизить влажность пакета перед горячим прессованием. Металлическая пресс-форма имеет перфорированное дно, на которое уложена фильтровальная сетка, и пуансон. Давление подпрессовки 0,8 МПа. Влажность пакета плит перед прессованием составляет от 180 до 210 %. Корьевые пакеты прессовались согласно следующим режимным параметрам: температура прессования 210 °С, удельное давление 3 МПа; удельная продолжительность выдержки 3,1 мин/мм. Толщина изготовленных плит составила 8 мм, плотность варьировалась от 850 до 1050 кг/м³. После выдержки плит в течение 24 ч производилась форматная обрезка и изготовление образцов для проведения физико-механических испытаний.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с представленной выше методикой для проведения сравнительного анализа свойств плит были изготовлены три группы образцов. Первая группа на основе коры березы, в составе которой практически полностью преобладала внешняя часть коры (береста). Вторая группа образцов была изготовлена из коры осины. Третья группа образцов из смеси коры березы и осины, при этом у березы содержание в коре бересты и луба не контролировалось. Соотношение коры березы и осины выдерживалось 50/50.

На рис. 1, 3, 5 представлены гистограммы сравнения показателей прочности при изгибе, водопоглощения лицевой поверхностью за 24 ч и разбухания за 24 ч образцов плитного материала плотностью 850, 950 и 1050 кг/м³.

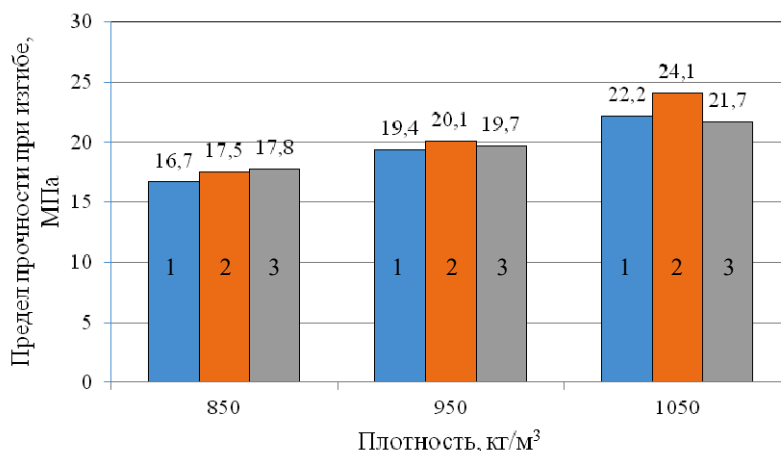


Рис. 1. Сравнительная гистограмма показателя прочности при изгибе образцов на основе гидродинамически обработанной коры:
1 – кора березы; 2 – кора осины; 3 – кора лиственных пород (береза, осина)

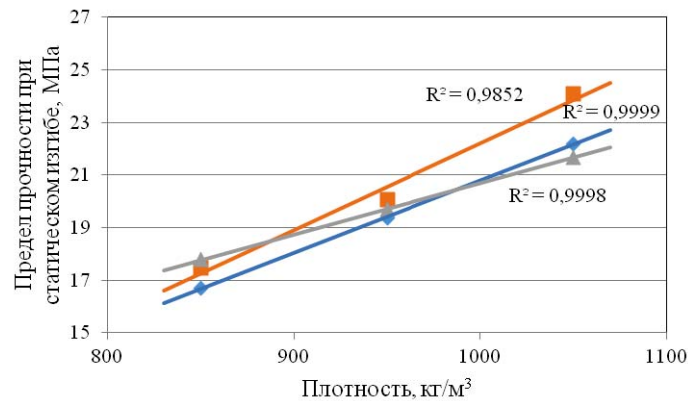


Рис. 2. График зависимости прочности при изгибе образцов на основе гидродинамически обработанной коры:
 ◆ – кора березы; ■ – кора осины; ▲ – кора лиственных пород (береза, осина)

Как видно из рис. 1 все образцы изготовленных плит имеют близкие показатели прочности при изгибе вне зависимости от породного состава коры. Разница в прочностных показателях для образцов плит одной группы плотности находится в диапазоне от 0,7 до 2,4 МПа. Более выражено прочность при изгибе меняется в зависимости от плотности образцов, что наглядно видно на рис. 2. Такой вид зависимости соответствует стандартным представлениям о влиянии плотности на прочность традиционных материалов на основе измельченных древесных частиц [29]. Диапазон изменения прочности при увеличении плотности от 850 до 1050 кг/м³ составляет в зависимости от породного состава коревой массы от 3,9 до 6,6 МПа. При этом графики линейных зависимостей расположены достаточно близко друг к другу, что также может свидетельствовать о том, что свойства плитных материалов на основе гидродинамически обработанной коры зависят, прежде всего, от степени измельчения коры и времени ее обработки, а также от условий прессования, и незначительно зависят от породного состава коревой массы.

Полученные в результате математической обработки экспериментальных данных уравнения регрессии имеют следующий вид:

– для образцов на основе коры березы:

$$\sigma_{\text{изг}} = -4,69167 + 0,0275 \cdot \rho;$$

– для образцов на основе коры осины:

$$\sigma_{\text{изг}} = -8,78333 + 0,033 \cdot \rho;$$

– для образцов на основе смешанного состава коры:

$$\sigma_{\text{изг}} = 3,20833 + 0,0195 \cdot \rho.$$

Коэффициенты регрессии составили соответственно: 0,985; 0,999; 0,999.

Важнейшим эксплуатационным показателем плитных материалов на основе измельченной древесины является их водостойкость. В зависимости от типа плит: древесно-стружечные, древесно-волоконистые, МДФ, водостойкость нормируется через показатели водопоглощения и разбухания. Согласно стандартам [30–32] для древесно-волоконистых плит мокрого способа производства нормируется показатель разбухания по толщине за 24 ч и показатель водопоглощения лицевой поверхностью за 24 ч; для

древесно-волоконистых плит сухого способа производства – показатель разбухания по толщине за 24 ч; для древесно-стружечных плит данные показатели не нормируются, однако указывается, что плиты должны эксплуатироваться в сухих условиях.

На рис. 3 представлена сравнительная гистограмма показателя водопоглощения для рассматриваемых групп образцов. Наименьшими показателями водопоглощения обладают плиты на основе гидродинамически обработанной коры березы. В зависимости от плотности водопоглощение варьируется от 7,62 до 10,12 %. Наибольшими показателями обладает материал на основе гидродинамически обработанной смеси коры лиственных пород древесины (береза, осина) занимает промежуточное значение.

Низкие показатели водопоглощения материала на основе коры березы можно объяснить ее физическим строением и химическим составом. Как было отмечено выше, березовая кора имеет две четко определенные части – внешнюю и внутреннюю, которые имеют значительные отличия по химическому составу. Наибольшее количество экстрактивных веществ находится во внешней части коры бересты [33]. Экстрактивные вещества, извлекаемые из луба березовой коры, отличаются от экстрактивных веществ из бересты и количественным, и качественным составом. Физически береста обладает более плотной структурой, меньшей смачиваемостью поверхности, малой впитываемостью. Луб более пористый, менее плотный. Для экспериментальных исследований в образцы из коры березы в качестве исходного сырья большей частью отбиралась именно внешняя часть коры (береста), при изготовлении образцов материала на основе лиственных пород древесины использовались кора березы без предварительной сортировки. Такой способ отбора исходного сырья для образцов позволил провести сравнительный анализ свойств полученных плитных материалов и оценить степень необходимости отделения бересты от луба в производственном процессе как в случаях применения березовой коры для получения экстрактивных веществ.

Результаты математической обработки экспериментальных данных, описывающие зависимости водопоглощения следующие:

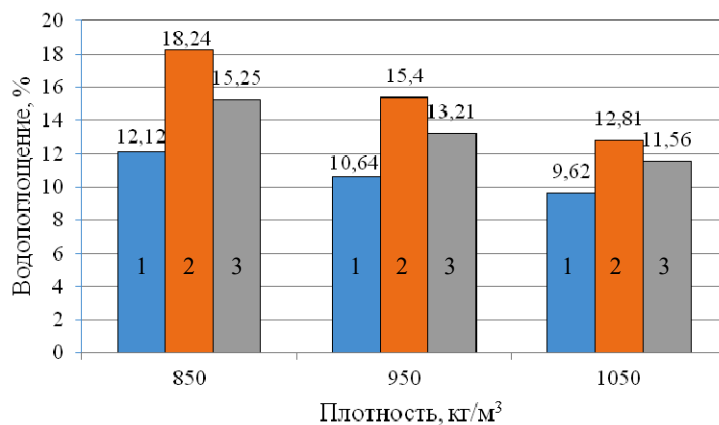


Рис. 3. Сравнительная гистограмма показателя водопоглощения образцов на основе гидродинамически обработанной коры:

1 – кора березы; 2 – кора осины; 3 – кора лиственных пород (береза, осина)

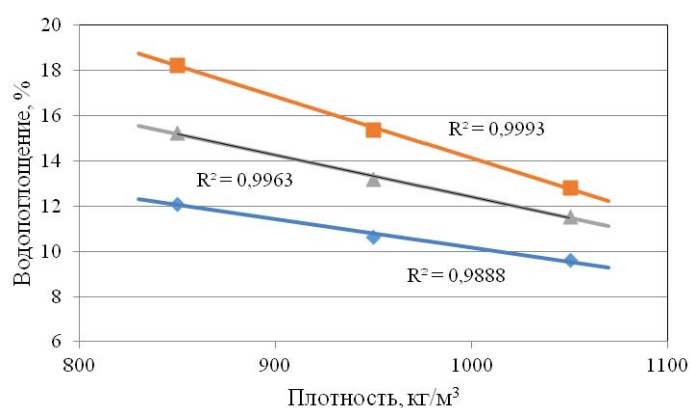


Рис. 4. График зависимости водопоглощения образцов на основе гидродинамически обработанной коры:

♦ – кора березы; ■ – кора осины; ▲ – кора лиственных пород (береза, осина)

– для образцов на основе коры березы:

$$W = 20,6683 - 0,0125 \cdot \rho; R^2 = 0,988;$$

– для образцов на основе коры осины:

$$W = 39,2758 - 0,02715 \cdot \rho; R^2 = 0,999;$$

– для образцов на основе смешанного состава коры:

$$W = 28,8675 - 0,01845 \cdot \rho; R^2 = 0,996.$$

На рис. 5 приведена сравнительная гистограмма показателя разбухания плит за 24 ч. Как видно из гистограммы тенденция изменения показателей разбухания соответствует картине изменения показателей водопоглощения. Наименьшие показатели разбухания наблюдаются у образцов плит из гидродинамически обработанной коры березы, наибольшие из обработанной коры осины. Минимальным показателем обладает плита на основе гидродинамически обработанной коры березы плотностью 1050 кг/м³ – 6,93 %, наибольшим показателем разбухания обладает плита на основе гидродинамически обработанной коры осины плотностью 850 кг/м³ – 13,81 %.

При описании зависимости показателя разбухания от плотности плит исследуемых образцов, рисунок 6, уравнения регрессии имели следующий вид:

– для образцов на основе коры березы:

$$\Delta = 15,0383 - 0,0097 \cdot \rho;$$

– для образцов на основе коры осины:

$$\Delta = 25,2358 - 0,01595 \cdot \rho;$$

– для образцов на основе смешанного состава коры:

$$\Delta = 19,1225 - 0,01095 \cdot \rho.$$

При исследовании показателей разбухания и водопоглощения было отмечено, что образцы плитных материалов на основе трех групп образцов отличались насыщенностью цвета плит после выдержки в воде, при этом центральная часть плитного материала цвет не изменяла. Это можно объяснить различной степенью смачиваемости поверхности плит, изготовленных на основе коры разного породного состава. Подтверждением данного предположения служат проведенные исследования по определению краевого угла смачивания поверхности плит, изготовленных из гидродинамически обработанной коры березы, осины и смеси данных пород. Краевой угол смачивания воды для плит на основе гидродинамически обработанной коры березы имеет наиболее высокие значения в сравнении с плитами на основе обработанной коры осины.

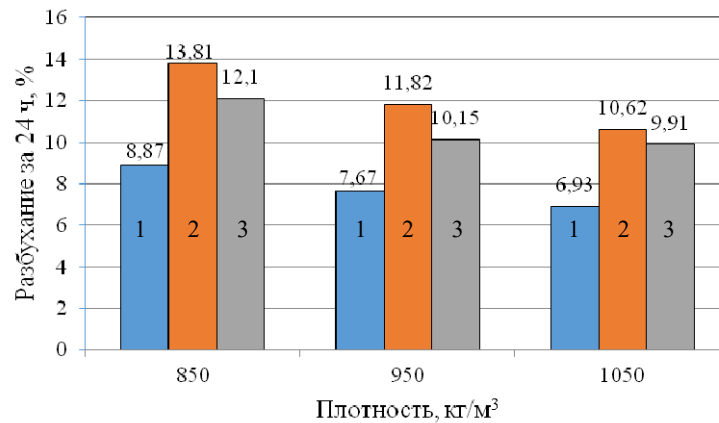


Рис. 5. Сравнительная гистограмма показателя разбухания образцов на основе гидродинамически обработанной коры:

1 – кора березы; 2 – кора осины; 3 – кора лиственных пород (береза, осина)

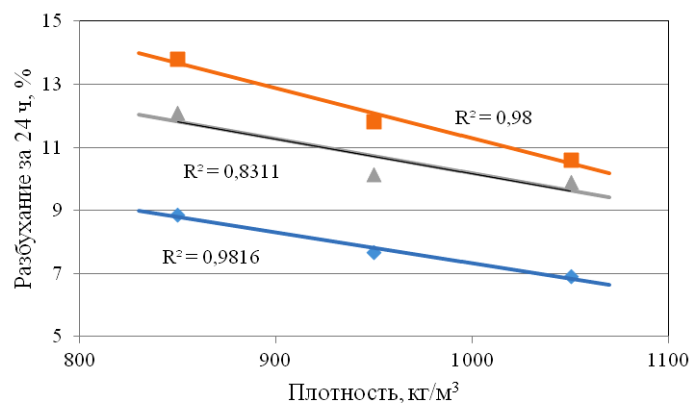


Рис. 6. График зависимости разбухания образцов на основе гидродинамически обработанной коры:

♦ – кора березы; ■ – кора осины; ▲ – кора лиственных пород (береза, осина)

ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ свойств плитных материалов, изготовленных с использованием для измельчения коры основных лиственных пород, применяемых в фанерном производстве, метода гидродинамической обработки показал, что физико-механические свойства плит зависят, прежде всего, от степени измельчения коры и времени ее обработки, и незначительно зависят от породного состава коревой массы.

2. Наилучшими показателями обладают плиты на основе гидродинамически обработанной коры березы, в большей своей массе содержащей внешнюю часть коры бересты. Отличие в показателях водопоглощения плитного материала на основе коры березы объясняется ее физическим строением и химическим составом.

3. Плиты на основе гидродинамически обработанной коры лиственных пород древесины имеют близкие значения показателей водопоглощения и разбухания, следовательно, можно говорить, что водостойкость получаемых материалов мало зависит от породного состава используемой для гидродинамической обработки коры.

4. Прочностные свойства, водопоглощение, разбухание плит на основе гидродинамически обработанной коры лиственных пород в большей степени зависят от плотности плит, чем от породного состава обрабатываемой коры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Федеральное агентство лесного хозяйства [Электронный ресурс] // Рослесхоз: запасы древесины в 2024 году. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/news/federal/rosleskhoz-zapas-drevesiny-v-2024-godu-vyros-na-16-mln-m3/> (дата обращения: 08.10.2025).
2. ЛесПромИнформ [Электронный ресурс]. 2025. № 4 (188) // Российский рынок фанеры после кризиса. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6878> (дата обращения: 08.10.2025).
3. BUMANS [Электронный ресурс] // Динамика производства и экспорта фанеры в России в 2024 году. URL: <https://bumans.ru/stati/dinamika-proizvodstva-i-eksporta-fanery-v-rossii-v-2024-godu/> (дата обращения: 14.10.2025).
4. ЛесПромИнформ [Электронный ресурс]. 2023. № 4 (174). // Фанерные предприятия России: состояние и перспективы. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6533> (дата обращения: 14.10.2025).
5. Инженерная методика расчета установки извлечения бегулина из бересты березы / А. В. Сафина, Д. Ф. Зиятдинова, Л. Р. Назипова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 1 (397). С. 195–207.
6. Решетник Е. И., Максимюк В. А. Перспективы использования экстракта коры березы в технологии функциональных продуктов питания // Агропромыш-

ленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году экологии в России. В 2-х ч., Благовещенск, 05 апреля 2017 года. Ч. 1. Благовещенск : Дальневосточ. гос. аграр. ун-т, 2017. С. 149–152.

7. Тургунбаев Ш. Ш., Хаитбаев А. Х. Получение экстрактивных веществ березы // *Universum: химия и биология*. 2020. № 8-1(74). С. 27–31.

8. Suberin Fatty Acids from Outer Birch Bark: Isolation and Physical Material Characterization / J. Heinämäki, U. Paaver, K. Kogermann [et al.] // *Journal of Natural Products*. 2017. Vol. 80, No. 4. P. 916–924.

9. Сафин Р. Г., Валеев К. В., Фахрутдинова Л. Р. Свойства коры березы, влияющие на сепарацию бересты от луба // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2025. № 1(403). С. 197–209.

10. Conversion of birch bark to biofuels / I. Kumaniaev, K. Navare, N. Crespo Mendes [et al.] // *Green Chemistry*. 2020. Vol. 22, No. 7. P. 2255–2263.

11. Renewable pellets obtained from aspen and birch bark / R. Dumitrascu, A. Lunguleasa, C. Spirchez // *BioRes*. 2018. 13(3). P. 6985–7001.

12. The effect of birch-bark addition on the elemental composition and combustion characteristics of different types of biomass pellets / I. Barmina, M. Zake, R. Valdmanis [et al.] // *Chemical Engineering Transactions*. 2014. Vol. 39, Special Issue. P. 1525–1530.

13. Авторское свидетельство № 78328 А1 СССР, МПК В27J 3/00, В27К 1/02, В27L 1/00. Способ отделения бересты от березовой коры : № 393230 : заявл. 12.03.1949 : опубл. 01.01.1949 / И. Г. Поварнин.

14. Патент № 2288093 С2 Российская Федерация, МПК В27L 11/02. Способ получения бересты : № 2004136877/12 : заявл. 16.12.2004 : опубл. 27.11.2006 / В. В. Балакшин, А. Н. Чистяков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Березовый мир».

15. Совмещенная переработка бересты и луба / А. И. Бадогина, С. И. Третьяков, Н. А. Кутакова [и др.] // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов : Международная научно-техническая конференция, Минск, 18–20 ноября 2015 года. Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2015. С. 370–372.

16. Extraction of betulin from the birch bark balance at pulp and paper production / E. N. Koptelova, N. A. Kutakova, S. I. Tretjakov [et al.] // *Wood Research*. 2020. Vol. 65, No. 5. P. 833–842.

17. Shibui H., Sano Y. Structure and formation of phellem of *Betula maximowicziana* // *IAWA Journal*. 2018. Vol. 39, No. 1. P. 18–36.

18. Krasutsky P. A. Birch bark research and development // *Natural Product Reports*. 2006. Vol. 23, No. 6. P. 919–942.

19. Энергетический потенциал биотоплива из коры лиственных пород древесины / В. И. Мелехов, О. Д. Мюллер, Н. Г. Пономарева [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 28–37.

20. Федосенко И. Г. Оценка возможности использования коры деревьев, произрастающих в Республи-

ке Беларусь, для производства гранул // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 2(246). С. 284–289.

21. Пономарева, Н. Г. Переработка древесной коры в энергоэффективное топливо / Н. Г. Пономарева, Т. В. Тюрикова // Форум молодых ученых. 2017. № 2(6). С. 214–218.

22. Коновалов К. Э., Микрюкова Е. В. Определение водостойкости плитных материалов из березовой и сосновой коры // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. в рамках Международного молодежного форума по лесопромышленному образованию (Лес–Наука–Инновации–2022), Минск, 06–09 декабря 2022 года / Белорусский государственный технологический университет. Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2022. С. 110–113.

23. Семенова, Е. Г. Изготовление плитных материалов из березовой коры / Е. Г. Семенова // Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам : сб. науч. тр. по результатам работы V Междунар. молодежной науч. практ. конф., Вологда–Молочное, 23 апреля 2020 года. Т. 3, ч. 1. Вологда–Молочное : Вологод. гос. молочнохозяйственная акад. им. Н. В. Верещагина, 2020. С. 252–255.

24. Плитный композиционный материал, полученный из коры березы после предварительной активации методом взрывного автогидролиза / Ю. Г. Скурыдин, Е. М. Скурыдина, В. В. Коньшин, Н. Ж. Юку // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : материалы VII Всерос. конф. с междунар. участием, Барнаул, 24–28 апреля 2017 года. Барнаул : Алтайский гос. ун-т, 2017. С. 337–338.

25. Патент № 2240334С1 Российская Федерация, МПК С08L 97/02. Композиция на древесной основе: №2003118707/04: заявл. 25.06.2003: опубл.20.11.2004/ Ю. И. Стернин, И. В. Юрченко, А. И. Загоруйко ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТрансПлюс».

26. Эскин В. Д., Криворотова А. И., Ермолин В. Н. Влияние мелкодисперсной фракции на основные свойства пресс-массы и плитного материала без связующих веществ из коры *Pinus sylvestris* // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43, № 1. С. 78–84.

27. Эскин В. Д., Ермолин В. Н., Криворотова А. И. Конструкционные плиты из гидродинамически активированной коры сосны (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 5(401). С. 175–187.

28. Патент № 2818825 С1 Российская Федерация, МПК В27N 3/04. Способ изготовления корьевой плиты : № 2024105657 : заявл. 05.03.2024 : опубл. 06.05.2024 / В. Д. Эскин, А. И. Криворотова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева».

29. Шварцман Г. М., Щедро Д. А. Производство древесностружечных плит. 4-е изд. перераб. и доп. М. : Лесная пром-сть, 1987. 320 с.

30. ГОСТ 10632–2014. Плиты древесно-стружечные. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2014. 14 с.

31. ГОСТ 4598–2018. Плиты древесно-волоконистые мокрого способа производства. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с.

32. ГОСТ 32274–2021. Плиты древесно-волоконистые сухого способа производства. Технические условия. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 21 с.

33. Белякова А. Ю., Погребняк А. В., Погребняк Л. В. Физико-химические и биологические свойства компонентов внешней коры березы // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 492.

REFERENCES

1. Federal'noe agenstvo lesnogo hozyajstva [Elektronnyj resurs] // Rosleskhoz: zapasy drevesiny v 2024 godu. URL: <https://rosleskhoz.gov.ru/news/federal/rosleskhoz-zapas-drevesiny-v-2024-godu-vyros-na-16-mln-m3/> (data obrashcheniya: 08.10.2025).
2. LesPromInform [Elektronnyj resurs]. 2025. № 4 (188) // Rossijskij rynek fanery posle krizisa. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6878> (data obrashcheniya: 8.10.2025).
3. BUMANS [Elektronnyj resurs] // Dinamika proizvodstva i eksporta fanery v Rossii v 2024 godu. URL: <https://bumans.ru/stati/dinamika-proizvodstva-i-eksporta-fanery-v-rossii-v-2024-godu/> (data obrashcheniya: 14.10.2025).
4. LesPromInform [Elektronnyj resurs]. 2023. № 4 (174) // Fanernye predpriyatiya Rossii: sostoyanie i perspektivy. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6533> (data obrashcheniya: 14.10.2025).
5. Inzhenernaya metodika rascheta ustanovki izvlecheniya betulina iz beresty berezy / A. V. Safina, D. F. Ziatdinova, L. R. Nazipova [i dr.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2024. № 1(397). S. 195–207.
6. Reshetnik E. I., Maksimyuk V. A. Perspektivy ispol'zovaniya ekstrakta kory berezy v tekhnologii funkcional'nyh produktov pitaniya // Agropromyshlennyy kompleks: problemy i perspektivy razvitiya : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Godu ekologii v Rossii. V 2-h chastyah, Blagoveshchensk, 05 aprelya 2017 goda. Tom Chast' 1. Blagoveshchensk : Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2017. S. 149–152.
7. Turgunbaev Sh. Sh., Haitbaev A. H. Poluchenie ekstraktivnyh veshchestv berezy // Universum: himiya i biologiya. 2020. № 8-1(74). S. 27–31.
8. Suberin Fatty Acids from Outer Birch Bark: Isolation and Physical Material Characterization / J. Heinämäki, U. Paaver, K. Kogermann [et al.] // Journal of Natural Products. 2017. Vol. 80, No. 4. P. 916–924.
9. Safin R. G., Valeev K. V., Fahrudinova L. R. Svoystva kory berezy, vliyayushchie na separaciyu beresty ot luba // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2025. № 1(403). S. 197–209.
10. Conversion of birch bark to biofuels / I. Kumaniaev, K. Navare, N. Crespo Mendes [et al.] // Green Chemistry. 2020. Vol. 22, No. 7. P. 2255–2263.
11. Dumitrascu R., Lunguleasa A., Spirchez C. Renewable pellets obtained from aspen and birch bark // BioRes. 2018. 13(3). P. 6985–7001.
12. The effect of birch-bark addition on the elemental composition and combustion characteristics of different types of biomass pellets / I. Barmina, M. Zake, R. Valdmans [et al.] // Chemical Engineering Transactions. 2014. Vol. 39, Special Issue. P. 1525–1530.
13. Avtorskoe svidetel'stvo № 78328 A1 SSSR, MPK B27J 3/00, B27K 1/02, B27L 1/00. Spособ otdeleniya beresty ot berezovoy kory : № 393230 : zayavl. 12.03.1949 : opubl. 01.01.1949 / I. G. Povarnin.
14. Patent № 2288093 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK B27L 11/02. spособ polucheniya beresty : № 2004136877/12 : zayavl. 16.12.2004 : opubl. 27.11.2006 / V. V. Balakshin, A. N. Chistyakov ; zayavitel' Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Berezovyy mir".
15. Sovmeshchennaya pererabotka beresty i luba / A. I. Badogina, S. I. Tret'yakov, N. A. Kutakova [i dr.] // Novejschie dostizheniya v oblasti innovacionnogo razvitiya v himicheskoy promyshlennosti i proizvodstve stroitel'nyh materialov : Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya, Minsk, 18–20 noyabrya 2015 goda. Minsk : Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, 2015. S. 370–372.
16. Extraction of betulin from the birch bark balance at pulp and paper production / E. N. Koptelova, N. A. Kutakova, S. I. Tret'yakov [et al.] // Wood Research. 2020. Vol. 65, No. 5. P. 833–842.
17. Shibui H., Sano Y. Structure and formation of phellem of *Betula maximowicziana* // IAWA Journal. 2018. Vol. 39, No. 1. P. 18–36.
18. Krasutsky P. A. Birch bark research and development // Natural Product Reports. 2006. Vol. 23, No. 6. P. 919–942.
19. Energeticheskij potencial biotopliva iz kory listvennyh porod drevesiny / V. I. Melekhov, O. D. Myuller, N. G. Ponomareva [i dr.] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tekhnologii. 2019. № 3. S. 28–37.
20. Fedosenko I. G. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya kory derev'ev, proizrastayushchih v Respublike Belarus', dlya proizvodstva granul // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vobnovlyayemykh resursov. 2021. № 2(246). S. 284–289.
21. Ponomareva N. G., Tyurikova T. V. Pererabotka drevesnoj kory v energoeffektivnoe toplivo // Forum molodyh uchenykh. 2017. № 2(6). S. 214–218.
22. Konovalov K. E., Mikryukova E. V. Opredelenie vodostojkosti plitnyh materialov iz berezovoy i sosnovoy kory // Sostoyanie i perspektivy razvitiya lesnogo kompleksa v stranah SNG : sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii v ramkah Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma po lesopromyshlennomu obrazovaniyu (Les–Nauka–Innovacii–2022), Minsk, 06–09 dekabrya 2022 goda / Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, 2022. S. 110–113.
23. Semenova E. G. Izgotovlenie plitnyh materialov iz berezovoy kory // Molodye issledovateli agropromyshlen-

nogo i lesnogo kompleksov – regionam : Sbornik nauchnyh trudov po rezul'tatam raboty V Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Vologda–Molochnoe, 23 aprelya 2020 goda. T. 3, Chast' 1. Vologda–Molochnoe : Vologodskaya gosudarstvennaya molochnohozyajstvennaya akademiya im. N. V. Vereshchagina, 2020. S. 252–255.

24. Plitnyj kompozicionnyj material, poluchennyj iz kory berezy posle predvaritel'noj aktivacii metodom vzryvnogo avtogidroliza / Yu. G. Skurydin, E. M. Skurydina, V. V. Kon'shin, N. Zh. Yuku // Novye dostizheniya v himii i himicheskoy tekhnologii rastitelnogo syr'ya : materialy VII Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Barnaul, 24–28 aprelya 2017 goda. Barnaul : Altajskij gosudarstvennyj universitet, 2017. S. 337–338.

25. Patent № 2240334C1 Rossijskaya Federaciya, MPK S08L 97/02. Kompoziciya na drevesnoj osnove: №2003118707/04: zayavl. 25.06.2003: opubl.20.11.2004/ Yu. I. Stermin, I. V. Yurchenko, A. I. Zagorujko; zayavitel' Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu “TransPlyus”.

26. Eskin V. D., Krivorotova A. I., Ermolin V. N. Vliyanie melkodispersnoj frakcii na osnovnye svojstva press-massy i плитного материала без связующих веществ из коры *Pinus sylvestris* // Hvojnye boreal'noj zony. 2025. T. 43, № 1. S. 78–84.

27. Eskin V. D., Ermolin V. N., Krivorotova A. I. Konstrukcionnye plity iz gidrodinamicheski aktivirovan-

noj kory sosny (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2024. № 5(401). S. 175–187.

28. Patent № 2818825 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B27N 3/04. Sposob izgotovleniya kor'евой плиты : № 2024105657 : zayavl. 05.03.2024 : opubl. 06.05.2024 / V. D. Eskin, A. I. Krivorotova ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya “Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva”.

29. Shvarcman G. M., Shchedro D. A. Proizvodstvo drevesno-struzhechnyh плит. Izdanie 4-e pererabotannoe i dopolnennoe. M. : Lesnaya promyshlennost', 1987. 318 s.

30. GOST 10632–2014. Plity drevesno-struzhechnye. Tekhnicheskie usloviya. M. : Standartinform, 2014. 14 s.

31. GOST 4598–2018. Plity drevesno-voloknistye mokrogo sposoba proizvodstva. Tekhnicheskie usloviya. M. : Standartinform, 2019. 12 s.

32. GOST 32274–2021. Plity drevesno-voloknistye suhogo sposoba proizvodstva. Tekhnicheskie usloviya. M. : Rossijskij institut standartizacii, 2021. 21 s.

33. Belyakova A. Yu., Pogrebnyak A. V., Pogrebnyak L. V. Fiziko-himicheskie i biologicheskie svojstva komponentov vneshnej kory berezy // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. № 2-2. S. 492.

© Криворотова А. И., Эскин В. Д.,
Эскина В. Р., Литвин Р. Р., 2026

Поступила в редакцию 05.11.2025
Принята к печати 27.04.2026

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 66.061:630*8:658.562

DOI: 10.64430/1993-0135-2026-2-105-110

Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 2. С. 105–110

РАЗРАБОТКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ПЕРЕРАБОТКИ КЕДРОВЫХ ШИШЕК

Ж. А. Кох

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: jannetta-83@mail.ru

Аннотация. Существующие подходы к утилизации отходов переработки кедровых шишек не позволяют в полной мере реализовать потенциал ценного вторичного сырья. Для рационального использования биоресурсов и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду необходима разработка и внедрение технологий глубокой переработки вторичного сырья шишек сосны кедровой (*Pinus sibirica*), обеспечивающих получение экстрактов с высокими качественными показателями. Значительного повышения эффективности извлечения целевых компонентов можно достичь путем комбинирования механоактивации и оптимизированных параметров жидкостной экстракции. Данный подход не только интенсифицирует выход целевых компонентов, но и создает основу для формирования производственных нормативов аналитического контроля. Цель настоящего исследования заключалась в научном обосновании системы производственных показателей для процесса экстракции вторичного сырья переработки кедровых шишек с последующим изучением кинетики накопления экстрактивных и дубильных веществ в зависимости от продолжительности настаивания. С применением диаграммы Исикавы систематизированы факторы, влияющие на эффективность извлечения. Экспериментально установлено, что оптимальная продолжительность процесса составляет 24 часа, обеспечивая выход целевых компонентов на уровне 90–95 % от максимального. Предложена система нормируемых показателей, включающая параметры входного контроля сырья, технологического процесса и качества готового продукта.

Ключевые слова: вторичное сырье; остоны шишек сосны кедровой (*Pinus sibirica*); экстракция; производственные показатели; аналитический контроль; экстрактивные вещества; дубильные вещества; время настаивания; кинетика экстракции.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 105–110

DEVELOPMENT OF PRODUCTION INDICATORS FOR ANALYTICAL QUALITY CONTROL OF THE EXTRACTION PROCESS OF SECONDARY RAW MATERIALS FROM SIBERIAN PINE CONES PROCESSING

Zh. A. Kokh

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: jannetta-83@mail.ru

Abstract. Existing approaches to the disposal of processing waste from Siberian pine cones do not allow for the full realization of the potential of valuable secondary raw materials. For the rational use of biological resources and the reduction of anthropogenic impact on the environment, it is necessary to develop and implement technologies for the deep processing of secondary raw materials from Siberian pine (*Pinus sibirica*) cones, ensuring the production of extracts with high quality indicators. A significant increase in the efficiency of extracting target components can be achieved by combining mechanical activation and optimized parameters of liquid extraction. This method not only intensifies the yield of target components but also establishes a foundation for the formulation of production standards for analytical control. The aim of this study was to provide scientific substantiation for a system of production indicators for the extraction process of secondary raw materials from pine cone processing, followed by investigation of the accumulation kinetics of extractive substances and tannins depending on maceration duration. Using an Ishikawa diagram, factors influencing extraction efficiency were systematized. It was experimentally established that the optimal

process duration is 24 hours, ensuring a yield of target components at the level of 90–95 % of the maximum. A system of standardized indicators is proposed, including parameters for raw material input control, the technological process, and finished product quality.

Keywords: *secondary raw materials, Siberian pine (*Pinus sibirica*) cone husks, extraction, production indicators, analytical control, extractive substances, tannins; maceration time, extraction kinetics.*

ВВЕДЕНИЕ

Масштабным источником образования биоотходов в России выступает лесная отрасль, ежегодно генерирующая до 10 млн тонн отходов лесоводства. Значительная доля этого объема приходится на отходы промысла кедрового ореха – остоны и чешуйки шишек после обрушения. В глобальном контексте нерациональное обращение с подобными отходами (включая сжигание) вносит вклад в эмиссию парниковых газов, достигающую 3,3 млрд тонн CO₂-эквивалента. Текущая практика утилизации вступает в противоречие с принципами ресурсосбережения и целями устойчивого развития, требуя безотлагательного пересмотра технологических подходов [3; 7]. В ответ на экологические вызовы сформировалась концепция биопереработки, позиционирующая растительные отходы не как балласт, а как возобновляемое сырье для создания продуктов с высокой добавленной стоимостью. В отличие от сжигания (получение энергии низкого потенциала), глубокая переработка позволяет извлекать из биомассы ценные компоненты для косметической, фармацевтической и пищевой отраслей. Ключевые критерии разработки устойчивого процесса включают: экологичность методов (применение «зеленых» растворителей и мягких режимов экстракции); энергоэффективность (минимизация энергозатрат на всех стадиях); полная утилизация всех технологических потоков (например, использование шрота после экстракции для производства сорбентов или удобрений) [7; 9; 10]. В соответствии с концепцией биопереработки, вторичное сырье растительного происхождения рассматривается как ценный источник биологически активных веществ для косметической, фармацевтической и пищевой промышленности [1; 3; 11]. Данная концепция представляет собой интегрированную платформу для глубокой конверсии биомассы в широкий спектр продуктов – от энергоносителей до химических веществ с высокой добавленной стоимостью [1; 3; 7].

На государственном уровне данное направление поддерживается технологической платформой «БиоТех 2030», что подчеркивает стратегическую важность замещения продуктов нефтехимии возобновляемым растительным сырьем [1]. Расширение использования биоотходов и побочных продуктов является глобальным приоритетом, способствующим снижению антропогенной нагрузки на экосистемы и смягчению последствий изменения климата [3; 6; 11]. Вторичное сырье шишек сосны кедровой (остоны, чешуйки) представляют собой сложный природный комплекс, содержащий широкий спектр экстрактивных веществ: фенольные соединения (включая флавоноиды и фенолкарбоновые кислоты), они обладают антиоксидантной активностью; терпеноиды проявляют противовоспалительные и антимикробные свойства;

дубильные вещества (гидролизуемые и конденсированные танины) ценные компоненты для медицинской и кожевенной промышленности; смолистые вещества потенциальная основа для получения клеев, лаков и компонентов фармпрепаратов [2; 4; 13; 14]. Несмотря на доказанный богатый состав, переход от лабораторных исследований к промышленному производству сдерживается отсутствием унифицированной системы оценки качества [8; 12].

Ключевым барьером для коммерциализации технологий переработки вторичного сырья шишек сосны кедровой является отсутствие системы производственных показателей аналитического контроля. Стандартизация необходима для обеспечения воспроизводимости результатов и гарантии качества конечной продукции.

Разработка такой системы должна включать три уровня контроля: входной контроль сырья – оценка подлинности, влажности, содержания экстрактивных веществ и тяжелых металлов; технологический контроль – мониторинг параметров процесса экстракции (температура, гидромодуль, продолжительность, эффективность измельчения); контроль готовой продукции – идентификация и количественное определение маркерных соединений (например, суммы фенольных соединений или конкретных терпеноидов), микробиологическая чистота.

Цель исследования – научное обоснование и разработка производственных показателей для аналитического контроля процесса экстракции вторичного сырья переработки кедровых шишек (остонов после обрушения).

Для создания научно обоснованной базы переработки данного вида сырья необходимо решение следующих задач:

1. Провести анализ влияния технологических параметров на выход и состав экстрактивных веществ.
2. Экспериментальным путем определить зависимости концентрации биологически активных веществ в экстракте от времени для выявления точки равновесия в системе «сырье — экстрагент».
3. Установить оптимальное время продолжительности настаивания как нормируемого параметра, обеспечивающего баланс между полнотой извлечения и экономической целесообразностью.
4. Предложить систему производственных показателей для включения в нормативную документацию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выступало вторичное сырье шишек сосны кедровой (*Pinus sibirica*) (остоны, чешуйки) после обрушения (отходы производства кедрового ореха) [1; 2; 14]. Для изучения

зависимости выхода экстрактивных веществ от времени настаивания навески сырья массой 5,0 г (точность взвешивания $\pm 0,01$ г) помещали в экстрактор и заливали экстрагентом – водно-этанольным раствором с концентрацией 40 % – до полного покрытия материала (образования «зеркала») [12; 14]. Процесс экстракции вели дискретно в течение заданных временных интервалов: 5, 10, 15, 20, 25 и 75 часов. По окончании каждого интервала в полученных извлечениях определяли содержание целевых компонентов: сумму экстрактивных веществ (гравиметрическим методом); содержание дубильных веществ (титриметрическим методом) [2; 5; 13]. Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для систематизации факторов, влияющих на эффективность извлечения биологически активных веществ из вторичного сырья, и обоснования выбора ключевых контролируемых параметров была применена причинно-следственная диаграмма Исикавы (рис. 1). В качестве центральной проблемы определена необходимость разработки повышения эффективности извлечения целевых компонентов из отходов переработки кедровых шишек как системы производственных показателей для аналитического контроля.

Диаграмма, представленная на рис. 1, позволила перейти от неструктурированного перечня факторов к обоснованному планированию эксперимента. Фиксация таких параметров, как тип экстрагента (40 % этанол) и метод анализа, при варьировании времени настаивания, соответствует классическому однофакторному эксперименту и позволяет изолированно изучить влияние именно временного фактора. Выход экстрактивных веществ рассматривается как основной производственный показатель эффективности процесса, интегрирующий результаты как экстракции. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Динамика накопления экстрактивных и дубильных веществ в зависимости от продолжительности экстракции вторичного сырья шишек сосны кедровой (водно-этанольный раствор 40 %)

Время настаивания, ч	Содержание экстрактивных веществ, %	Содержание дубильных веществ, %
5	$2,68 \pm 0,83$	$3,15 \pm 0,91$
10	$4,25 \pm 0,81$	$4,79 \pm 0,82$
15	$6,38 \pm 0,79$	$8,25 \pm 0,88$
20	$8,88 \pm 0,82$	$10,18 \pm 0,91$
25	$9,51 \pm 0,86$	$12,15 \pm 0,94$
75	$10,95 \pm 0,88$	$15,75 \pm 0,95$

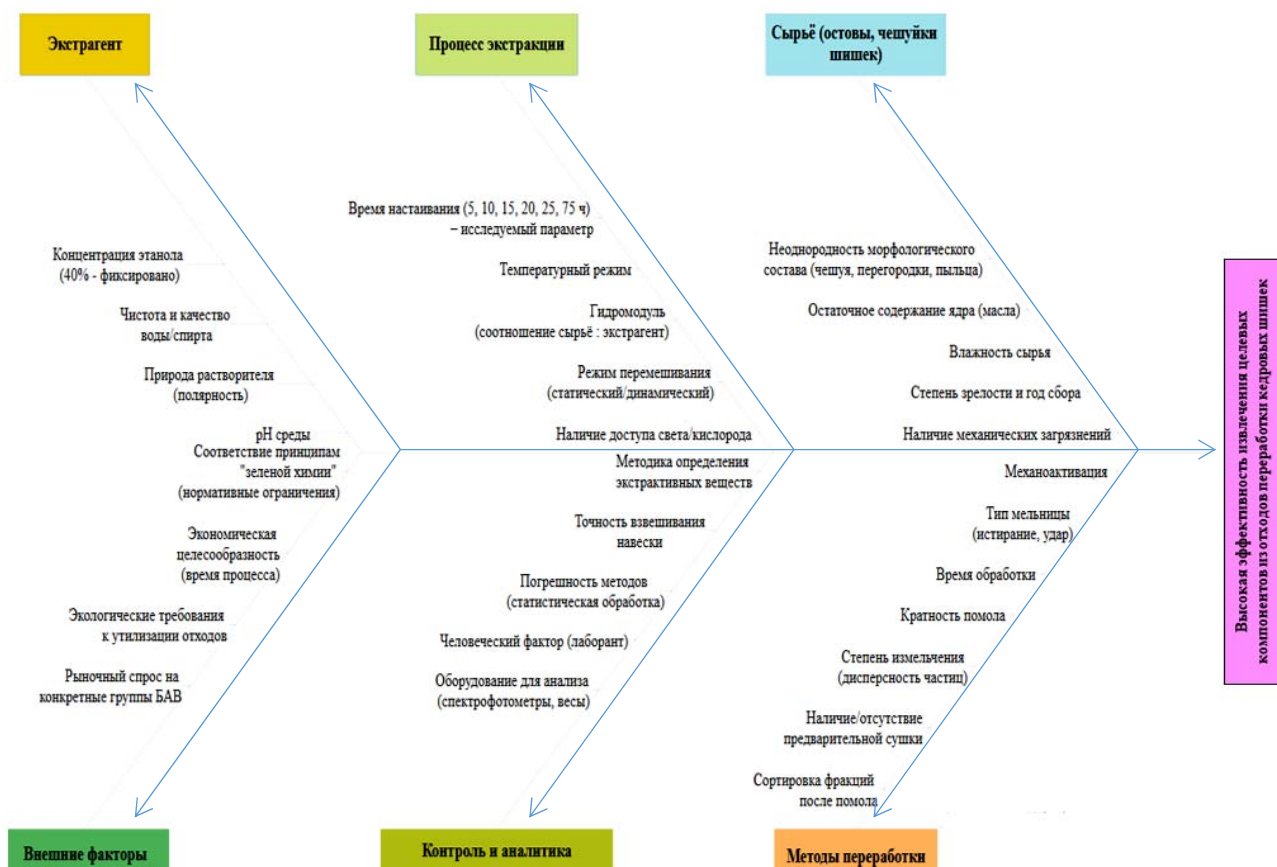


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма факторов, влияющих на разработку производственных показателей контроля экстракции

Экспериментальные данные, представленные в табл. 1, позволяют выделить ключевые закономерности массопереноса: стадия интенсивной экстракции от 0 до 20 часов происходит активное извлечение веществ с поверхности и из легко доступных клеточных структур сырья. Увеличение количества экстрактивных веществ составил 6,2 % абс., дубильных 7,03 % абс. Высокая начальная скорость обусловлена большой разностью концентраций в сырье и экстрагенте. Стадия замедления наступает в период от 20 до 25 часов, скорость процесса резко падает, экстрактивные вещества за период 5 часов увеличились в количественном отношении всего на 0,63 %, дубильные вещества на 1,97 %, это свидетельствует о том, что система приближается к равновесию, и начинается стадия внутридиффузионного извлечения (более медленный процесс). Дальнейшее увеличение времени приводит к незначительному приросту целевых компонентов. Увеличение времени в 3 раза с 25 до 75 часов дает увлечение количества экстрактивных веществ на 15 %, а дубильных — на 30 % относительно значений, достигнутых к 25 часам. Использование точки 75 часов в качестве «максимума» корректно для оценки относительной эффективности, однако с практической точки зрения это чрезмерно длительный цикл. Вывод о достижении 90–95 % от максимума за 24 часа является статистически обоснованным и ключевым для технологического нормирования.

Увеличение времени в 3 раза приведет к пропорциональному росту энергопотребления (поддержание температуры, работы насосов) и снижению оборачиваемости оборудования (производительность цеха упадет в 3 раза). Незначительный прирост выхода биологически активных веществ (экстрактивных веществ –1,44 % и дубильных веществ – 3,6 %) не компенсирует трехкратный рост себестоимости продукта. Выбор 24 часов является компромиссом между полнотой извлечения и экономической эффективностью.

На основании проведенного исследования предлагается следующая система производственных показателей для аналитического контроля процесса экстракции отходов переработки кедровых шишек (табл. 2). Предложенная система является логическим завершением исследования и обладает признаками комплексной системы качества по типу НАССР.

Разработанная система нормативов базируется на принципах комплексного управления качеством и охватывает все стадии жизненного цикла продукта.

На стадии входного контроля критическими точками признаны влажность сырья ($\leq 10,0$ %) и его гранулометрический состав (содержание частиц менее 1 мм – не менее 80 %). Лимитирование влажности продиктовано необходимостью предотвращения агломерации частиц и сохранения эффективной поверхности массообмена. Нормирование степени измельчения напрямую коррелирует с площадью контакта фаз в экстракционной системе.

Регламентация технологического процесса включает фиксацию трех параметров, доказавших свою значимость на этапе планирования эксперимента: состав экстрагента (этанол 40 %), соотношение фаз (1:10) и продолжительность контакта (24 ч). Именно временной фактор, согласно кинетическим исследованиям, обеспечивает приближение системы к равновесному состоянию при сохранении экономической эффективности цикла.

Нормирование качества готового продукта осуществляется по двум маркерным показателям: содержание экстрактивных веществ и содержание дубильных соединений имеет высокую фармакологическую значимость данных групп вторичных метаболитов и их превалирования в целевом экстракте.

Периодичность контроля показателей готового продукта установлена «каждая партия», что позволяет обеспечить стабильность качества выпускаемой продукции и своевременно выявлять возможные отклонения в технологическом процессе.

Таблица 2
Нормируемые производственные показатели

Показатель	Нормируемое значение	Метод контроля	Периодичность контроля
Входной контроль сырья			
Влажность сырья, %	Не более 10,0	Гравиметрический (сушка до постоянной массы)	Каждая партия
Степень измельчения (фракция < 1 мм), %	Не менее 80	Ситовой анализ	Каждая партия
Параметры процесса			
Концентрация этанола, %	40,0±0,5	Ареометрия / рефрактометрия	Каждый цикл
Гидромодуль (сырье: экстрагент)	1:10	Объемный / весовой	Каждый цикл
Время настаивания, ч	24,0±0,5	Хронометраж	Каждый цикл
Показатели готового продукта			
Содержание экстрактивных веществ, %	Не менее 9,0	Гравиметрический	Каждая партия
Содержание дубильных веществ, %	Не менее 10,0	Титриметрический	Каждая партия

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования экспериментально обоснована целесообразность использования вторичного сырья переработки кедровых шишек *Pinus sibirica* (остовы и чешуйки) в качестве источника биологически активных веществ.

Установлены кинетические закономерности процесса экстракции: интенсивная фаза извлечения приходится на первые 20 часов контакта фаз; увеличение продолжительности процесса с 25 до 75 часов признано экономически нецелесообразным вследствие незначительного прироста целевых компонентов (1,44 % для экстрактивных веществ и 3,6 % для дубильных веществ) при трехкратном росте энергозатрат.

Научно обоснован и рекомендован в качестве нормируемого технологического параметра временной интервал 24 часа, обеспечивающий достижение 90–95 % выхода экстрактивных веществ от максимально достижимого при сохранении экономической эффективности процесса.

Разработана система производственных показателей аналитического контроля, включающая три уровня: входной контроль, контроль параметров процесса и контроль готового продукта. Предложенные показатели могут быть использованы при разработке нормативной документации (технических условий, технологического регламента) на производство экстрактов из вторичного сырья шишек сосны кедровой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бычков А. Л., Ломовский О. И. Современные достижения в механоферментативной переработке растительного сырья // *Химия растительного сырья*. 2017. № 2. С. 35–47. DOI 10.14258/jcprm.2017021546
2. Исследование химического состава шишек и семян хвойных пород Сибири / В. А. Иванов, Е. В. Лис, Е. В. Фибих, Ю. С. Шимова // *Хвойные бореальной зоны*. 2023. Т. 41, № 1. С. 95–100. DOI 10.53374/1993-0135-2023-1-95-100
3. Ушанова В. М., Баранова Н. В. Использование отходов шишек хвойных после извлечения семян // *Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева* : в 2 ч. Красноярск, 10–13 ноября 2020 года. Ч. 2 / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. С. 127–128.
4. Чупров М. Д., Чупрова Н. А. Исследование химического состава шишек и семян хвойных пород города Архангельска // *Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2025*, Архангельск, 01–30 апреля 2025 года. Архангельск, 2025. С. 649–650.
5. Элементный состав экстрактов ели обыкновенной шишек / Д. О. Семакин, Д. К. Гуляев, В. Д. Белогова [и др.] // *Фармацевтическое дело и технология лекарств*. 2023. № 2. С. 16–20. DOI 10.33920/med-13-2302-02
6. Изучение элементного состава водных экстрактов хвойных растений Сибири / О. В. Иванова, Ю. Г. Любимова, В. А. Терещенко, Е. А. Иванов // *Химия растительного сырья*. 2021. № 3. С. 181–190. DOI 10.14258/JCPRM.2021038714

7. Бекузарова С. А., Мерзлая Г. Е. Рециклинг шишек хвойных пород // *Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности : сб. статей по материалам Междунар. науч. экологич. конф., Краснодар, 27–29 марта 2018 года*. Краснодар : Кубан. гос. аграр. ун-т им. И. Т. Трубилина, 2018. С. 142–144.

8. Губенко А. П., Стариков А. В. Анализ методики и средств учёта сырья и готовой продукции на маслоэкстракционном заводе // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 5-4(16-4). С. 62–68. DOI 10.12737/16207
9. Кинетическая модель извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья / Н. А. Макаревич, Н. И. Богданович, С. И. Третьяков [и др.] // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2014. № 2. С. 98–107.
10. Мясников В. Ю., Иванов Е. В., Саканян Е. И. Определение кинетических характеристик процесса экстрагирования растительного сырья при реперколяции // *Химико-фармацевтический журнал*. 2010. Т. 44, № 4. С. 38–41.
11. Балакина М. В. Побочные продукты производства: возобновляемые ингредиенты для косметики и бытовой химии // *Сырье и упаковка: Для парфюмерии, косметики и бытовой химии*. 2022. № 6(252). С. 7–11.
12. Кузьменко Д. Е. Влияние условий экстракции на эффективность извлечения сухих веществ и полифенолов из продуктов переработки кедровой шишки // *Современные проблемы техники и технологии пищевых производств : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 26–27 октября 2022 года / под ред. Е. П. Каменской, В. П. Вистовской, Е. С. Дикаловой*. Барнаул : Алтайск. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова, 2022. С. 118–122.

13. Шеффер Э. П. Современные подходы к изучению химического состава семян сосны кедровой сибирской и разработка методов стандартизации лекарственных препаратов на их основе : автореф. дис. ... канд. фармацевт. наук. М., 2000. 25 с.

14. Об экстракции липидных компонентов из семян сосны сибирской / О. И. Лебедева, Л. П. Рубчевская, В. М. Ушанова, С. М. Репях // *Химия растительного сырья*. 1998. № 2. С. 25–29.

REFERENCES

1. Bychkov A. L., Lomovskij O. I. Sovremennyye dostizheniya v mekhanofermentativnoj pererabotke rastitel'nogo syr'ya // *Himiya rastitel'nogo syr'ya*. 2017. № 2. S. 35–47. DOI 10.14258/jcprm.2017021546
2. Issledovanie himicheskogo sostava shishek i semyan hvoynyh porod Sibiri / V. A. Ivanov, E. V. Lis, E. V. Fibih, Yu. S. Shimova // *Hvojnye boreal'noj zony*. 2023. T. 41, № 1. S. 95–100. DOI 10.53374/1993-0135-2023-1-95-100
3. Ushanova V. M., Baranova N. V. Ispol'zovanie othodov shishek hvoynyh posle izvlecheniya semyan // *Reshetnevskie chteniya : materialy XXIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchen-*

noj pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva : v 2 chastyah, Krasnoyarsk, 10–13 noyabrya 2020 goda. Chast' 2 / Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva». Krasnoyarsk, 2020. S. 127–128.

4. Chuprov M. D., Chuprova N. A. Issledovanie himicheskogo sostava shishek i semyan hvojnyh porod goroda Arhangel'ska // Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodyh uchenykh – 2025, Arhangel'sk, 01–30 aprelya 2025 goda. Arhangel'sk, 2025. S. 649–650.

5. Elementnyj sostav ekstraktov eli obyknovennoj shishek / D. O. Semakin, D. K. Gulyaev, V. D. Belonogova [i dr.] // Farmaceuticheskoe delo i tekhnologiya lekarstv. 2023. № 2. S. 16–20. DOI 10.33920/med-13-2302-02

6. Izuchenie elementnogo sostava vodnyh ekstraktov hvojnyh rastenij Sibiri / O. V. Ivanova, Yu. G. Lyubimova, V. A. Tereshchenko, E. A. Ivanov // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2021. № 3. S. 181–190. DOI 10.14258/JCPRM.2021038714

7. Bekuzarova S. A., Merzlaya G. E. Recikling shishek hvojnyh porod // Ekologicheskije problemy razvitiya agrolandshaftov i sposoby povysheniya ih produktivnosti : sbornik statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchnoj ekologicheskoy konferencii, Krasnodar, 27–29 marta 2018 goda. Krasnodar : Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni I. T. Trubilina, 2018. S. 142–144.

8. Gubenko A. P., Starikov A. V. Analiz metodiki i sredstv uchyota syr'ya i gotovoj produkcii na masloekstrakcionnom zavode // Aktual'nye napravleniya

nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3, № 5-4(16-4). S. 62–68. DOI 10.12737/16207

9. Kineticheskaya model' izvlecheniya ekstraktivnyh veshchestv iz rastitel'nogo syr'ya / N. A. Makarevich, N. I. Bogdanovich, S. I. Tret'yakov [i dr.] // Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya himicheskikh nauk. 2014. № 2. S. 98–107.

10. Myasnikov V. Yu., Ivanov E. V., Sakanyan E. I. Opredelenie kineticheskikh harakteristik processa ekstragirovaniya rastitel'nogo syr'ya pri reperkolyacii // Himikofarmaceuticheskij zhurnal. 2010. T. 44, № 4. S. 38–41.

11. Balakina M. V. Pobochnye produkty proizvodstva: vozobnovlyaemye ingredienty dlya kosmetiki i bytovoj himii // Syr'e i upakovka: Dlya parfyumerii, kosmetiki i bytovoj himii. 2022. № 6(252). S. 7–11.

12. Kuz'menko D. E. Vliyanie uslovij ekstrakcii na effektivnost' izvlecheniya suhih veshchestv i polifenolov iz produktov pererabotki kedrovoj shishki // Sovremennye problemy tekhniki i tekhnologii pishchevyh proizvodstv: Materialy XVIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Barnaul, 26–27 oktyabrya 2022 goda / pod redakciej E. P. Kamenskoj, V. P. Vistovskoj, E. S. Dikalovoj. Barnaul : Altajskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. I. I. Polzunova, 2022. S. 118–122.

13. Sheffer E. P. Sovremennye podhody k izucheniyu himicheskogo sostava semyan sosny kedrovoj sibirskoj i razrabotka metodov standartizacii lekarstvennyh preparatov na ih osnove : avtoref. dis. ... kand. farmac. nauk. M., 2000. 25 s.

14. Ob ekstrakcii lipidnyh komponentov iz semyan sosny sibirskoj / O. I. Lebedeva, L. P. Rubchevskaya, V. M. Ushanova, S. M. Repyah // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 1998. № 2. S. 25–29.

© Кох Ж. А., 2026

Поступила в редакцию 10.12.2025
Принята к печати 27.04.2026

АВТОРСКАЯ ССЫЛКА

Авдеева Е. В. Изменчивость ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на объектах озеленения города Красноярска, с. 89–94

Братилова Н. П., см. Мантулина А. В.

Вайс А. А., см. Вараксин Г. С.

Валетчик М. Е., см. Вараксин Г. С.

Вараксин Г. С. Опыт выращивания кедра сибирского в подтаежной зоне Сибири, с. 71–75

Демина Н. А. Оценка признака трёххвойности сосны обыкновенной в качестве раннего диагностического критерия скорости роста деревьев, с. 60–64

Коновалова Д. А., см. Мантулина А. В.

Копылова Г. А. Молекулярно-генетическая диагностика посадочного материала, выращиваемого в лесных питомниках Архангельской области, с. 65–70

Кох Ж. А. Разработка производственных показателей для аналитического контроля процесса экстракции вторичного сырья переработки кедровых шишек, с. 105–110

Кочанкина А. Б., см. Авдеева Е. В.

Криворотова А. И. Исследование свойств плитного материала различной плотности из коры лиственных пород древесины, с. 95–104

Литвин Р. Р., см. Криворотова А. И.

Мантулина А. В. Особенности роста и формирования фитомассы сеянцев сосны кедровой сибирской

с закрытой корневой системой зимнего срока посева, с. 7–12

Мельник П. Г. Динамика роста смешанных хвойных культур К. Ф. Тюрмера, с. 82–88

Мерзленко М. Д., см. Мельник П. Г.

Насыпайко Н. Ю., см. Мельник П. Г.

Ровных Н. Л., см. Авдеева Е. В.

Сомов Е. В. Разрешающий потенциал цифровых беспилотных аэрофотосъёмочных систем на российских VTOL-платформах для дешифровочной таксации, с. 13–21

Тарасов П. А. Сравнительные исследования лесной подстилки коренного елового и производного осинового насаждений, с. 52–59

Тарасова А. В., см. Тарасов П. А.

Татарников Д. В. Особенности формирования второго поколения ели в старовозрастных березняках, с. 76–81

Усольцев В. А. Обнаружение лесных пожаров с использованием технологий глубокого обучения (обзор зарубежной литературы), с. 22–51

Файзулин Д. Х., см. Демина Н. А.

Часовских В. П., см. Усольцев В. А.

Шевелев С. Л., см. Сомов Е. В.

Эскин В. Д., см. Криворотова А. И.

Эскина В. Р., см. Криворотова А. И.

AUTHOR'S LINK

Avdeeva E. V. Variability of the assimilation apparatus of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at landscaping sites in Krasnoyarsk, p. 89–94

Bratilova N. P., see Mantulina A. V.

Chasovskikh V. P., see Usoltsev V. A.

Demina N. A. Evaluation of the three-needle trait of scots pine as an early diagnostic criterion of tree growth rate, p. 60–64

Eskin V. D., see Krivorotova A. I.

Eskina V. R., see Krivorotova A. I.

Fayzulin D. Kh., see Demina N. A.

Kochankina A. B., see Avdeeva E. V.

Kokh Zh. A. Development of production indicators for analytical quality control of the extraction process of secondary raw materials from siberian pine cones processing, p. 105–110

Konovalova D. A., see Mantulina A. V.

Kopylova G. A. Molecular genetic diagnostics of planting material grown in forest nurseries of the Arkhangelsk region, p. 65–70

Krivorotova A. I. Investigation of the properties of hardwood bark board material with various densities, p. 95–104

Litvin R. R., see Krivorotova A. I.

Mantulina A. V. Features of growth and formation of phytomass of seedlings of siberian cedar pine with a closed root system of the winter sowing period, p. 7–12

Melnik P. G. Dynamics of growth of mixed coniferous crops by K. F. Tyurmer, p. 82–88

Merzlenko M. D., see Melnik P. G.

Nasypayko N. Yu., see Melnik P. G.

Rovnych N. L., see Avdeeva E. V.

Shevel'yov S. L., see Somov E. V.

Somov E. V. The resolution potential of digital unmanned aerial photography systems on russian VTOL platforms for decryption taxation, p. 13–21

Tarasov P. A. Comparative studies of the forest litter of native spruce and derived aspen plantings, p. 52–59

Tarasova A. V., see Tarasov P. A.

Tatarnikov D. V. Features of the second generation of spruce in old-aged birch forests, p. 76–81

Usoltsev V. A. Forest fire detection using deep learning technologies (review of foreign literature), p. 22–51

Vais A. A., see Varaksin G. S.

Valetchik M. Ye., see Varaksin G. S.

Varaksin G. S. Experience of cultivating siberian cedar pine in the subtaiga zone of Siberia, p. 71–75

