

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
№ 3

Красноярск
2026

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLIV, № 3

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)
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 Зуфар Ягфарович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Нимц Петер, профессор (Институт строительных материалов и физики древесины (IfB) Высшей швейцарской технической школы (ETH), Цюрих, Швейцария)
Огурцов Виктор Владимирович, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Онучин Александр Александрович, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Пен Роберт Зусьевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Плотников Сергей Михайлович, д.т.н., профессор (ИрГУПС, Красноярск)
Прохоров Валерий Николаевич, д.б.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси (Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, Минск, Беларусь)
Рязанова Татьяна Васильевна, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Сафин Руслан Рушанович, д.т.н., профессор (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань)
Селиховкин Андрей Витимович, д.б.н., профессор (СПбЛТА им. Кирова, Санкт-Петербург)
Стороженко Владимир Григорьевич, д.б.н. (Институт лесоведения РАН, Москва)
Субоч Георгий Анатольевич, д.х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Суховольский Владислав Григорьевич, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
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. 3

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)
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)
Storochenko Vladimir G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Institute of Forest Sciences, Moscow)
Suboch Georgii A., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Soukhovolsky Vladislav G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Varaksin Gennady S., Dr. Sc. in Agricultural (Professor Institute of Forest, Krasnoyarsk)
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 15.07.2026. Дата выхода в свет 18.09.2026. Формат 70×108/8.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 16,97. Уч.-изд. л. 22,3. Тираж 700 экз.
Заказ 3702. С 1323/26. 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

Рябов Н. С., Исаева Л. Г. Структура и состояние еловых фитоценозов в зоне влияния медно-никелевого производства	7
Барышникова О. Н., Маленко А. А., Почёмин Н. М., Чичкарев А. С. Реконструкция ареала сосновых лесов и перспективы их восстановления в Порозихинской ложбине стока	16
Сафина А. В., Байгильдеева Е. И. Обзор современных методов извлечения биологически активных веществ из древесной биомассы хвойных пород с учетом морфологической неоднородности сырья	24
Усольцев В. А., Плюха Н. И. Оценка архитектоники и биомассы корней деревьев с помощью георадара (обзор зарубежной литературы)	34
Помыткин Н. С., Пак М. Э., Шемберг А. М., Третьякова И. Н. Инициация соматического эмбриогенеза лиственницы Чеканоского	71
Сентемов А. А., Тюкавина О. Н. Оценка воздействия режима эксплуатации кустовых площадок на санитарное состояние насаждений в зоне лесотундры	75
Карпухов Д. Д., Савченкова В. А. Оценка организационной структуры лесного хозяйства России	83
Гаврилова О. И., Грязькин А. В., Кази И. А. Сравнительный состав живого напочвенного покрова под пологом сосняков и на гари	93
Танцырев Н. В. Проблемы естественного лесовозобновления на вырубках в травяных типах леса Горного Урала	99
Камашев А. А., Савченкова В. А., Хорькова М. И. Естественное лесовосстановление на нарушенных лесных участках в различных типах леса и типах лесорастительных условий подзоны Северной тайги	107
Сурин Д. А., Залывская О. С. Зависимость энергии прорастания семян <i>Pinus sylvestris</i> L. от температуры водяного ложа в условиях стандартизированного лабораторного проращивания	120

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Алашкевич Ю. Д., Решетова Н. С. Гидродинамика потока волокнистой суспензии в ячейках статора и ротора дисковой мельницы при размоле хвойной целлюлозы	128
---	-----

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Артёмов А. В., Бурындин В. Г., Ершова А. С., Шкуро А. Е., Юрьев Ю. Л., Пазникова С. Н. Квантово-химическое исследование механизмов образования лигноцеллюлозных пластиков без связующих	135
---	-----

Авторская ссылка	145
------------------------	-----

Contents

BIOLOGY AND ECOLOGY, FORESTRY

Ryabov N. S., Isaeva L. G. The structure and condition of spruce phytocenoses in the zone of influence of copper-nickel production	7
Baryshnikova O. N., Malenko A. A., Pochyomin N. M., Chichkarev A. S. Reconstruction of the areas of pine forests and prospects for their restoration in the Porozikhinskaya runoff downstream	16
Safina A. V., Baigildeeva E. I. Review of modern methods for extracting biologically active substances from coniferous wood biomass, taking into account the morphological heterogeneity of the raw material	24
Usoltsev V. A., Plyukha N. I. Estimating the architecture and biomass of tree roots using ground-penetrating radar (review of foreign literature)	34
Pomytkin N. S., Park M. E., Shemberg A. M., Tretyakova I. N. Initiation of somatic embryogenesis in czekanowski's larch	71
Sentemov A. A., Tyukavina O. N. Assessment of the impact of well pad operational mode on the sanitary condition of forest-tundra stands	75
Karpukhov D. D., Savchenkova V. A. Assessment of the organizational structure of forestry in Russia	83
Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Kazi I. A. Comparative composition of the living subsoil cover under the canopy of pine forests and on the fire-raised land	93
Tantsyrev N. V. Problems of natural reforestation in clearings in grass forest types of the Ural mountain	99
Kamashev A. A., Savchenkova V. A., Khorkova M. I. Natural reforestation in disturbed forest areas in various types of forest and types of forest-growing conditions of the Northern taiga subzone	107
Surin D. A., Zalyvskaya O. S. Dependence of germination energy of <i>Pinus sylvestris</i> L. seeds on water bath temperature under standardized laboratory germination conditions	120

TECHNOLOGY OF HARVESTING AND MECHANICAL PROCESSING OF WOOD

Alashkevich Yu. D., Reshetova N. S. Hydrodynamics of fiber suspension flow in stator and rotor cells of a disc refiner during softwood pulp refining	128
---	-----

CHEMICAL PROCESSING TECHNOLOGY

Artyomov A. V., Buryndin V. G., Yershova A. S., Shkuro A. E., Yuryev Yu. L., Paznikova S. N. Quantum-chemical study of the mechanisms of lignocellulose plastics formation without resins	135
--	-----

Author's link	146
----------------------------	-----

СТРУКТУРА И СОСТОЯНИЕ ЕЛОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА *

Н. С. Рябов, Л. Г. Исаева

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН
Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 14а
E-mail: n.ryabov@ksc.ru

Аннотация. В работе представлены анализ структуры и состояния еловых лесов на территории Мурманской области. Объектами исследований явились ельники кустарничково-зеленомошные на разных стадиях техногенной дигрессии в бореальных лесах, подверженных воздушному промышленному загрязнению медно-никелевого производства. Установлено, что структура древостоев еловых лесов и его состояние на разных стадиях техногенной дигрессии по мере приближения к источнику загрязнения претерпевают существенные изменения. В техногенном редколесье значительно меньше живых деревьев относительно фоновых условий и дефолирующих ельников. Выявлен существенный вклад березы в состав и запасы древесины в ельниках на всех стадиях техногенной дигрессии. По мере приближения к источнику аэротехногенного загрязнения увеличивается доля сильно ослабленных и усыхающих деревьев, состояние насаждений изменяется с ослабленного (фон) до сильно ослабленного (техногенное редколесье). Наблюдаются при приближении к источнику загрязнения уменьшение доли елового подроста и увеличение доли березы в составе подроста; снижение густоты и представленности подлеска; общего проективного покрытия напочвенного покрова (особенно мохово-лишайникового яруса), смена видов-доминантов и сокращение разнообразия.

Ключевые слова: еловые фитоценозы, структура древостоя, состояние, загрязнение, Мурманская область, Арктика.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 7–15

THE STRUCTURE AND CONDITION OF SPRUCE PHYTOCENOSSES IN THE ZONE OF INFLUENCE OF COPPER-NICKEL PRODUCTION **

N. S. Ryabov, L. G. Isaeva

Institute of North industrial ecology problems of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences
14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation
E-mail: n.ryabov@ksc.ru

Abstract. The paper considers the analysis of the structure of phytocenoses and evaluates their condition in the Murmansk region. The objects of research were spruce forests in the background conditions and at different stages of pollution-induced digression in boreal forests as a result of industrial air pollution. The structure of stands of spruce forests and its condition at different stages of anthropogenic digression experience significant changes in all levels of phytocenosis as they approach the source of pollution. The process of drying trees in defoliating spruce forests continues, on the technogenic sparse spruce forest it has practically stopped as a result of the drying of spruce and the change of the main tree species to birch. There are significantly fewer living trees in the technogenic sparse forest to the background and defoliating spruce forests. In background and defoliating spruce forests, trees without signs of

* **Финансирование:** публикация подготовлена в рамках Государственного задания ИППЭС КНЦ РАН «Структурно-функциональная организация и динамика наземных экосистем Евро-Арктического региона» № 125021402277-1.

Благодарности: Авторы благодарят Т. А. Сухареву за организацию и руководство полевыми работами, сотрудников лаборатории за помощь в полевых работах.

** **Funding:** the publication was prepared as part of the State Assignment of the INEP KSC RAS.

Acknowledgements: The authors thanks T. A. Sukhareva for organizing and directing field work, and the laboratory staff for their help in field work.

damage and weakened predominate, on the technogenic sparse spruce forest – weakened and strongly weakened. The condition of the phytocenoses varies from weakened (background) to severely weakened (technogenic sparse spruce forest). A significant contribution of birch to the composition and stock of wood in spruce forests at all stages of anthropogenic digression has been revealed. A decrease in the proportion of spruce undergrowth and an increase in the proportion of birch in the undergrowth were noted as they approached the source of aerotechnogenic pollution. The density and representation of the undergrowth, the overall projective coverage of the ground cover (especially the moss-lichen layer) decrease, dominants change and diversity decreases.

Keywords: spruce phytocenoses, tree stand structure, condition, pollution, Murmansk region, Arctic.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным развитием отраслей промышленности, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, обостряется проблема сохранения лесов. Особенно актуальна эта проблема для регионов Крайнего Севера, где в силу своих биологических особенностей, климатических и эдафических условий произрастания леса отличаются повышенной уязвимостью к антропогенному воздействию.

В Мурманской области важным фактором, определяющим состояние лесов, является аэротехногенное загрязнение. Изменения лесного покрова в результате действия этого загрязнения приобрели массовый характер. Наиболее масштабные повреждения в регионе наблюдаются в зонах расположения медно-никелевых комбинатов. Промышленные выбросы, представленные главным образом SO_2 с примесью тяжелых металлов (Ni, Cu, Co и др.), распространяясь на значительные расстояния, являются причиной нарушений и повреждений лесов, произрастающих на этой территории. Воздушное промышленное загрязнение приводит к смене видов доминантов, выпадению из состава сообщества чувствительных видов, изменениям в структуре древостоя, ухудшению его состояния [5; 7; 8; 9; 23; 24].

Площадь земель, на которой расположены леса в Мурманской области, составляет 10029,2 тыс. га,

из них на землях лесного фонда – 9455,1 тыс. га. Покрытые лесной растительностью земли занимают 5144,4 тыс. га [1], из них на ельники приходится 1505,7 тыс. га или 30 % всей лесопокрываемой площади региона [4]. Господствующим типом еловых лесов Мурманской области являются ельники кустарничково-зеленомошные [2; 3; 5].

Целью исследования является анализ структуры и оценка состояния фитоценозов, расположенных на различном удалении от медно-никелевого производства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение структуры и состояния еловых сообществ, расположенных на разном удалении от источника загрязнения медно-никелевого производства (АО «Кольская ГМК», комбинат «Североникель») выполнено на 5 пробных площадках (ПП) сети мониторинга бореальных лесов (рис. 1). Объектами исследования являлись ельники кустарничково-зеленомошные на разной стадии техногенной дигрессии: фоновые (в 170 км на Ю33 от источника загрязнения), дефолирующие леса (от 28 до 62 км на Ю3,) и еловые техногенные редколесья (в 7 км на Ю) [11; 12]. Исследования выполнены в вегетационный период 2024–2025 гг.

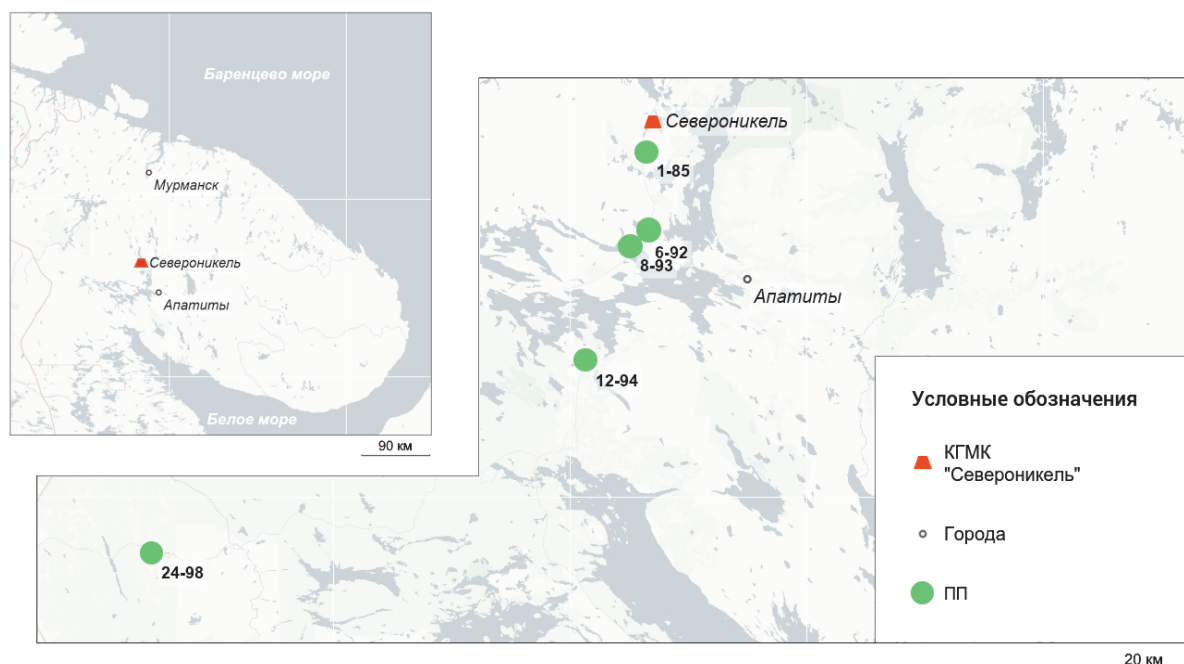


Рис. 1. Карта-схема расположения на территории Мурманской области пробных площадей по градиенту загрязнения комбинатом «Североникель» (промплощадка Кольской ГМК)

На каждой ПП (0,25 га) выполнен сплошной пере-
чет деревьев по породам с измерением диаметра на
высоте 1,3 м в двукратной повторности во взаимно
перпендикулярных плоскостях, с диаметром ствола
6 см и более. Запас древесины рассчитывали по лесо-
таксационному справочнику [6]. Возраст деревьев
определяли с помощью подсчета колец кернов, ото-
бранных возрастным буравом на высоте 20–30 см от
шейки корня. Учет подроста и подлеска осуществлен
на круговых площадках (5–12 площадок на ПП) ра-
диусом 1,78 м, отмечали основные виды и измеряли
высоту [12]. Для характеристики растительности на-
почвенного покрова по ярусам в 2009 г. закладывали
4 площадки по 100 м², где определяли покрытие яруса
в %, выявляли набор константных видов (на основе
встречаемости по учетным площадкам), набор доми-

нантов травяно-кустарничкового яруса и мохово-
лишайникового покрова. Для более точного опреде-
ления категорий состояния деревьев и индекса со-
стояния использовали методы, описанные в Правилах
санитарной безопасности в лесах [16] и Методических
рекомендациях по оценке существующего и прогно-
зируемого состояния лесных насаждений в зоне влия-
ния промышленных предприятий Мурманской обла-
сти [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика древостоев и подроста на пробных
площадках в природных и нарушенных экосистемах
представлена в табл. 1 и 2. Распределение деревьев по
категориям состояния и индекс состояния по насаж-
дению – в табл. 3.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев на разных стадиях техногенной дигрессии еловых лесов

Порода	Характеристики живых деревьев					Сумма площадей сечений, м²/га	Запас, м³/га	Возраст ели, лет	Состав древостоя (по запасам)
	Диаметр, см*	Высота, м*	Количество деревьев, шт/га						
			живых	сухих	всего				
Фон (ПП 24-98) – Ельник кустарничково-зеленомошный									
Ель	16,6±0,6	11,1±0,3	552	24	576	13,8	85	80–100	6Е2С2Б
Береза	10,4±0,3	9,4±0,2	736	96	832	7,0	38		
Сосна	21,6±1,6	14±0,7	80	12	92	3,2	23		
Всего			1368	132	1500	24,0	146		
Дефолирующий лес (ПП 12-94) – Ельник кустарничково-зеленомошный									
Ель	25,4±1,5	13,8±0,6	132	0	132	7,5	48	75–240	4Е4Б2С
Береза	11,3±0,3	9,2±0,2	612	56	668	7,2	41		
Сосна	14,7±1,0	10,0±0,5	156	0	156	3,1	22		
Ива	7,0±0,5	6,2±1,0	20	0	20	0,1	но		
Всего			920	56	956	17,8	111		
Дефолирующий лес (ПП 8-93) – Ельник кустарничково-зеленомошный									
Ель	14,6±0,7	9,3±0,5	236	0	236	4,6	25	85–310	5Е3С2Б+Ос
Береза	9,5±0,3	6,9±0,2	268	20	288	2,2	8		
Сосна	25,5±5,9	13,1±1,5	24	4	28	2,0	15		
Осина	8,5±0,4	8,5±0,2	104	0	104	0,6	2		
Всего			632	24	656	9,4	50		
Дефолирующий лес (ПП 6-92) – Ельник кустарничковый									
Ель	21,1±1,2	9,4±0,5	248	40	288	12,5	78	85–280	9Е1Б
Береза	10,7±1,4	6,7±0,5	188	0	188	1,9	11		
Всего			436	40	476	14,5	89		
Техногенное редколесье (ПП 1-85) – Березово-еловое вороничное редколесье									
Ель	9,9±1,2	6,3±0,6	32	4	36	0,3	1,5	50–140	6Б3Е1С
Береза	8,4±0,5	4,6±0,1	92	0	92	0,5	2,6		
Сосна	15,6	7,1	4	0	4	0,1	0,4		
Всего			128	4	132	0,9	4,5		

Примечание: * – среднее значение ± стандартная ошибка; но – не определяли.

Таблица 2

Характеристика живого подроста на разных стадиях техногенной дигрессии еловых лесов

№ ПП	Количество подроста, шт/га				Средняя высота подроста, м*			
	ель	сосна	береза	осина	ель	сосна	береза	осина
Фон								
24-98	700	100	600	0	0,9±0,2	0,4	2,0±0,5	0
Дефолирующие леса								
12-94	2000	1125	375	0	1,0±0,1	0,6±0,3	2,2±0,2	0
8-93	6800	2200	1000	600	0,5±0,04	0,3±0,1	1,8±0,4	0,6±0,3
6-92	1778	1111	1444	0	0,8±0,2	0,6	1,0±0,2	0
Техногенное редколесье								
1-85	417	250	1417	0	1,8±0,5	0,3±0,1	1,6±0,3	0

Примечание: * – среднее значение ± стандартная ошибка.

Таблица 3

Состояние еловых фитоценозов на разных стадиях техногенной дигрессии

Порода	Количество деревьев на ПП по категориям состоя- ния					Индекс состояния				Состояние деревьев
	1	2	3	4	5	по породам		по насаждению		
						[16]	[15]	[16]	[15]	
Фоновые леса, ПП 24-98										
Ель	53	65	17	3	6	1,96	1,92	2,06	1,97	ослабленные
Береза	83	83	16	4	21	2,18	2,02			ослабленные
Сосна	8	11	1	0	3	2,22	2,09			ослабленные
Дефолирующие леса										
ПП 12-94										
Ель	13	20	0	0	0	1,60	1,61	2,02	1,82	без признаков ослабления
Береза	75	48	27	3	14	2,08	2,00			ослабленные
Сосна	5	31	2	1	0	1,97	1,97			ослабленные
Ива	0	1	4	0	0	2,80	2,80			сильно ослаблен- ные
ПП 8-93										
Ель	20	21	14	3	1	2,07	2,05	1,98	2,04	ослабленные
Береза	21	38	6	1	5	2,10	2,03			ослабленные
Сосна	4	0	2	0	1	2,29	2,14			ослабленные
Осина	18	7	1	0	0	1,35	1,35			без признаков ослабления
ПП 6-92										
Ель	0	21	35	6	9	3,17	3,17	2,38	2,77	сильно ослаблен- ные
Береза	40	6	0	1	0	1,19	1,19			без признаков ослабления
Техногенное редколесье, ПП 1-85										
Ель	0	0	6	2	1	3,56	3,44	3,21	2,85	сильно ослаблен- ные
Береза	1	10	12	0	0	2,48	2,48			сильно ослаблен- ные
Сосна	0	0	1	0	0	3,00	3,00			сильно ослаблен- ные

Фоновые леса. ПП 24-98. По результатам исследований на ПП произрастает ельник кустарничково-зеленомошный. Древостой сложен елью, сосной и березой, одновозрастный, класс возраста V. Проектное покрытие древостоем варьирует от 15 до 75 %. Количество живых деревьев составляет 1368 шт/га, что отражает этап сукцессии ельника, выражающийся в сомкнутом древостое с присутствием просторных редин. Многоствольность деревьев ели на ПП отразилась в значительных запасах древесины (табл. 1). Отмечено, что на долю березы в составе древостоя на

ПП приходится 54 %, тогда как её доля в запасе 25 %. Сухостойных деревьев насчитывается 8 % от общего количества деревьев на пробной площади.

В фоновых условиях преобладают деревья здоровые (от 35 до 40 %) и ослабленные (от 40 до 48 %), по индексу состояния, как древесные породы, так и в целом насаждение относятся к ослабленным (табл. 3).

В подросте отмечены ель, береза, единично сосна, подрост по густоте редкий (табл. 2). Возраст елового подроста от 20 до 40 лет. Подлесок средней густоты, состоит из можжевельника и рябины (табл. 4).

Таблица 4
Характеристики подлеска в ельниках на разной стадии техногенной дигрессии

Стадия дигрессии	ПП	Средняя высота подлеска, м			Всего, шт/га
		Можжевельник	Рябина	Ива	
Ф	24-98	1	1,2	–	2700
ДФ	12-94	1,3	1,3	2	2700
	8-93	–	–	–	–
	6-92	0,8	0,5	–	444
ТР	1-85	0,8	–	–	167

Примечание: Ф – фоновые условия; ДФ – дефолирующие леса; ТР – техногенное редколесье.

Общее покрытие напочвенного покрова растительностью составляет 90–100 %. Травяно-кустарничкового яруса – от 70 до 85 %, доминируют кустарнички *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium myrtillus* и *Empetrum hermaphroditum*, реже *Calluna vulgaris* и *Ledum palustre*. Среди травянистых растений преобладает *Avenella flexuosa*, реже отмечены *Solidago lapponica* и *Luzula pilosa*. Моховой ярус (покрытие 95–100 %) представлен в основном *Pleurozium schreberi* (от 55 до 75 %) и *Hylocomium splendens* (25–45 %), отмечены виды *Polytrichum commune* и *Polytrichum strictum* (до 10 %). Покрытие лишайникового яруса варьирует от 10 до 30 %, доминируют виды рода *Cladonia*: *Cl. rangiferina*, *Cl. stellaris*, *Cl. arbuscula* и *Nephroma arcticum*.

Дефолирующие леса. ПП 12-94. Данная ПП является наиболее удаленной от источника аэротехногенного загрязнения, из всех заложенных в дефолирующих лесах. На пробной площади произрастает ельник кустарничково-зеленомошный, класс возраста VIII. Возраст сосен, отмеченных на ПП не превышает 60 лет. Древостой состоит из ели, березы, сосны и единично ивы древовидной (*Salix caprea*), покрытие учетной площади древостоем варьирует от 15 до 70 %. Количество живых деревьев составляет 920 шт/га, сухостойных деревьев насчитывается 6 % от общего количества деревьев. Около 68 % от всех деревьев приходится на березу, которая составляет значительную долю запаса древостоя – 37 %. Преобладающие категории жизненного состояния у елей – ослабленные (57,6 %) и здоровые (42,4 %), у берез – здоровые (45,5 %), у сосен – ослабленные (79,5 %). По индексу состояния насаждение является ослабленным (табл. 3).

Подрост состоит из ели, березы и сосны (табл. 2). Подрост средней густоты. Возраст елового подроста варьирует от 20 до 60 лет, соснового – от 10 до 30 лет. Имеется погибший подрост ели, который составляет 15 % от общего количества елового подроста. Подлесок средней густоты, состоит из рябины, ивы и единично можжевельника (табл. 4).

Покрытие травяно-кустарничковым ярусом 70–100 %, доминанты среди кустарничков *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Empetrum hermaphroditum*, реже отмечены *V. uliginosum* и *Ledum palustre*, из травянистых растений превалирует *Avenella flexuosa*. Моховой ярус (покрытие от 50 до 95 %) представлен в основном *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*, мхами рода *Dicranum*, реже отмечен *Polytrichum commune*, встречается *Ptilium crista-*

castrensis. Лишайниками покрыто от 3 до 10 % площади, доминируют *Cladonia arbuscula*, *Cl. stellaris*, *Cl. deformis*, *Cl. subulata*, реже отмечены *Cetraria islandica* и *Cladonia rangiferina*.

ПП 8-93. Ельник расположен на территории Лапландского заповедника, по материалам лесоустройства 1989–1990 гг. [18] в насаждении 10 % сосновых деревьев было повреждено промвыбросами комбината «Североникель».

По результатам исследований на ПП произрастает ельник кустарничково-зеленомошный, разновозрастный, X класс возраста, характеризуется выраженной редкостойностью с преобладанием открытых пространств. Древостой состоит из ели и березы, присутствует сосна и единично осина. Количество живых деревьев составляет 632 шт/га, сухостойных деревьев насчитывается 6 % от общего количества деревьев. На долю березы приходится 44 % (или 17 % всего запаса древесины).

Здоровые и ослабленные еловые деревья в сумме составляют почти 70 %. Среди берез преобладают ослабленные (53 %) и здоровые (29 %), среди сосен и осин – здоровые, 57 и 70 % соответственно. По индексу состояния насаждение относится к ослабленному (табл. 3).

Подрост состоит из ели, березы, сосны и осины (табл. 2). Погибшего подроста на учетной площади не зафиксировано. Подрост оценивается как густой. Возраст елового подроста от 10 до 70 лет, соснового – от 10 до 15 лет. Подлесок на учетной площади не выражен.

Общее покрытие пробной площади растительностью составляет 85–100 %. В доминирующей микрогруппировке напочвенного покрова преобладают вороника (*Empetrum hermaphroditum*) и виды рода *Vaccinium*. Видовой состав кустарничкового яруса представлен черникой (*V. myrtillus*), брусникой (*V. vitis-idaea*), вороникой (*Empetrum hermaphroditum*). Встречаются дерен шведский (*Chamaepericlimenum suecicum*), золотарник (*Solidago lapponica*), а также луговик извилистый (*Avenella flexuosa*). Лишайниково-зеленомошная микрогруппировка сформирована лишайниками – *Cladonia rangiferina*, *Cl. mitis* и зелеными мхами, главным образом *Pleurozium schreberi*.

ПП 6-92. ПП расположена в лесном фонде при-тундровых лесов Мончегорского лесничества, Мончегорского участкового лесничества, по данным 2003 г. насаждение повреждено в слабой степени промвыбросами комбината «Североникель» [19].

На ПП произрастает ельник кустарничковый, X класс возраста. Древостой представлен елью и березой, разновозрастный, изреженный, покрытие древостоя варьирует от 10 до 40 %. Количество живых деревьев на ПП – 436 шт/га, из них 39 % это березы, которые запасают до 15 % древесины. Количество погибших деревьев ели составляет 14 % от общего количества деревьев.

Обнаружено, что здоровые ели на ПП отсутствуют, преобладают ослабленные (33,3 %) и сильно ослабленные экземпляры (44,4 %). Многие живые ели усыхают в верхней трети кроны. До 85 % берез при этом являются здоровыми, усохших деревьев нет. В целом насаждение характеризуется как сильно ослабленное (табл. 3).

Подрост редкий, представлен елью, березой и единичной сосной (табл. 2). Погибший подрост составляет 6,3 % от общего количества. Возраст елового подраста от 10 до 70 лет, соснового – 6 лет. Подлесок редкий, состоит из можжевельника и единично рябины (табл. 4).

Общее покрытие напочвенного покрова растительностью составляет 85–100 %. Травяно-кустарничковый ярус – от 60 до 85 %, доминируют кустарнички *Vaccinium myrtillus* и *Empetrum hermaphroditum*, из трав – *Avenella flexuosa*, реже отмечен *Chamaepericlymenum suecicum*. Моховой ярус, покрытие от 20 до 50 %, доминирующие виды *Barbilophozia licopodioides*, *Ceratodon purpureus* и *Orthocaulis floerkei*. Лишайниковый ярус (5–10 %), представлен в основном лишайниками *Cladonia deformis* и *Cetraria islandica*, реже *Cladonia stellaris*, *Cl. arbuscula* и *Cl. subulata*.

Анализ структуры и состояния дефолирующих еловых лесов показал, что в них древостой разновозрастный, изреженный, сложен в основном елью, березой и сосной. Количество живых деревьев варьирует от 436 до 920 шт/га. Сухостойные деревья составляют 6–14 % от общего количества деревьев. Запас древесины варьирует от 50 до 111 м³/га. Подрост представлен елью, березой, сосной и на одной площадке добавляется осина. Возраст елового подраста варьирует от 10 до 70 лет. Доля погибшего подраста может достигать 15 %. В подлеске отмечены можжевельник, рябина и ива (кустарниковой формы).

Техногенное редколесье. ПП 1-85. ПП расположена в лесном фонде притундровых лесов Мончегорского лесничества, Мончегорского участкового лесничества, по материалам лесоустройства 2003 г. насаждение повреждено промышленными выбросами комбината «Североникель», характеризуется полным засыханием и ослаблением роста [19].

На пробной площади произрастает березово-еловое вороничное редколесье. Характеризуется значительной редкостойностью, практически полным отсутствием напочвенного покрова. Древостой представлен березой, елью и сосной (единично), разновозрастный, покрытие древостоя варьирует от 5 до 30 %. Возраст ели варьирует от 50 до 140 лет. В общем запасе древесины преобладает береза (табл. 1). Количество живых деревьев 128 шт/га. Сухостойные ели составляют 3 % от общего количества деревьев, так как

в 2004 г. выполнена рубка сухостойных елей и в результате лесохозяйственных работ образовалось больше количество неразложившегося валежа.

Еловые деревья характеризуются как сильно ослабленные (66,7 %), и усыхающие (22,2 %). Среди берез преобладают ослабленные и сильно ослабленные экземпляры (95 %). По индексу состояния насаждение относится к сильно ослабленному (табл. 3).

Подрост представлен елью, березой и сосной (табл. 2). Погибший подрост ели составляет 167 шт/га (7 % от общего количества подраста). Подрост ели – по густоте – отсутствует, живой подрост по всем породам (2083 шт/га) характеризуется как редкий. Возраст елового подраста от 30 до 80 лет, соснового – 10 лет. Подлесок состоит из можжевельника, оценивается как отсутствующий (табл. 4).

Общее покрытие напочвенного покрова растительностью составляет от 30 до 60 %. Покрытие травяно-кустарничковым ярусом – от 10 до 50 %, доминируют кустарнички *Empetrum hermaphroditum*, реже *Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum palustre*, *Arctostaphylos uva-ursi*, встречаются *Vaccinium myrtillus* и *Vaccinium uliginosum*; из травянистых растений преобладает *Avenella flexuosa*, отмечен *Equisetum sylvaticum*. Моховой ярус, покрытие от 5 до 15 %, доминант *Ceratodon purpureus*, реже *Trapeliopsis granulosa*, присутствуют *Pohlia nutans*, *Gymnocolea inflata*.

Результаты исследований еловых лесов на разных стадиях техногенной дигрессии показали, что структура древостоя еловых лесов и его состояние на разных стадиях техногенной дигрессии по мере приближения к источнику загрязнения претерпевают существенные изменения по всем ярусам.

Основной древостой на всех пробных площадках составляют ель, береза и сосна, реже добавляется осина и единично встречается древовидная ива (*Salix caprea*). Характерной особенностью ельников кустарничково-зеленомошной группы является их редкостойность, очевидно, обусловливаемая корневой конкуренцией между деревьями. Количество живых деревьев на пробных площадях варьирует от 1368 шт/га в фоновых условиях до 128 шт/га в техногенном редколесье. В северотаежных ельниках доля березы в составе древостоя варьирует от 39 до 69 %, вне зависимости от стадии дигрессии: достигая минимума в 28–30 км от источника загрязнения на ПП 8-93 (44 %) и ПП 6-92 (39 %), а максимума (68–69 %) на ПП 12-94 (62 км от источника загрязнения) и ПП 1-84 (7 км). Выявлен также значительный вклад породы в запас древостоя (15–57,8 %), при этом минимальный вклад отмечен на ПП 8-93 и ПП 6-92 (17 и 15 % соответственно), а максимальный в наиболее преобразованном длительным загрязнением елово-березовом техногенном редколесье. Эти данные подтверждают значимость березы, как породы слагающей северотаежные ельники, так как согласно литературным источникам на долю березы в еловых древостоях приходится в среднем от 20 % [15] до 50 % [20].

Общий запас древесины снижается. Запас сухостойных деревьев растет от фоновых условий к дефолирующим лесам и резко снижается в техногенном редколесье. Процесс усыхания деревьев в дефоли-

рующих лесах продолжается, в техногенном редколесье практически прекратился в виду выпадения ели и смены основной древесной породы на березу. Выявлено, что по мере приближения к источнику загрязнения в составе сухостоя уменьшается доля березы и увеличивается доля ели. Наличие сухостоя на ПП 6-92, можно объяснить большей подверженности загрязнению, ввиду расположения насаждения на возвышенности и соответственно иным температурным и питательным режимом почв.

Категории жизненности деревьев, особенно хвойных лесообразующих пород, или категории состояния являются хорошим индикатором экологического состояния лесов [11; 22]. Состояние насаждений изменяется с ослабленного (фон) до сильно ослабленного (техногенное редколесье). Обнаружено, что в техногенном редколесье почти в 11 раз меньше живых деревьев относительно фоновых условий и в 3,4–7 раз меньше, чем в дефолирующих ельниках. При этом доля сильно ослабленных и усыхающих деревьев увеличивается по мере приближения к источнику загрязнения от 14,5 (ель) и 11 % (береза) до 100 (ель) и 52 % (береза). Происходит изреживание древостоя, за счет усыхания древесных пород и сокращения количества древесных пород на единицу площади.

Подрост формирует новое поколение леса под пологом насаждений и важен для лесовозобновительных процессов, что обуславливает важность исследования и характеристики данного компонента лесного биогеоценоза. На всех стадиях дигрессии подрост представлен теми же породами, что и древостой: елью, березой и сосной, иногда добавляется осина. В ненарушенных и дефолирующих лесах преобладает подрост ели. В фоновых условиях, где покрытие мохово-лишайниковым ярусом, затрудняющим прорастание семян, составляет 95–100 %, количество подраста на единицу площади значительно меньше, чем в дефолирующих лесах (общее покрытие мохово-лишайникового яруса 20–50 %). В техногенном редколесье, где покрытие моховым ярусом составляет всего 5–15 % и основной лесообразующей породой является береза, преобладает березовый подрост (68 % всего подраста). Значительная доля березового подраста (42,9 %), отмеченная в фоновом ельнике кустарничково-зеленомошном, может отражать естественную сукцессионную динамику в одновозрастном насаждении.

Техногенное загрязнение является лимитирующим фактором, во многом определяющим процессы возобновления. Отмечено уменьшение доли елового подраста (от 57–68 % до 20 %) по мере приближения к источнику аэротехногенного загрязнения (табл. 2). В первые годы формирования елового подраста, когда хвоя текущего года составляет основное его охвоение, или в начале вегетационного периода сеянцы более подвержены гибели от сернистого газа и кислотных дождей [11; 17], особенно на стадии техногенного редколесья. Кроме этого, естественное лесовозобновление здесь затруднено, так как, несмотря на значительное количество валежа, процессы разложения протекают крайне медленно из-за угнетения микробиоты, что и обуславливает отсутствие важного в еловых биогеоценозах плодородного субстрата для

подроста ели [14]. Так же значимым фактором гибели подраста является привнесение поллютантов и накопление их в почве [10; 21; 25]. Высокая смертность молодого подраста ели отразилась на преобладании на ПП 1-85 особей с наибольшей средней высотой среди всех ПП (табл. 2).

В подлеске зафиксированы в основном можжевельник и рябина, реже добавляются кустарниковые виды ивы. По мере приближения к комбинату на ПП значительно снижается густота и представленность подлеска (от 2700 до 144 шт/га). Единственным видом, который обнаружен на всех стадиях дигрессии является можжевельник обыкновенный, что может охарактеризовать его как вид с широким экологическим спектром и способностью к адаптации в экстремальных условиях.

По мере приближения к источнику аэротехногенного загрязнения прослеживается чёткая тенденция к значительному преобразованию структуры напочвенного покрова. Выявлено, что при значительном снижении общего проективного покрытия напочвенного покрова, наиболее сильные преобразования происходят в мохово-лишайниковом покрове. Покрытие мохового яруса последовательно снижается от фона (95–100 %) к техногенным редколесьям (5–15 %), при этом на ПП 6-92 происходит полная смена доминирующих видов. Травяно-кустарничковый ярус характеризуется значительной устойчивостью, покрытие которого варьирует в сопоставимых пределах в фоновых условиях и дефолирующих лесах (60–100 %), но значительно падает на ПП 1-85 (10–50 %). Таким образом, с приближением к источнику загрязнения еловые сообщества изменяются от ельника кустарничково-зеленомошного к кустарничковому ельнику с деградирующим моховым покровом и к техногенному редколесью с практически отсутствующим мозаичным напочвенным покровом (отсутствием мхов и лишайников).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в северотаежных ельниках Мурманской области, позволяют сделать выводы о существенном преобразовании еловых биогеоценозов в результате длительного аэротехногенного загрязнения предприятия цветной металлургии. Изменения выражаются в коренной перестройке структуры еловых фитоценозов. Происходит упрощение вертикальной и горизонтальной структуры леса: переход от типичных для региона кустарничково-зеленомошных ельников к техногенным редколесьям. Общее проективное покрытие древостоя, напочвенного покрова и густота подлеска сокращаются. Снижается биоразнообразие и сменяются доминирующие виды напочвенного покрова. Естественное возобновление ели вблизи источника загрязнения ограничено нарушением протекания естественных процессов и биогеохимических циклов.

Результаты работы указывают на необходимость регулярных исследований и увеличение количества пробных площадей, для получения более достоверных результатов путём увеличения повторностей, поскольку как в естественных, так и в нарушенных биогеоценозах можно отметить неоднородность условий,

влияющих на динамику структуры и состояния ельников. Это хорошо заметно на примере дефолирующих лесов, различающихся по состоянию, структуре и лесовосстановительному потенциалу.

Проведенные работы и полученные результаты послужат основой для дальнейших исследований, связанных с учётом продолжающегося влияния предприятий цветной-металлургии и в условиях снижения аэротехногенных выбросов. Мониторинг структуры и состояния древостоев на ПП позволит определить ответные реакции еловых лесов на внешние воздействия, прогнозировать динамику состояния еловых насаждений, как в естественных, так и в нарушенных условиях загрязнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Мурманской области в 2024 году. Мурманск, 2025. 111 с.
2. Исаева Л. Г., Костина В. А. Леса на территории заповедника // Труды Лапландского государственного заповедника. Вып. VI. Москва : Перо, 2012. С. 69–111.
3. Леса Кольского полуострова и их возобновление. Москва : Изд-во АН СССР, 1961. 186 с.
4. Лесной план Мурманской области. В 2 т. Мурманск, 2019.
5. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В. А. Алексеева. Ленинград : Наука, 1990. 200 с.
6. Лесотаксационный справочник по северо-западу СССР. Ленинград : ЛТА, 1984. 320 с.
7. Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2-х ч. Ч. 1. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 1996. 213 с.
8. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги. Апатиты : Изд-во Кольского НЦ РАН, 1998. 316 с.
9. Лукина Н. В., Никонов В. В. Состояние еловых биогеоценозов Севера в условиях техногенного загрязнения. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1993. 134 с.
10. Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные sukcesии в северотаежных лесах. Москва : Наука, 2005.
11. Менщиков С. П., Ившин А. П. Закономерности трансформации предтундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Екатеринбург : УрО РАН, 2006. 290 с.
12. Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Москва : ЦЭПЛ РАН, 2023. 32 с.
13. Методические рекомендации по оценке существующего и прогнозируемого состояния лесных насаждений в зоне влияния промышленных предприятий Мурманской области. Государственный комитет СССР по лесу Архангельский институт леса и лесохимии. Архангельск, 1990. 17 с.
14. Коренные старовозрастные леса Мурманской области / В. В. Никонов, И. В. Зайцева, К. Н. Кобыков и др. // Лесоведение. 2002. № 2. С. 15–23.
15. Никонов В. В., Лебедева Р. М. Ель и еловые леса в центральной части Кольского полуострова // Изучение растительных ресурсов Мурманской области. Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1976. С. 53–64.
16. Правила санитарной безопасности в лесах. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 9.12.2020 № 2047. Москва, 2020. 15 с.
17. Прилуцкий А. Н., Воронкова Н. М. Сезонное изменение устойчивости растений к кислым осадкам // Фенологические явления в Приморье. Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 56–61.
18. Проект организации и ведения лесного хозяйства Лапландского государственного природного биосферного заповедника. Таксационное описание Центрального лесничества. Всесоюзное объединение «Леспроект», Северо-западное лесоустроительное предприятие при Госкомитете СССР по лесу. СПб., 1990.
19. Проект организации и ведения лесного хозяйства Мончегорского лесхоза Мурманского управления лесами. Таксационное описание Мончегорского лесничества. ФГУП «Севзаплеспроект». СПб., 2003.
20. Раменская М. Л. Физико-географические особенности и лесные ландшафты // Лесовосстановление в Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск, 1975. С. 4–35.
21. Сухарева Т. А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 6(336). С. 19–28.
22. Цветков В. Ф., Цветков И. В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2012. 312с.
23. Черненко Т. В. Фитоценологические исследования ельников кустарничково-зеленомошных в окрестностях Мончегорского металлургического комбината // Лесоведение. 1995. № 1. С. 57–65.
24. Gavrilova O., Graskin A. Characteristic properties of spruce phytocenoses structure under conditions of intense anthropogenic impact // Resources and Technology. 2024. Vol. 21. Is. 1. Pp. 86–99.
25. Assessment of the Composition of Rain Deposition in Coniferous Forests at the Northern Tree Line Subject to Air Pollution / V. V. Ershov, N. V. Lukina, M. A. Danilova et al. // Russian Journal of Ecology. 2020. Vol. 51, No. 4. P. 319–328.

REFERENCES

1. Doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Murmanskoj oblasti v 2024 godu. Murmansk, 2025. 111 s.
2. Isaeva L. G., Kostina V. A. Lesa na territorii zapovednika // Trudy Laplandskogo gosudarstvennogo zapovednika. Vyp. VI. Moskva : Pero, 2012. S. 69–111.
3. Lesa Kol'skogo poluostrova i ih vozobnovlenie. Moskva : Izd-vo AN SSSR, 1961. 186 s.
4. Lesnoj plan Murmanskoj oblasti. V 2-h tomah. Murmansk, 2019.
5. Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie / pod red. V. A. Alekseeva. Leningrad : Nauka, 1990. 200 s.

6. Lesotaksacionnyj spravocnik po severo-zapadu SSSR. Leningrad : LTA, 1984. 320 s.
7. Lukina N. V., Nikonov V. V. Biogeohimicheskie cikly v lesah Severa v usloviyah aerotekhnogenного zagryazneniya. V 2-h ch. Ch. 1. Apatity : Izd-vo Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 1996. 213 s.
8. Lukina N. V., Nikonov V. V. Pitatel'nyj rezhim lesov severnoj tajgi. Apatity : Izd-vo Kol'skogo NC RAN, 1998. 316 s.
9. Lukina N. V., Nikonov V. V. Sostoyanie elovyh biogeocенозов Severa v usloviyah tekhnogenного zagryazneniya. Apatity : Izd-vo KNC RAN, 1993. 134 s.
10. Lukina, N. V., Suhareva T. A., Isaeva L. G. Tekhnogennye digressii i vosstanovitel'nye sukcesii v severotaezhnyh lesah. Leningrad : Nauka, 2005.
11. Menshchikov S. P., Ivshin A. P. Zakonomernosti transformacii predtundrovyyh i taezhnyh lesov v usloviyah aerotekhnogenного zagryazneniya. Ekaterinburg : UrO RAN, 2006. 290 s.
12. Metodika polevyh rabot po taksacii lesa na postoyannyh probnyh ploshchadyah v ramkah realizacii innovacionного проекта gosudarstvenного znacheniya «Uglerod v ekosistemah: monitoring». Moskva : CEPL RAN, 2023. 32 s.
13. Metodicheskie rekomendacii po ocenke sushchestvuyushchego i prognoziruemого sostoyaniya lesnyh nasazhdenij v zone vliyaniya promyshlennyh predpriyatij Murmanskoy oblasti. Gosudarstvennyj komitet SSSR po lesu Arhangel'skij institut lesa i lesohimii. Arhangel'sk, 1990. 17 s.
14. Korennye starovozrastnye lesa Murmanskoy oblasti / V. V. Nikonov, I. V. Zajceva, K. N. Kobayakov i dr. // Lesovedenie. 2002. № 2. S. 15–23.
15. Nikonov V. V., Lebedeva R. M. El' i elovye lesa v central'noj chasti Kol'skogo poluostrova // Izuchenie rastitel'nyh resursov Murmanskoy oblasti. Apatity : Izd-vo Kol'skogo filiala AN SSSR, 1976. S. 53–64.
16. Pravila sanitarnoj bezopasnosti v lesah. Utverzhdeny postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 9.12.2020 № 2047. Moskva, 2020. 15 s.
17. Priluckij A. N., Voronkova N. M. Sezonnoe izmenenie ustojchivosti rastenij k kislym osadkam // Fenologicheskie yavleniya v Primor'e. Vladivostok : DVNC AN SSSR, 1984. S. 56–61.
18. Proekt organizacii i vedeniya lesnogo hozyajstva Laplandskogo gosudarstvenного prirodnого biosfernого zapovednika. Taksacionnoe opisanie Central'nogo lesnichestva. Vsesoyuznoe ob"edinenie «Lesproekt», Severo-zapadnoe lesoustroitel'noe predpriyatie pri Goskomitete SSSR po lesu. SPb., 1990.
19. Proekt organizacii i vedeniya lesnogo hozyajstva Monchegorskogo leskhoza Murmanskogo upravleniya lesami. Taksacionnoe opisanie Monchegorskogo lesnichestva. FGUP «Sevzaplesproekt». SPb., 2003.
20. Ramenskaya M. L. Fiziko-geograficheskie osobennosti i lesnye landshafty // Lesovosstanovlenie v Karel'skoj ASSR i Murmanskoy oblasti. Petrozavodsk, 1975. S. 4–35.
21. Suhareva T. A. Prostranstvenno-vremennaya dinamika mikroelementnogo sostava hvojnyh derev'ev i pochvy v usloviyah promyshlennого zagryazneniya // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2013. № 6(336). S. 19–28.
22. Cvetkov V. F., Cvetkov I. V. Promyshlennoe zagryaznenie okruzhayushchej sredy i les. Arhangel'sk : IPC SAFU, 2012. 312 s.
23. Chernen'kova T. V. Fitocenoticheskie issledovaniya el'nikov kustarnichkovo-zelenomoshnyh v okrestnostyah Monchegorskogo metallurgicheskogo kombinata // Lesovedenie. 1995. № 1. S. 57–65.
24. Gavrilova O., Graskin A. Characteristic properties of spruce phytocenoses structure under conditions of intense anthropogenic impact // Resources and Technology. 2024. Vol. 21, Is.1. Pp. 86–99.
25. Assessment of the Composition of Rain Deposition in Coniferous Forests at the Northern Tree Line Subject to Air Pollution / V. V. Ershov, N. V. Lukina, M. A. Danilova i dr. // Russian Journal of Ecology. 2020. Vol. 51, No. 4. P. 319–328.

© Рябов Н. С., Исаева Л. Г., 2026

Поступила в редакцию 27.01.2026
Принята к печати 26.06.2026

РЕКОНСТРУКЦИЯ АРЕАЛА СОСНОВЫХ ЛЕСОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В ПОРОЗИХИНСКОЙ ЛОЖБИНЕ СТОКА

О. Н. Барышникова¹, А. А. Маленко², Н. М. Почёмин¹, А. С. Чичкарев¹

¹Алтайский государственный университет
Российская Федерация, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

²Алтайский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 656049, Барнаул, пр. Красноармейский, 98

Аннотация. В статье представлены результаты реконструкции ареала распространения сосновых лесов в Предалтайской части юга Западной Сибири. Цель исследования – выявить участки территории Порозихинской ложбины стока наиболее перспективные для лесовосстановления. В предгорной части Алтайского края сохранились небольшие массивы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). К ним принадлежит Чупинский бор, площадь которого еще в начале XVIII века составляла около 10 тыс. га. Его площадь сократилась из-за выруб-ки леса, степных пожаров, нерегулируемого выпаса скота, комплекса неблагоприятных природных факторов: засухи, суховеи, активизация ветровой эрозии. Результаты исследования базируются на данных натурных наблюдений и данных дистанционного зондирования Земли. В процессе анализа космических снимков осуществлялся поиск песчаных отложений, благоприятных для выращивания сосны обыкновенной. Композиция снимков осуществлялась с использованием облачной платформы Google Earth Engine (GEE). Алгоритмы платформы Sentinel EO Browser автоматически обрабатывали данные спектральных каналов B8, B11, B12. После получения геологического композита в среде ArcGIS была проведена классификация изображений. Выбор каналов пригодных для отображения почвенных субстратов разного генезиса проводился экспертным путем. Сравни-валось растровое изображение и участки распространения песчаных почв, проводилась классификация раз-новидностей субстрата в зависимости от элемента рельефа, на котором он находится. Интеграция мультис-пектральных данных, цифровых моделей рельефа и почвенных характеристик позволила автоматизировать процесс пространственного анализа перспективных для восстановления леса участков с учетом комплекса экологических факторов: биоклиматические характеристики; рельеф; почвы; гранулометрический состав отложений; содержание органики; землепользование. Установлены закономерности распространения лесных почв в Порозихинской ложбине стока и выявлены участки перспективные для лесовосстановления.

Ключевые слова: Чупинский бор, реконструкция ареала сосновых лесов, дистанционное зондирование Земли.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 16–23

RECONSTRUCTION OF THE AREAS OF PINE FORESTS AND PROSPECTS FOR THEIR RESTORATION IN THE POROZIKHINSKAYA RUNOFF DOWNSTREAM

O. N. Baryshnikova¹, A. A. Malenko², N. M. Pochyomin¹, A. S. Chichkarev²

¹Altai State University
61, Lenin Av., Barnaul, 656049, Russian Federation

²Altai State Agrarian University
98, Krasnoarmeysky Av., Barnaul, 656049, Russian Federation

Abstract. This article presents the results of a reconstruction of the distribution range of pine forests in the Pre-Altai region of southern Western Siberia. The aim of the study is to identify areas of the Porozhikhinskaya drainage basin that are most promising for reforestation. In the foothills of the Altai Krai, small stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) remain. These include the Chupinsky Pine Forest, which at the beginning of the 18th century covered approximately 10,000 hectares. Its area has shrunk due to deforestation, steppe fires, unregulated grazing, and a combination of adverse environmental factors: droughts, dry winds, and increased wind erosion. The study's results are based on in-situ observations and Earth remote sensing data. Satellite imagery was analyzed to identify sandy deposits favorable for Scots pine growth. Image composition was performed using the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. Sentinel EO Browser algorithms automatically processed data from spectral channels B8, B11, and B12. After obtaining the geological composite, the images were classified in ArcGIS. The selection of bands suitable for displaying soil substrates of different origins was conducted through expert analysis. The raster image and sandy soil distribution areas were compared, and the substrate types were classified based on the relief element on which they are located.

The integration of multispectral data, digital elevation models, and soil characteristics enabled the automation of the spatial analysis of areas promising for forest restoration, taking into account a range of environmental factors: bioclimatic characteristics; topography; soils; sediment particle size distribution; organic matter content; and land use. Patterns of forest soil distribution in the Porozikha drainage basin were established, and areas promising for reforestation were identified.

Keywords: Chupinsky pine forest, pine forest habitat reconstruction, Earth remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

В степных районах Юго-Западной Сибири в настоящее время еще сохранились отдельные островки (рефугиумы) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), некогда занимавшие обширные территории [1–3], а в настоящее время представляющие уникальные природные объекты [4]. В Алтайском крае таким объектом является Чупинский бор, площадь которого еще в начале XVIII века составляла около 10 тыс. га. Сокращению его площади способствовали массовая бессистемная вырубка леса, степные пожары, нерегулируемый выпас скота, засухи и суховеи, приведшие к перемещению почвы, образованию котловин выдувания и песчаных наносов. В результате бесхозяйственной деятельности площадь бора сократилась в десятки раз и в начале 1950-х гг. уже составила 326 га, в том числе сосны – 253 га. Чупинский бор сохранился в левобережье реки Порозиха на северо-западном наветренном склоне долины этой реки. О былых площадях лесов в бассейне Порозихи можно судить по ареалу распространения множества разрозненных островков леса. Например, на территории Уржумского заказника, расположенного в правобережье реки Порозиха, сохранились березовые леса и перелески. Часть из них сформировалась на месте гарей и представляет собой заросли, где доминируют ивы и осины. Некоторые березняки сформировались на месте вырубленных сосновых лесов. Основная лесообразующая порода береза повислая (*Betula pendula*), в понижениях доминирует осина обыкновенная (*Populus tremula*). В подлеске произрастают: крушина ломкая (*Frangula alnus*), шиповник (*Rosa* sp.), на более влажных местообитаниях ива пепельная (*S. cinerea*). Во избежание негативных последствий ветровой эрозии, на месте утраченных лесов и прилегающих к борам землях сельскохозяйственного назначения стали создаваться защитные лесные насаждения. За последние 40 лет здесь было высажено около 4 тыс. га новых преимущественно сосновых насаждений. Учитывая большую значимость Чупинского бора для улучшения условий природной среды и её экологической стабилизации, актуально увеличение площади леса. Это обеспечит его дальнейшее устойчивое развитие, а в дальнейшем восстановление в прежних границах.

Цель работы – выявить участки территории Порозихинской ложбины стока наиболее перспективные для лесовосстановления. Для достижения цели необходимо было: провести полевые наблюдения и оценить современные условия произрастания сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Порозихинской ложбине стока; проанализировать исторические факты, доказывающие существование сосновых лесов в Порозихинской ложбине стока; проанализировать данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

с целью установления участков перспективных для лесовосстановления.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К северу от горных сооружений Алтая располагается Приобское плато, на поверхности которого существуют боровые ложбины стока. А. М. Малолетко [5] проанализировал гипотезы формирования боровых ложбин и пришел к выводу об их полигенетическом происхождении, в котором важную роль играли тектонические [6,7], флювиальные [8] и эоловые [9; 10] процессы. Исследования, проведенные авторами статьи на территории одной из них – Порозихинской ложбины стока, подтверждают комплексный генезис подобных образований. Порозихинская ложбина находится между долинами рек Аллей и Чарыш. Её ширина достигает десятка километров (рис. 1), а ширина современной долины реки Порозиха изменяется от 20 метров в верховье и до 25 метров в среднем и нижнем течениях. Ширина русла 2–5 метров соответственно. Длина Порозихинской ложбины составляет 72 км. Днище ложбины находится выше урезов вод рек Аллей и Чарыш на 50–70 метров (рис. 1), а в устье Порозихи имеет абсолютную высоту над уровнем моря около 160 м.

Отложения этой ложбины вскрываются в районе села Вяткино (183 м н.у.м.) и у с. Белово (170 м н.у.м.). Мощность разреза около 32 метров, в нем обнажаются аллювиальные волнисто- и косослоистые пески, которые А. М. Малолетко [5] относит ко второй половине средне-четвертичного времени ($Q_{2, 3+4}$). Поверхность отложений переработана ветром. Современный рельеф представлен эоловыми грядами, разделенными понижениями, в которых располагаются солончаки или пресные озера, заросшие водной растительностью. Склоны ложбины пологие. На некоторых участках они переходят в высокие террасы р. Порозиха. На террасах наблюдаются скопления озер округлой формы, суффозионного происхождения.

В настоящее время для исследования состояния лесов используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и информационные технологии [11; 12]. На основе ДЗЗ авторы статьи провели поиск песчаных отложений, благоприятных для выращивания сосны обыкновенной. Композиция космических снимков осуществлялась с использованием облачной платформы Google Earth Engine (GEE). После получения геологического композита изображений в геоинформационной системе ArcGIS была проведена классификация растрового изображения по отражательной способности комбинации спектральных каналов B8, B11, B12. Выбор каналов пригодных для отображения почвенных субстратов разного генезиса проводился

экспертным путем. Сравнялось растровое изображение и участки распространения песчаных почв, проводилась классификация разновидностей субстрата в зависимости от элемента рельефа, на котором он находится.

Интеграция мультиспектральных данных, цифровых моделей рельефа и почвенных характеристик позволила автоматизировать процесс пространственного анализа перспективных для восстановления леса участков с учетом комплекса экологических параметров: биоклиматических переменных; рельефа (цифровая модель рельефа); почвенных (рН, гранулометрия, содержание органики); землепользование (2014–2024).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Алгоритм идентификации оптимальных, для восстановления *Pinus sylvestris*, участков в бассейне р. Порозиха включал три этапа. Предварительная обработка данных: нормализация температурных значений ($\text{bio01} \times 0.1$); расчет сезонных композитов Sentinel 1-2

(май-июль) с фильтрацией облачности (<5 %); клиппинг (обрезка по экстенду) данных по границам водосбора. Расчет производных показателей: индекс влажности (NDWI): $(B8 - B11) / (B8 + B11)$ (рис. 2); вегетационный индекс (NDVI): $(B8 - B4) / (B8 + B4)$; уклон местности (алгоритм Terrain.slope GEE). Построение масок пригодности: $\text{var finalMask} = \text{precipMask} \cdot \text{and}(\text{tempMask}) // 300\text{--}700 \text{ мм/год}, 1\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}$; Осадки влажного квартала более 50 мм; $(\text{elevation.between}(100,1000))$; высота над уровнем моря, м; $(\text{slope.lte}(15))$; уклон $\leq 15^\circ$; soilPh (кислотность от 4,5 до 7,5 pH); $\text{sandContent.gte}(50)$ (песчаные почвы с содержанием фракции песка более 50 %); $\text{organicCarbon.gte}(2)$ (содержание органического углерода более 2 %); landCover (исключение антропогенных и природных объектов: древесный покров, кустарник, возделываемые земли, застройка, водные объекты); $\text{NDWI.gte}(-0.5)$ and $(\text{NDVI.lt}(0))$; (Влажность по индексу NDWI более $-0,5$ и отсутствие сомкнутой растительности по NDVI менее $0,5$).

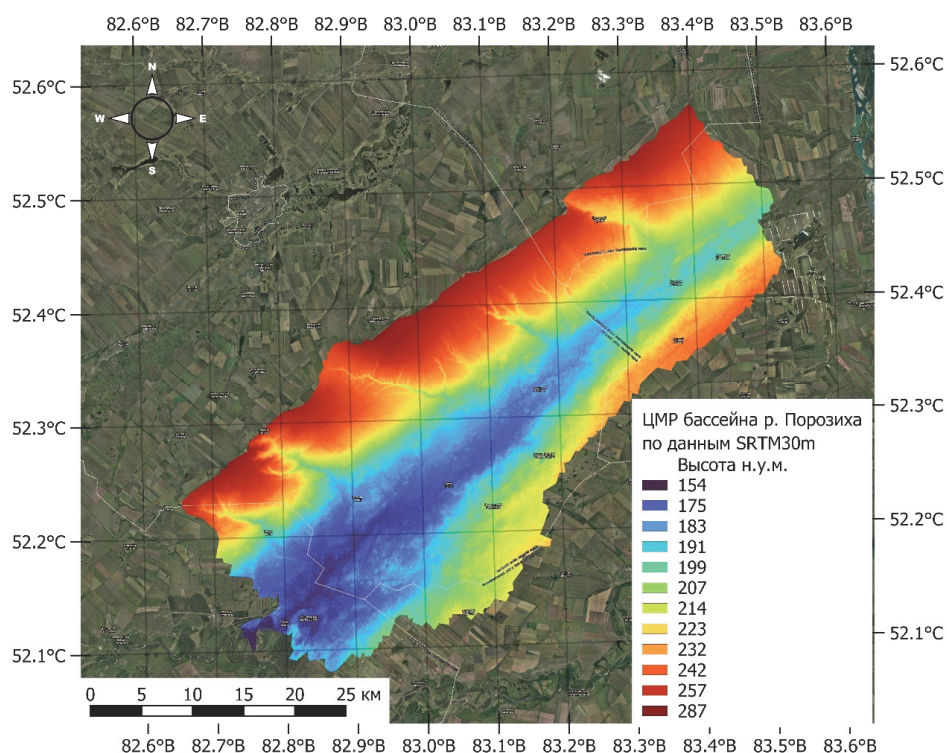


Рис. 1. Географическое положение и цифровая модель рельефа бассейна р. Порозиха

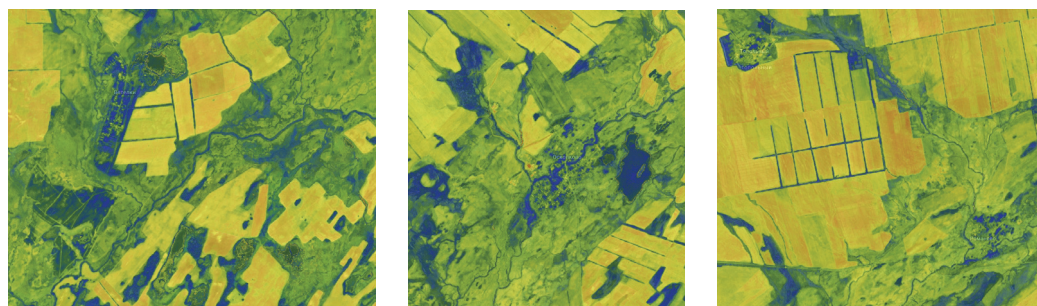


Рис. 2. Значения Индекса влажности, рассчитанного на основе комбинации полос $(B8A-B11)/(B8A+B11)$: наиболее темные оттенки зеленого цвета соответствуют переувлажненным участкам территории

Порозихинская ложбина стока в настоящее время характеризуется антропогенной деградацией боровых экосистем, на ее территории преобладают агроландшафты. В юго-западной части этой ложбины, на территории Шипуновского административного района Алтайского края, к юго-западу от села Усть-Порозиха, сохранился массив соснового леса, имеющий название «Чупинский бор» (см. рис. 1). Бор представляет собой естественный природный комплекс. В настоящее время этому бору присвоен статус памятника природы краевого значения. В 1930–1940-е годы в бору проведены интенсивные промышленные рубки, о чем свидетельствует отсутствие запаса спелых и перестойных насаждений в 1950 г. Это привело к усилению дефляции и формированию эолового рельефа. Активизация этих процессов обусловила необходимость проведения искусственного лесовосстановления, которое было начато в 1987 году. По данным лесоустройства 2014 г. средний возраст насаждений сосны составил – 55 лет, запас древесины – 157,2 м³/га, средний прирост сосны – 0,44 м³/га, класс бонитета – I,6, полнота – 0,73.

Сформированные на лесных почвах чистые по составу приспевающие высокополнотные древостой сосны растут по I–IIa классам бонитета и накопили 470–555 м³/га древесины. Рост искусственных древостоев хвойных пород I–III классам возраста на лесопригодных почвах соответствует I–IIIb классам бонитета, а запасы древесины составляют 265–468 м³/га. Наиболее продуктивные культуры сосны сформировались на аллювиально-дерновой слоисто-связнопесчаной почве, в возрасте 31 г имели запас 401 м³/га. Сосна в смешанных сосново-лиственничных культурах имеет лучшие показатели роста, чем лиственница.

Почвенный покров представлен почвами различных таксационных единиц, что способствует созданию разнотипных условий для развития лесных биоценозов. Реакция среды верхних горизонтов изменяется от нейтральной до слабощелочной. Гранулометрический состав неоднороден и варьирует от рыхлопесчаного до среднесуглинистого. Выделены три основных типа почв: черноземы, деново-подзолистые и серые лесные. Основу живого напочвенного покрова в бору составляют многолетние злаки, осока и разнотравье. Всего зарегистрировано 187 видов высших сосудистых растений из 136 родов, относящихся к 44 семействам. В среднем в естественных сосняках отмечено – 35 видов, в лесных культурах с сомкнутым пологом – 15 видов, там же без сомкнутого полога – 16 видов, на открытых местах – 22 вида, на минерализованных полосах – 17 видов [13].

В настоящее время в Чупинском бору сохраняются лесные и редкие виды [14]: дудник лесной (*Angelica sylvestris*), купырь лесной, купырь альпийский, купырь кандолля, дягиль низбегающий, дудник низбегающий (*Archangelica decurrens* Ldb. Fl.), Кошачья лапка двудомная (*Antennaria dioica*), резуха повислая (*Arabis pendula* L.), Змееголовник поникший, или змееголовник поникающий (*Dracocephalum nutans*), Змееголовник Рюйша (*Dracocephalum ruyschiana*), щитоовник мужской, или папоротник мужской (*Dryopteris filix-mas*), *Heteropappus altaicus*, Фиалка

опушенная гетеропапрус алтайский, Щитоовник картузианский, или игольчатый, или ланцетногребенчатый, или шартрзский, или татарский (*Dryopteris carthusiana*), ирис русский, касатик короткотрубчатый, касатик русский (*Iris ruthenica* Ker-Gavler), перловник поникший (*Melica nutans*) – многолетнее растение; вид рода перловник, длиннокорневищный злак. фиалка удивительная (*Viola mirabilis*), фиалка скальная (*Viola rupestris*), фиалка опушенная (*Viola hirta*).

Вокруг зарастающих озер развиты ивово-березовые прибрежные леса. Древостой образован ивой белой (*Salix alba*), березой повислой (*Betula pendula*), в подлеске ива трехтычинковая (*Salix triandra*), и. прутьевидная (*S. viminalis*), ежевика сизая (*Rubus caesius*). В травостое много влаголюбивых форм: черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris*), лютик ползучий (*Ranunculus repens*), чистец болотный (*Stachys palustris*) и другие.

Произрастание в долине реки Порозиха красно-книжные и редкие для современных сообществ растений свидетельствует о их широком распространении на территории бассейна в предшествующий современному климатический интервал. Во время устойчивого развития сосновых лесов климат на юге Западно-Сибирской равнины был более суровым, чем современный. Более низкие, чем современные, среднегодовые температуры воздуха в XVII – первой половине XIX вв. сопровождалось увеличением площади оледенения в горах [15], снижением высоты термической границы леса в горах и увеличением площадей лесов на равнинах. Индикатором суровости климата были «белогорья» или «белки» (вершины, покрытые снегом в летнее время): Ануйские, Тигирецкие, Коргонские, Башелакские, Чарышские, Убинские, Ульбинские, Холзунские, Тургусунские, Нарымские, Курчумские [15]. В настоящее время в летний сезон они полностью освобождаются от снега.

По инструментальным наблюдениям Г. Спасского [16] зима на территории Алтайского Горного округа в XVII – первой половине XIX вв. была суровой. В январе 1811 г. в термометрах замерзла ртуть. Спиртовый термометр показывал от 30 до 40° по Реомюру (37,5–50 °C). Г. И. Спасский (1814) засвидетельствовал снижение урожайности сельскохозяйственных культур. Весна наступала в начале апреля, колесный путь устанавливался с мая по первые числа октября, а санный путь – с начала ноября до конца марта (первая декада апреля). Следовательно, весна, судя по весенней распутице, длилась с конца марта (первая декада апреля), до середины мая, а осень с первых чисел октября (середина октября) по начало ноября (середина ноября). И. П. Фальк зафиксировал в своих трудах суровые зимы, во время которых малые реки промерзали до дна «... ни один месяц, кроме июля, не безопасен от ночных морозов» [17]. А. И. Кулибин [18] зафиксировал морозы до 40° по Реомюру (50 °C) и заморозки в августе. Лето было жарким, сухим и коротким. В июне и июле – до 28° по Реомюру (35 °C) в тени. Иногда жара достигала 30° по Реомюру (37,25 °C). Наиболее теплой была первая половина лета. Осень продолжалась с половины августа до половины октября. Снег выпадал в конце сентября и сразу же

начинались морозы. В декабре 1860 г. наблюдался абсолютный минимум -55°C . Эта температура была определена по срочному термометру, поскольку абсолютные термометры появились позднее, отмечались многоснежные зимы.

Несмотря на благоприятные условия для произрастания лесов их площадь сокращалась. Лес вырубался быстрее, чем шло его восстановление. Начальство Горного округа издавало указы, способствующие сохранению лесных ресурсов округа. В указе от 21 января 1786 г. по докладу Г. М. Соймонова было предусмотрено: «расписание лесов по заводам сообразно с величиной и нуждами каждого» [19]. В Указе от 16 апреля 1828 г. говорится: «на землях ведомства заводского запрещаются кому-либо лесопильные мельницы, винокурные и другие заводы, требующие огненного действия» [20].

Современный климат в районе исследования можно классифицировать как умеренный континентальный (метеостанция Алейск). Он характеризуется частой сменой погоды из-за изменения характера воздушных масс различного происхождения. Н. Ф. Харламовой [21] установлено, что средняя годовая температура воздуха за период 1961–2011 гг. составила $2,3^{\circ}\text{C}$ или $2,2^{\circ}\text{C}$ за 1961–2004 гг. и $1,3^{\circ}\text{C}$ за 1881–1980 гг. Самый теплый месяц в году – июль, его средняя температура $19,8^{\circ}\text{C}$, самый холодный – январь ($-17,5^{\circ}\text{C}$). Разница температур самого теплого и самого холодного месяцев (годовая амплитуда) достигает $37,3^{\circ}\text{C}$. Абсолютный максимум температуры воздуха (в тени) был отмечен 22 июля 1953 г. ($38,3^{\circ}\text{C}$) и 11 августа 2002 г. ($38,3^{\circ}\text{C}$). Самая низкая температура воздуха (абсолютный минимум) была зафиксирована 7 января 1931 г. ($-51,5^{\circ}\text{C}$), 18 декабря 1938 г. ($-49,5^{\circ}\text{C}$) и 6 января 2001 г. ($-48,2^{\circ}\text{C}$). Как было отмечено выше, сложно сравнивать эти данные с результатами инструментальных наблюдений, полученными XVII – первой половине XIX вв., из-за различий в приборной базе измерения температуры воздуха. Однако факт сохранения снега в летний сезон на вершинах передовых хребтов невозможно отрицать, а также данные о большей продолжительности вегетационного периода в настоящее время. Если в первой половине XIX снег выпадал в конце сентября и начинались морозы, в наши дни, по данным [19], первая ($12,9^{\circ}\text{C}$) и вторая ($11,2^{\circ}\text{C}$) декады сентября еще теплые, особенно в дневное время. Но уже 17 сентября возможны первые заморозки в воздухе, поэтому 17–21 сентября с переходом суточной температуры через 10°C заканчивается период активной вегетации растительности. Самый ранний осенний заморозок наблюдался 23 августа 1937 г. Ранние осенние заморозки в воздухе отмечались 3 сентября. Устойчивый переход суточной температуры через $+5^{\circ}\text{C}$ происходит 6–9 октября, а через 0°C в конце октября. Средняя дата образования устойчивого снежного покрова приходится на 6–7 ноября, и в 90 % зим он образуется до 23 ноября. В отдельные годы устойчивый снежный покров формировался только в декабре: 6-го в 1942 и 1992 гг. и 3-го в 1955 г. Раннее образование устойчивого снежного покрова наблюдалось 17 октября 1961 г. и 18 октября 2000 г.

Во время холодного периода возможны оттепели, когда температура, измеренная максимальным термометром, поднимается выше 0°C . Наибольшая повторяемость оттепелей приходится на март (44 %), наименьшая – на январь (3 %). Зимние оттепели кратковременны (1–2 дн.), более продолжительны оттепели в начале и конце зимы. В ноябре 1973 г. число дней с оттепелью достигло 24, в 1968 г. оттепель длилась 26 дней: с 10 марта по 4 апреля. В среднем за год наблюдается 24 дня с оттепелью.

Условия увлажнения в районе исследования можно характеризовать как недостаточные для устойчивого возобновления леса. В 1908 г., который был наиболее дождливым, выпало 670 мм осадков, в 1973 г. – всего 259 мм. Особенно велика изменчивость осадков летом. Так, в июле 1947 г. выпало 187 мм осадков, что составило 267 %, или более двух с половиной норм, а в июле 1966 г. – всего 4 мм, или 6 % месячной нормы. Недостаточное для лесовосстановления количество осадков и неравномерность их количества в многолетнем ряду и по сезонам года делают невозможным восстановление лесов без помощи человека. Хозяйственная деятельность человека, напротив, приводит к сокращению площадей лесов района исследования [22] и полноты лесных насаждений [23].

В бассейне реки Порозиха современные леса приурочены к северо-западному склону нижней части ложбины стока. Однако на всем ее протяжении встречаются относительно молодые боровые почвы, материнской породой которых служат эоловые и аллювиальные пески. Молодые боровые почвы, по гипотезе В. А. Николаева [23], могли сформироваться после суббореального ксеротермического максимума не более чем 2000 лет назад. Можно предположить, что в более влажные климатические периоды территории занятые эоловыми песками, были покрыты сосновыми лесами.

По данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), построена картосхема распространения песчаных отложений в бассейне р. Порозиха (рис. 3, А). Большая часть таких отложений приурочена к днищу ложбины стока. Сопоставление данных моделирования с со схемой увлажненности территории, построенной по данным ДЗЗ (рис. 3, Б), позволяет предположить, что на территории Порозихинской ложбины стока леса занимали значительные площади. Они тяготели к районам распространения эолового рельефа. Если критерий кислотности ограничить $4,5 < \text{pH} < 7$, то пригодных участков становится значительно меньше, так как исключается значительная часть территорий с признаками заболачивания, выраженного в горизонте почв 30–60 см. Исходя из этого опыта, можно выделить 4 ключевых участка для лесовосстановления: в районе с. Ветелки к северу от болота Гилево на залежных землях рядом с участком леса; между с. Осколково и р. Крутиха на залежных землях к западу от леса; в 3 км на северо-запад от урочища Ярки на залежных землях; к юго-востоку от с. Романово и к северу от трассы 01К-13 в 500 м от левого берега р. Порозиха (рис 3.). Восстановление лесов, на перечисленных участках, позволит ожидать расширение ареала сосновых лесов на прилегающие к ним территории.

ВЫВОДЫ

Порозихинская ложбина стока представляла собой рефугиум бореальной флоры, в котором на протяжении Малого ледникового периода существовали сосновые леса. До настоящего времени сохранился небольшой участок леса – Чупинский бор.

Факторами сокращения ареала сосновых лесов на территории Предалтайской равнины послужили: ари-

дизация климата и интенсивная хозяйственная деятельность человека. Дальнейшее изменение климата в сторону потепления, географическое положение Порозихинской ложбины стока в южной части Приобского степного плато и относительно не глубокий, по сравнению с другими ложбинами, врез ее днища являются факторами, сдерживающими естественное лесовосстановление.

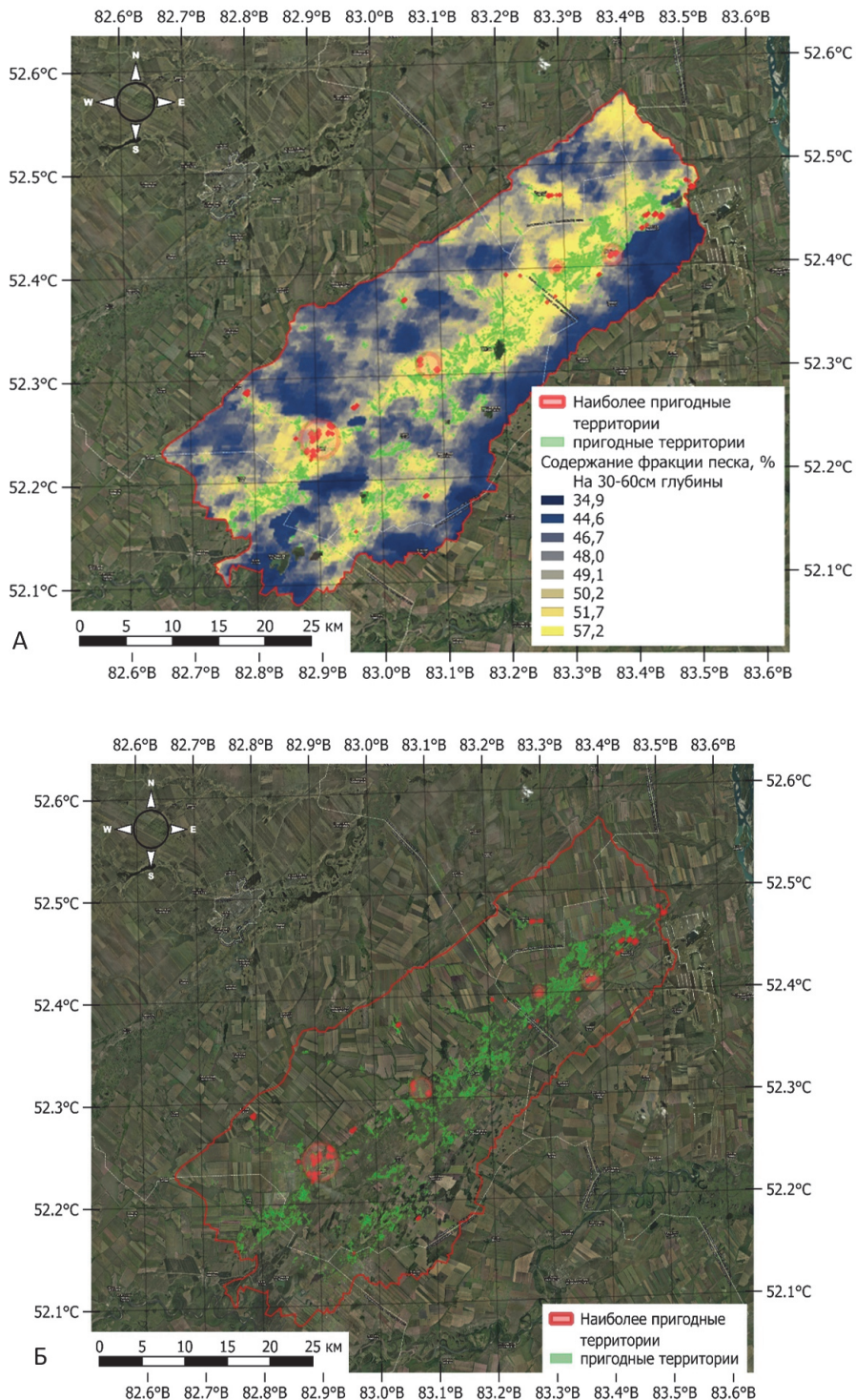


Рис. 3. Участки пригодные для произрастания леса:

А – распространение песчаных отложений в бассейне р. Порозиха (содержание фракции песка на глубине 30-60 см); Б – участки с оптимальными для восстановления сосны эдафическими условиями

Распространение боровых почв на территории Порозихинской ложбины стока позволяет реконструировать ареал распространения сосновых лесов, а применение геоинформационных технологий для обработки данных ДЗЗ дает возможность наиболее точно установить участки благоприятные для произрастания леса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Месоед И. Ю. К вопросу об установлении наиболее рациональных методов искусственного возобновления сосны в условиях ленточных боров Западно-Сибирского края // Труды Лебяжинской зональной лесной опытной станции. Вып. 1 : сб. ст. по лесному хозяйству, лесным культурам и агролесомелиорации зоны ленточных боров. Свердловск ; Москва : Гослестехиздат, 1934. С. 73–104.
2. Грибанов Л. Н. Ленточные боры Алтайского края и Казахстана. Москва : Сельхозгиз, 1954. 88 с.
3. Грибанов Л. Н. Степные боры Алтайского края и Казахстана. Москва ; Ленинград : Гослестбумиздат, 1960. 156 с.
4. Сосна степных и лесостепных боров Сибири / Л. И. Милютин, Т. Н. Новикова, В. В. Тараканов, И. В. Тихонова. Новосибирск : Изд-во «Гео». 2013. 127 с.
5. Малолетко А. М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. Томск : Томский гос. ун-т, 2008. С. 200–201.
6. Адаменко О. М. Происхождение современной морфоскульптуры Предалтайской равнины // Проблемы геоморфологии и неотектоники платформенных областей Сибири. Новосибирск : Наука, 1970. С. 50–62.
7. Новиков И. С. Геоморфологические формации юга Западной Сибири и прилегающих территорий. Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 4. С. 26–41. <https://doi.org/10.31857/S2949178924040037>
8. Деев Е. В., Зольников И. Д., Курбанов Р. Н. Проблема мегапаводков и катафлювиальных отложений в понимании четвертичной истории северной Евразии (от редколлегии) // Геоморфология и палеогеография. 2024. № 55(4). С. 5–12. <https://doi.org/10.31857/S2949178924040014>. EDN: FHCGIW
9. Федорович Б. А. О происхождении и палеогеографии Прииртышских равнин // Матер. Всесоюз. совещ. по изуч. четверт. Периода. Москва : Изд-во АН СССР, 1961. Т. 3. С. 346–352.
10. Зыкина В. С., Зыкин В. С., Маликова Е. Л. Лёссово-почвенная последовательность и эоловый рельеф плейстоцена Западной Сибири: хронология и особенности их формирования // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55, № 2. С. 34–62 URL: <https://journals.eco-vector.com/2949-1789/article/view/660702> (дата обращения: 07.04.2026).
11. Михайлов И. Р., Абрамов Н. А., Долматов С. Н. Методы дистанционного зондирования земли в лесной промышленности // Современные инновации, системы и технологии – Modern Innovations, Systems and Technologies. 2023. № 3(3). С. 0301–0310. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0301-0310>
12. Адамович И. Ю., Сиваков В. В., Челак Д. В. Использование информационных технологий при определении проективного покрытия эпифитных ли-

шайников в лихеноиндикации // Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 1. С. 28–33.

13. Чичкарев А. С., Маленко А. А., Малиновских А. А. Краткая характеристика живого напочвенного покрова в лесных культурах сосны в Чупинском бору // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сб. материалов. В 2 кн. / XV Междунар. науч.-практ. конф. (12–13 марта 2020 г.). Барнаул : РИО Алтайского ГАУ, 2020. Кн. 1. С. 322–323.
14. Малиновских А. А. Флора Чупинского бора. Флористический список. URL: <https://www.plantarium.ru/page/personal/of/946.html> (дата обращения: 07.04.2026).
15. Чихачев П. А. Путешествие в Восточный Алтай / пер. с фр. В. В. Цыбульского. М. : Наука, 1974. 360 с.
16. Спасский Г. И. Замечания хозяйственные и до климата относящиеся, учиненные в 1811 и 1812 году в Барнауле // Технологический журнал. 1814. Т. 11, ч. 4. С. 82–89.
17. Фальк И. П. Записки путешествия // Полн. собр. уч. путешествий по России. СПб. : Изд. имп. Академии наук, 1824. Т. 6. 546 с.
18. Кулибин А. И. Описание Колывано-Воскресенских заводов по 1833 г. // Горн. журн., 1836. № 1. С. 158–180; № 2. С. 326–361; № 3. С. 568–599; № 4. С. 144–164; № 5. С. 314–342; № 6. С. 546–571; № 7. С. 158–182.
19. Полное собрание законов Российской империи – I, 1786, № 16312.
20. Полное собрание законов Российской империи – II, 1828, № 1960.
21. Харламова Н. Ф. Климат и сезонная ритмика природы Барнаула. Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2013. 132 с.
22. Барышникова О. Н., Гладких Д. А. Современные изменения ландшафтов Северо-Предалтайской провинции Алтае-Саянской горной страны // География и природопользование Сибири. Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2023. № 31. С. 46–57.
23. Барышников С. Г., Коршунова Е. Е., Субботина Л. Л. Оценка полноты лесных насаждений ленточных боров степной зоны юга Западно-Сибирской равнины // Астраханский вестник экологического образования. 2025. № 5 (89). С. 78–86. DOI: 10.36698/2304-5957-2025-5-78-86

REFERENCES

1. Mesoed I. Yu. K voprosu ob ustanovlenii naibolee racional'nykh metodov iskusstvennogo vozobnovleniya sosny v usloviyakh lentochnykh borov Zapadno-Sibirskogo kraja // Trudy Lebyazhinskoj zonal'noj lesnoj opytnoj stancii. Vyp. 1 : Sbornik statej po lesnomu hozyajstvu, lesnym kul'turam i agrolesomelioracii zony lentochnykh borov. Sverdlovsk ; Moskva : Goslestekhzdat, 1934. S. 73–104.
2. Griбанov L. N. Lentochnye bory Altajskogo kraja i Kazahstana. Moskva : Sel'hozgiz, 1954. 88 s.
3. Griбанov L. N. Stepnye bory Altajskogo kraja i Kazahstana. Moskva ; Leningrad : Goslesbumizdat, 1960. 156 s.
4. Sosna stepnyh i lesostepnyh borov Sibiri / L. I. Milyutin, T. N. Novikova, V. V. Tarakanov, I. V. Tihonova. Novosibirsk : Izd-vo «Geo». 2013. 127 s.

5. Maloletko A. M. Evolyuciya rechnyh sistem Zapadnoj Sibiri v mezozoe i kajnozoe. Tomsk : Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2008. S. 200–201.
6. Adamenko O. M. Proiskhozhdenie sovremennoj morfokul'ptury Predaltajskoj ravniny // Problemy geomorfologii i neotektoniki platformennyh oblastej Sibiri. Novosibirsk : Nauka, 1970. S. 50–62.
7. Novikov I. S. Geomorfologicheskie formacii yuga Zapadnoj Sibiri i prilegayushchih territorij. Geomorfologiya i paleogeografiya. T. 55. No. 4, 2024. S. 26–41. <https://doi.org/10.31857/S2949178924040037>
8. Deev E. V., Zol'nikov I. D., Kurbanov R. N. Problema megapavodkov i kataflyuvial'nyh otlozhenij v ponimanii chetvertichnoj istorii severnoj Evrazii (ot redkollegii). Geomorfologiya i paleogeografiya. 2024. No. 55(4). S. 5–12. <https://doi.org/10.31857/S2949178924040014>. EDN: FHCGIW
9. Fedorovich B. A. O proiskhozhdenii i paleogeografii Priirtyshskih ravnin // Mater. Vsesoyuz. soveshch. po izuch. chetvert. Perioda. M. : Izd-vo AN SSSR, 1961. T. 3. S. 346–352.
10. Zykina V. S., Zykin V. S., Malikova E. L. Lëssovo-pochvennaya posledovatel'nost' i eolovyy rel'ef plejstocena Zapadnoj Sibiri: hronologiya i osobennosti ih formirovaniya // Geomorfologiya i paleogeografiya. T. 55, № 2. 2024. S. 34–62 <https://journals.eco-vector.com/2949-1789/article/view/660702> (data obrashcheniya: 07.04.2026).
11. Mihajlov I. R., Abramov N. A., Dolmatov S. N. Metody distancionnogo zondirovaniya zemli v lesnoj promyshlennosti // Sovremennye innovacii, sistemy i tekhnologii – Modern Innovations, Systems and Technologies. 2023. № 3(3). S. 0301–0310. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0301-0310>
12. Adamovich I. Yu., Sivakov V. V., Chelak D. V. Ispol'zovanie informacionnyh tekhnologij pri opredelenii proektivnogo pokrytiya epifitnyh lishajnikov v lihe-noindikacii // Hvojnye boreal'noj zony. 2026. T. XLIV, No 1. S. 28–33.
13. Chichkarev A. S., Malenko A. A., Malinovskih A. A. Kratkaya harakteristika zhivogo napochvennogo pokrova v lesnyh kul'turah sosny v Chupinskom boru // Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyajstvu : sbornik materialov. V 2 kn. / XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya (12–13 marta 2020 g.). Barnaul : RIO Altajskogo GAU, 2020. Kn. 1. S. 322–323.
14. Malinovskih A. A. Flora Chupinskogo bora. Floristicheskij spisok/ URL: <https://www.plantarium.ru/page/personal/of/946.html> (data obrashcheniya: 07.04.2026).
15. Chihachev P. A. Puteshestvie v Vostochnyj Altaj / per. s franc. V. V. Cybul'skogo. M. : Nauka, 1974. 360 s.
16. Spasskij G. Zamechaniya hozyajstvennye i do klimata odnosyashchiesya, uchinnye v 1811 i 1812 godu v Barnaule // Tekhnologicheskij zhurnal. 1814. T. 11, ch. 4. S. 82–89.
17. Fal'k I. P. Zapiski puteshestviya // Poln. sobr. uch. puteshestvij po Rossii. SPb., Izd. imp. Akademii nauk, 1824. T. 6. 546 s.
18. Kulibin A. I. Opisanie Kolyvano-Voskresenskikh zavodov po 1833 g. // Gorn. zhurn., 1836. № 1. S. 158–180; № 2. S. 326–361; № 3. S. 568–599; № 4. S. 144–164; № 5. S. 314–342; № 6. S. 546–571; № 7. S. 158–182.
19. Polnoe sobranie zakonov Rossijskoj imperii – I, 1786, № 16312.
20. Polnoe sobranie zakonov Rossijskoj imperii – II, 1828, № 1960.
21. Harlamova N.F. Klimat i sezonnaya ritmika prirody Barnaula. Barnaul : Izd-vo Alt. un-ta, 2013. 132 s.
22. Baryshnikova O. N., Gladkih D. A. Sovremennye izmeneniya landshaftov Severo-Predaltajskoj provincii Altae-Sayanskoj gornoj strany // Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri Barnaul : Izd-vo AltGU, 2023. № 31. S. 46–57.
23. Baryshnikov S. G., Korshunova E. E., Subbotina L. L. Ocenka polnoty lesnyh nasazhdenij lentochnyh borov stepnoj zony yuga Zapadno-Sibirskoj ravniny // Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2025. № 5 (89). S. 78–86. DOI: 10.36698/2304-5957-2025-5-78-86

© Барышникова О. Н., Маленко А. А.,
Почёмин Н. М., Чичкарев А. С., 2026

Поступила в редакцию 24.05.2026

Принята к печати 26.06.2026

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СЫРЬЯ

А. В. Сафина, Е. И. Байгильдеева

Казанский национальный исследовательский технологический университет
Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68

Аннотация. В статье представлен обзор современных научных исследований в области комплексной переработки отходов, образующихся в результате заготовки и промышленного использования хвойной древесной биомассы, включая стволую часть, корни, ветки, хвою, шишки и сучки. Цель работы – анализ современного состояния вопроса извлечения биологически активных веществ из древесной биомассы хвойных пород с акцентом на особенности структуры отдельных морфологических частей. Исследовались научные труды и патенты, применялись методы комплексного изучения, сравнения, анализа и обобщения данных.

В числе перспективных направлений переработки растительных отходов представлена экстракция как способ, позволяющий извлекать биологически ценные вещества из всех морфологических компонентов дерева. Указано, что к числу богатых ценными веществами компонентов древесной биомассы относится хвоя, содержащая эфирные масла, дубильные вещества и витамины, а также древесная кора, содержащая целый спектр экстрактивных веществ, которые могут применяться в фармацевтике, сельском хозяйстве и т.д. Выявлено, что мало исследованным, но перспективным источником биологически активных веществ являются шишки хвойных пород, в которых содержатся эфирные масла, обладающие антиоксидантным и противоопухолевым действием. Проанализированы результаты исследований экстрагирования отходов стволую части древесины, которые показали наличие биологически активных полифенолов, а также особый интерес ученых к выделению из древесины лиственницы дигидрокверцетина, являющегося природным антиоксидантом. Представлены исследования по извлечению ценных веществ из корней деревьев, которые богаты фенольными соединениями, смолистыми и дубильными веществами. Выявлено, что уникальным источником фитострагенов, в частности, лигнанов является сучковая древесина норвежской ели и сосны обыкновенной.

Результаты проведенного аналитического обзора могут быть использованы в качестве основы для углубленных исследований в области извлечения наиболее ценных биологически активных веществ из хвойной древесной биомассы посредством экстракции с применением оптимальных режимных параметров и экстрагентов.

Ключевые слова: комплексная переработка; экстракция; хвойная древесная биомасса; морфологические части; биологически активные вещества.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 24–33

REVIEW OF MODERN METHODS FOR EXTRACTING BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM CONIFEROUS WOOD BIOMASS, TAKING INTO ACCOUNT THE MORPHOLOGICAL HETEROGENEITY OF THE RAW MATERIAL

A. V. Safina, E. I. Baigildeeva

Kazan National Research Technological University
68, K. Marksa str., Kazan, 420015, Russian Federation

Abstract. The article provides an overview of current scientific research in the field of comprehensive recycling of waste generated as a result of harvesting and industrial use of coniferous wood biomass, including the stem, roots, branches, needles, cones, and knots. The purpose of this work is to analyze the current state of the issue of extracting biologically active substances from coniferous wood biomass, with a focus on the structure of individual morphological parts. Scientific papers and patents were studied, and methods of comprehensive research, comparison, analysis, and generalization of data were applied.

Among the promising areas of plant waste recycling, extraction is presented as a method that allows for the extraction of biologically valuable substances from all morphological components of the tree. It is stated that the valuable components of wood biomass include pine needles, which contain essential oils, tannins, and vitamins, as well as wood bark, which contains a wide range of extractive substances that can be used in pharmaceuticals, agriculture, and other fields. It has been revealed that coniferous cones, which contain essential oils with antioxidant and antitumor properties, are a little-studied but promising source of biologically active substances. The results of studies on the

extraction of waste from the trunk part of wood have been analyzed, which have shown the presence of biologically active polyphenols, as well as the special interest of scientists in isolating dihydroquercetin, a natural antioxidant, from larch wood. Research on the extraction of valuable substances from tree roots, which are rich in phenolic compounds, resinous substances, and tannins, has been presented. It has been found that the unique source of phytoestrogens, particularly lignans, is the knot wood of Norway spruce and Scots pine.

The outcomes of this analytical review can serve as a foundation for more in-depth research aimed at optimizing the extraction of high-value bioactive compounds from woody biomass through the application of tailored process parameters and selective extractants.

Keywords: complex processing; extraction; coniferous wood biomass; morphological parts; biologically active substances.

ВВЕДЕНИЕ

Лесопромышленный комплекс России стоит на пороге качественной трансформации, где ключевым вектором развития становится не столько наращивание объемов заготовки древесины, сколько глубина и рациональность ее переработки. Ежегодно в процессе лесозаготовки и промышленной переработки древесины образуются миллионы кубометров вторичных древесных ресурсов, которые традиционно рассматриваются как отходы. Однако в условиях истощения экстенсивных путей развития отрасли и ужесточения экологических требований данные «отходы» могут быть трансформированы в ценное сырьевое звено, способное стать основой для создания продуктов с высокой добавленной стоимостью [1].

По аналитическим данным Национального лесного агентства развития и инвестиций, представленным на Биотопливном конгрессе в г. Санкт-Петербург в 2025 году, лесопромышленный комплекс России несет огромные потери древесного сырья в виде отходов, образующихся при заготовке и переработке древесины [2]. К ним относят остающиеся на лесосеках дрова и балансы, не находящие сбыта в виду их низкого качества, ветки, сучья, корни, пни, щепу, опилки, древесную зелень, а также ликвидные отходы деревообрабатывающей промышленности, пригодные для последующей обработки [3]. По оценкам специалистов совокупное количество образующихся отходов достигает 46 % от всего объема сырья, вывозимого с лесосек.

Согласно Приказу № 23 Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 17.01.2022 г. [4], очистка лесосек осуществляется путем сбора порубочных остатков в кучи и валы для сжигания, перегнивания или подкормки диких животных, либо для разбрасывания измельченных остатков с целью улучшения лесорастительных условий. Однако подобный подход не учитывает современных вызовов, стоящих перед экономикой страны. На данном этапе необходимо развитие технологий и создание предприятий глубокой переработки древесины на базе современного высокотехнологичного оборудования с целью использования всего объема древесной биомассы, включая малоценные породы древесины [5].

Современная лесная промышленность России работает на собственных ресурсах и по показателям обеспеченности лесом находится на втором месте в мире после Бразилии. Структура лесного фонда нашей страны представлена, в основном, хвойными породами – 76 % (преимущественно лиственница, сосна, ель) от всего объема лесов. Заготовка древесины

хвойных пород является основой лесозаготовительной деятельности в России, превалируя над заготовкой лиственных пород, и составляет почти 2/3 от вывозимых материалов.

Одним из направлений эффективной переработки отходов хвойной древесной биомассы являются экстракционные технологии, позволяющие извлекать широкий перечень биологически активных веществ (БАВ), к которым относят витамины, эфирные масла, микроэлементы, пигменты, жирные кислоты, альдегиды, смолы и др. [6–8]. Реализация данных технологий обеспечивает получение биологически активных компонентов с высокой добавленной стоимостью, которые являются основой для производства препаратов лечебно-профилактического и медицинского назначения, кормовых добавок, экологически чистых удобрений и т. д. [9; 10].

Как показали исследования [11], фитопрепараты составляют примерно 25 % от общего количества зарегистрированных лекарственных средств. Они представляют собой утвержденные в установленном порядке готовые лекарственные средства, которые содержат БАВ растительного происхождения или лекарственное растительное сырье и применяются для лечения, либо профилактики различных заболеваний практически всех органов и систем человеческого организма, в том числе сердечно-сосудистой, нервной, дыхательной, желудочно-кишечного тракта и т. д.

В 2020 году в четырёх сегментах лекарственных форм на основе фитопрепаратов (таблетки, капсулы, капли, сироп) в стоимостном выражении преобладали зарубежные производители (68, 65, 96 и 81 % соответственно). Отечественные компании были лидерами только в сегменте растительных сборов, обеспечивая 97 % продаж. При этом зарубежные продукты были представлены в виде стандартизованных экстрактов, которые предполагали сложные технологии получения, были хорошо изучены и защищены патентами.

В 2024 году производители из США и ЕС сократили долю своего присутствия на российском рынке до 12 %, уступив место новым партнёрам, в частности, из Индии, Турции и др. Вместе с тем, на 5-м российском фармацевтическом форуме «Лекарственная безопасность», который прошёл в рамках Петербургского международного экономического форума (ПМЭФ), отмечалось, что около 85 % лекарственных препаратов, зарегистрированных в России за последние 1,5 года, являются отечественными [12]. Это отражает реализацию стратегического курса на фармацевтический суверенитет и импортозамещение. В данном кон-

тексте развитие экстракционных технологий, направленных на извлечение биологически активных соединений из вторичных ресурсов лесной биомассы, приобретает особую научно-практическую значимость, поскольку обеспечивает сырьевую базу для создания конкурентоспособных отечественных фармпрепаратов.

Исследования, посвященные вопросам экстракции компонентов из отходов древесной биомассы, находят широкое отражение в научной литературе, однако их объем существенно уступает числу работ, посвященных, например, переработке отходов сельскохозяйственного сырья. Это обусловлено большим разнообразием аграрных остатков, их относительно низкой стоимостью и логистической простотой сбора по сравнению с древесными отходами. В то же время большие объемы вторичных ресурсов хвойной древесной биомассы представляют значительный интерес с точки зрения разнообразия и ценности извлекаемых биологически активных веществ, что и определило актуальность настоящего обзора.

ЦЕЛЬ ОБЗОРА – анализ современного состояния вопроса извлечения биологически активных веществ из древесной биомассы хвойных пород с акцентом на особенности структуры отдельных морфологических частей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов по данной теме служили научные труды отечественных и зарубежных ученых, российские патенты на изобретения. Поиск научных работ производился с применением сети Internet и российской научной электронной библиотеки eLibrary. Патентный поиск осуществлялся посредством информационно-поисковой системы ФИПС. Было изучено более 100 научных работ и патентов, из которых для более детального изучения были выбраны 50 наиболее значимых. В данном аналитическом исследовании применялись методы комплексного изучения, сравнения, анализа и обобщения данных.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Эффективность извлечения ценных биологически активных веществ из древесной биомассы определяется совокупностью физико-химических и теплофизических характеристик сырья, определяющих кинетику массообменных процессов. Указанные свойства варьируются в зависимости от таксономической принадлежности породы (хвойные или лиственные) и морфологической неоднородности отдельных частей дерева. Древесная биомасса включает ствол и корневую систему, листья и хвою, неодревесневшие побеги, сучья, ветви и кору. Необходимость максимального извлечения ценных компонентов из каждой части биомассы обуславливает применение разных способов экстрагирования, соответствующих растворителей и режимных параметров, что подтверждается данными современных научных исследований.

Одним из источников получения новых продуктов на основе вторичных ресурсов леса является древес-

ная зелень. При заготовке хвойного леса с 1 гектара может образоваться 15–20 т хвойной зелени. Она является специфичным сырьем для экстракционной переработки, обладающим рядом уникальных физико-химических характеристик [13; 14]. Наличие смоляных ходов и эфирных масел характеризует высокий потенциал хвойной зелени и открывает широкие перспективы использования ее как эфиромасличного сырья для получения ценных биологически активных веществ [15–19]. Значительное количество работ посвящено изучению химического состава зелени хвойных пород древесины и разработке различных способов получения из нее эфирного масла [20–24].

Игольчатая форма хвои обеспечивает развитую удельную поверхность, что теоретически интенсифицирует экстракцию. Однако наличие восковой кутикулы на поверхности хвоинок обуславливает выраженные гидрофобные свойства и существенно ограничивает проникновение полярных экстрагентов. Это требует применения методов, обеспечивающих интенсификацию массообменных процессов.

Способ классической экстракции древесной зелени хвойных пород (сосны, ели, пихты и кедра) с целью получения биологически активных веществ предложен В. И. Рошиным и др. [25]. В качестве экстрагентов использовались бензин, гексан, петролейный эфир и ацетон. Метод предполагает комплексный подход к извлечению различных компонентов и включает последовательную экстракцию органическим растворителем, выделение хвойного воска, омыление экстрактивных веществ щелочью, разделение на нейтральные вещества и соли органических кислот. Далее проводят вакуумную дистилляцию с выделением фракций сесквитерпеноидов при 90–120 °С и лабдановых дитерпеноидов при 120–210 °С. Из кубового остатка выделяют жирные кислоты, стерины, полипrenoлы и тритерпеноиды. Последовательная экстракция органическим растворителем создает устойчивый концентрационный градиент, обеспечивая полноту перехода целевых веществ из твердой фазы в раствор, а вакуумная дистилляция при остаточном давлении менее 400 Па позволяет снизить температуру кипения и предотвращает термодеградацию лабильных соединений.

Переработка древесной зелени пихты сибирской (*Abies sibirica Ledeb.*) по технологии совмещенной водно-бензиновой экстракции представлена в работе [26]. Использование двухконтурного аппарата, обеспечивающего одновременную отгонку эфирного масла и интенсификацию извлечения других экстрактивных компонентов, позволяет выделять до 20 % и более (в пересчете на абсолютно сухую массу сырья) содержащихся в ней биологически активных соединений. Авторы отмечают, что по мере перехода от молодняков к спелым древостоям соотношение биологически активных веществ к кормовым компонентам снижается с 0,91 до 0,67. Однако содержание большинства анализируемых экстрактивных веществ увеличивается в более зрелых насаждениях, что можно объяснить онтогенетическим накоплением запасов экстрактивных соединений в древесной зелени.

Комплексная технология переработки древесной зелени и коры пихты сибирской (*Abies sibirica Ledeb.*),

с получением широкого спектра биологически активных продуктов и вторичных ресурсов, предложена в работе [27]. Основными стадиями данной технологии являются экстракция жидким диоксидом углерода (5,6–6,0 МПа, 18–22 °С, 4–6 ч), паровая дистилляция эфирного масла (110–120 °С, 12–14 ч), водная и спиртовая экстракции послеэкстракционных остатков этанолом с концентрацией 70–94 %. При этом из 1,5 т исходного сырья получают 23–25 кг эфирного масла, 258–260 кг кубовой жидкости, 497–500 кг флорентинной воды. На основе кубовой жидкости выделялись хвойно-водный и хвойно-соляной экстракты. Спиртовая экстракция обеспечивала получение 229–340 кг экстракта с содержанием экстрактивных веществ 31,94–41,62 %, из которого выделены липидная фракция и водный экстракт, а также 127,7 кг хвойной пасты. Твердый остаток после спиртовой экстракции в количестве 350 кг используется для производства витаминной муки. Кроме того, этиловый спирт регенерируется с коэффициентом 0,75–0,80.

Исследование экстрактов древесной зелени лиственницы сибирской (*Larix sibirica Ledeb.*), а также ее коры и древесной части побегов с применением таких растворителей, как петролейный эфир, диэтиловый эфир, этилацетат и изопропиловый спирт, представлено в работе [28]. Анализ экстрактов из отдельных морфологических частей биомассы, собранных в летний и осенний периоды, позволил проследить изменчивость сезонного химического состава лиственничной зелени, что создало основу для целенаправленного использования ее компонентов в производстве биологически активных добавок, функциональных ингредиентов и технических продуктов. Установлено, что хвоя лиственницы летнего сбора содержит меньше низкополярных экстрактивных веществ, извлекаемых петролейным и диэтиловым эфирами, чем хвоя других пород. Наибольшая концентрация как эфирных масел, так и экстрактивных веществ всех типов выявлена в коре побегов. В осенних образцах наблюдается рост общего содержания экстрактивных веществ при снижении доли эфирных масел.

Содержание экстрактивных веществ и химический состав хвои, отплодоносивших шишек и коры лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi Mayr.*) проанализированы в работе [29]. Экстракцию проводили 47,5 %-м водным раствором этанола как традиционным способом, так и с применением предэкстракционной механохимической активации (ПЭМХА). Установлено, что в последнем случае увеличивается выход полиолов из хвои и моно-/дисахаридов из коры, в частности, маннозы и арабинозы, обладающих антибактериальными и противоопухолевыми свойствами. Авторы отмечают существенное различие состава и содержания биологически активных веществ в зависимости от морфологической части растения. В хвое выявлены моно- и дисахариды, полиолы, флавоноиды, карбоновые и фенолокислоты, а в шишках и коре преобладают жирные и смоляные кислоты.

Что касается ценных компонентов шишек хвойных пород, то исследования в этом направлении ведутся, но они малочисленны. Семенные чешуи шишек, пронизанные смоляными ходами, содержат эфирное мас-

ло. В работе [30] авторами отмечается наличие до 1,16 % эфирного масла в шишках пихты сибирской с преобладанием монотерпенов, основным компонентом которых является борнилацетат. Эфирное масло шишек кедрового стланика (*Pinus pumila (Pall.) Regel*), полученное гидродистилляцией в аппаратах Гинзберга и Клевенджера, исследовано в работе [31]. Как отмечают авторы, основным компонентом также являются монотерпеновые соединения, но с преобладанием лимонена, что обуславливает антиоксидантное и противоопухолевое действие масла.

В работе [32] представлены результаты комплексного исследования количественного содержания экстрактивных веществ в биомассе (древесине, коре, корнях) хвойных пород, а именно лиственницы (*Larix sibirica L.*), сосны (*Pinus sylvestris L.*), пихты (*Abies sibirica L.*), ели (*Picea obovata L.*) и кедра (*Pinus sibirica Du Tour*). Экстракцию проводили последовательно: этилацетатом при температуре кипения в течение 4 ч для выделения общих экстрактивных веществ, затем гексаном для извлечения смолистых (терпеновых) компонентов и дистиллированной водой при 90 °С в течение 4 ч для получения водорастворимых соединений. Установлено, что наибольшее содержание этилацетаторастворимых экстрактивных веществ наблюдается в коре (до 15 % от а.с.в., особенно у пихты), тогда как в древесине и корнях их выход составляет 2 – 6 %. Наиболее богаты терпенами древесина кедра и сосны (более 3 % от а.с.в.). Максимальный выход водорастворимых веществ зафиксирован для древесины лиственницы (18 %) и коры пихты (10 %). Авторами проведена систематизация данных по фенольным экстрактивным соединениям хвойных пород, подтвердившая высокое содержание биологически активных полифенолов во всех исследованных частях древесного сырья.

Лиственница (*Larix sibirica Lebed.*) доминирует в составе лесных массивов Сибири и Дальнего Востока и широко используется в лесозаготовительной и деревоперерабатывающей отраслях [33]. При этом ее биомасса является богатым источником биологически активных соединений, что делает данную породу приоритетным объектом для экстракционных технологий [34]. Многие исследователи сосредоточены на выделении из данной древесины дигидрокверцетина (ДКВ), который является ценным природным антиоксидантом.

В работе Б. М. Кершенгольца и др. [35] представлен экологически безопасный и ресурсосберегающий метод получения ДКВ из отходов лесозаготовки и деревопереработки лиственницы. Технология включает твердофазную механохимическую активацию опилок в шаровой мельнице с сухим гидроксидом натрия (соотношение 19:1), последующую водную экстракцию при перемешивании в течение 15 ч, фильтрацию и осаждение дигидрокверцетина подкислением экстракта соляной кислотой до pH 1,5–2,0. Целевой продукт выделяют центрифугированием и высушивают. Метод исключает использование органических растворителей, минимизирует энергозатраты и позволяет получать биопрепарат дигидрокверцетина, пригодный для применения в фармацевтике, пищевой и косметической промышленности.

Способ экстракции дигидрокверцетина из щепы лиственницы с использованием монокомпонентного органического растворителя в двухступенчатой системе с непрерывной циркуляцией и низкочастотным пульсирующим полем при температуре, близкой к точке кипения, разработан А. Н. Кислицыным и Е. Л. Мальчиковым [36]. Конструкция установки позволяет реализовать процесс в замкнутом, энергоэффективном и управляемом режиме.

А. С. Кочетовым и С. А. Кочетовым предложена усовершенствованная технология выделения ДКВ с предварительным двухэтапным замачиванием сырья и экстракцией в псевдосжиженном состоянии при 30–40 °С, где в качестве растворителя предложены растворы водного этилового спирта и деионизированной воды [37]. Предлагаемый способ и оборудование сокращают продолжительность процесса извлечения, снижают расход растворителей при существенном конструктивном упрощении аппаратного оформления.

Экологически безопасный метод одновременного извлечения дигидрокверцетина и арабиногалактана (АГ) из древесины лиственницы сибирской водно-этанольной экстракцией предложен В. А. Левданским и др. [38]. Использование 15 %-го раствора этанола при экстракции измельченного сырья (1–3 мм) в течение 2 ч обеспечивает до 1,8 % выхода ДКВ и до 18 % АГ, исключая необходимость предварительного отделения смолистых веществ. Предварительная механоактивация древесины сокращает длительность процесса до 30 мин без снижения выхода целевых продуктов.

Технология совмещенного получения ДКВ и АГ из отходов древесины представлена в работе Ю. А. Малкова и соавт. [39]. После предварительного извлечения дигидрокверцетина и смол предлагается извлекать АГ горячей водой с температурой 80–90 °С с последующей очисткой смеси ультра- и диафильтрацией с использованием гидрофобных и гидрофильных мембран. Сушка экстракта осуществляется в распылительной сушилке при 110–115 °С и давлении 0,15–0,2 МПа. Технология обеспечивает высокий выход АГ, исключает применение импортных реагентов (флокулянтов) и позволяет автоматизировать процесс в непрерывном режиме, что значительно снижает энергозатраты.

В процессе промышленной обработки массивной древесины образуется огромное количество отходов в виде коры. Кора хвойных пород является потенциально ценным объектом для экстрагирования БАВ. Она отличается от древесины своей плотностью, структурой и высоким содержанием активных веществ, в том числе дубильных, а также эфирных масел и фенольных соединений, что требует адаптации методов экстракции под ее биологические и химические характеристики [40].

В работе [41] показана принципиальная возможность вовлечения отходов, возникающих при окоривании хвойных пород (сосны, лиственницы, пихты и ели), в дубильно-экстрактовое производство. Установлено, что применение разбавленного водного раствора гидроксида натрия обеспечивает эффективное извлечение дубильных веществ из коры. Для повышения качества получаемых экстрактов разработан комбинированный метод их облагораживания, вклю-

чающий нейтрализацию на анионитной смоле КУ-2 до pH 5,8–6, сульфитирование сульфитом натрия (0,1–1 % от массы сухих веществ экстракта) и ультрафильтрацию на мембранах из полых волокон ВПУ-15 со степенью концентрирования не более 30 %. Предложенная технология позволяет получать стабильные, очищенные от примесей дубильные экстракты, пригодные для использования в кожевенной, деревообрабатывающей и других отраслях промышленности.

Перспективы применения экстракта коры сосны (*Pinus sylvestris* L.) в качестве функционального компонента в составе косметических средств, направленных на защиту кожи от окислительного стресса и преждевременного старения, отражены в работе [42]. В результате экстракции биологически активных веществ из коры 2 %-м раствором гидроксида натрия (гидро модуль 1:40) при температуре 100 °С в течение 1 ч получается экстракт с высоким содержанием фенольных флавоноидов, дубильных веществ и проантоцианидинов, обладающих выраженной антиоксидантной активностью. В ходе исследования разработаны технологические подходы к комплексной переработке коры сосны с получением широкого спектра востребованных химических продуктов: смолистых веществ (4,8 %), дубильного экстракта (10 %), антоцианидинхлоридов (10 %), проантоцианидинов (0,5 %) и пектина (4 %) от массы абсолютно сухой коры. Подбор оптимальных экстрагентов и режимов экстракции позволил целенаправленно выделять отдельные группы биологически активных соединений.

В работе [43] предложен усовершенствованный способ экстракции коры лиственницы с использованием водного раствора моноэтаноламина (МЭА) в качестве активной добавки. Данный метод превосходит традиционные способы экстракции по эффективности извлечения фенольных соединений, позволяя выделять из данной коры до 50 % веществ фенольной природы. Установлено, что концентрация МЭА до 5 % и гидро модуль 14 обеспечивают максимальный выход экстрактивных веществ и повышают содержание флавоноидов в экстракте до 18 %.

Метод комплексной переработки коры кедрового (*Pinus sibirica*) для последовательного извлечения танинов и этаноллигнинов раствором этилового спирта предложен в работе [44]. Посредством инструментов математического моделирования и оптимизации параметрами установлены оптимальные параметры концентрации экстрагента, температуры и продолжительности обработки при извлечении указанных компонентов. Так, концентрированные спиртовые растворы подавляют экстракцию танинов во времени, тогда как разбавленные до 70,1 % растворы этанола обеспечивают их максимальный выход до 15,5 %. Для эффективного извлечения этаноллигнинов (до 19,4 %) целесообразна концентрация этанола составляет 61,1 %, но процесс извлечения должен протекать в условиях повышенной до 232,2 °С температуры. Данный научно и математически обоснованный подход позволяет рационально использовать хвойную кору для получения целевых экстрактов с прогнозируемым выходом и качеством.

Интерес в качестве объектов экстрагирования представляют собой и корни деревьев, являющиеся

отходом процесса лесозаготовки. В них, как и в прочих морфологических компонентах древесной биомассы, содержатся ценные вещества, в том числе, смолистые и дубильные, а также фенольные соединения. Особенность корней заключается в их твердой и плотной структуре. Одревесневшие корни деревьев покрыты толстым пробковым слоем омертвевших клеток, поэтому их плотность на 5–20 % больше, чем у стволовой древесины. Это объясняется большим содержанием смолистых веществ (с разницей почти в 2 раза по сравнению со стволовой частью). В корнях наблюдается высокое содержание биологически активных соединений – сапонинов, гликозидов, алкалоидов. При этом в корнях всегда больше экстрактивных веществ, чем в стволовой части дерева. Например, количество флавоноидов (дигидрокверцетина) в корнях лиственницы превышает их содержание в ядровой древесине в 2–6 раз [32].

В работе [45] проведено исследование биологически активных веществ, полученных из корней ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). Экстракцию осуществляли последовательно этилацетатом при температуре кипения с последующим выделением смолистых компонентов гексаном, а также водой при 90 °С. Установлено, что общий выход экстрактивных веществ из корней сопоставим с таковым для древесины и составляет 1,9–2,1 % для этилацетаторастворимых и 2,0–2,5 % для водорастворимых от массы абсолютно сухого сырья. При этом содержание фенольных соединений в этилацетатных экстрактах корней более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель для древесины. Полученные авторами данные свидетельствуют о высоком фенольном потенциале корней ели и подтверждают их перспективность как дополнительного источника биологически активных лигнанов в рамках комплексной переработки древесной биомассы.

Исследования показывают, что корни, как морфологический компонент древесной биомассы, имеют высокий потенциал в качестве источника ценных веществ для фармакологии и медицины.

Наряду с корнями, определенную долю в объеме низкосортных лесосечных отходов составляет сучковая древесина. Сучки, представляющие собой морфологические узлы соединения ветвей со стволом, традиционно рассматриваются как структурные дефекты, снижающие товарную ценность деловой древесины. Но их физико-химический профиль формирует перспективу их применения в качестве объектов экстракционных технологий [46]. Исследованиями установлено высокое содержание лигнанов в сучках норвежской ели и сосны обыкновенной, которое в несколько сотен раз превышает их концентрацию в сердцевине древесины [47], а также наличие флавоноидов [48]. Лигнаны – это фитоэстрогены, которые оказывают противовоспалительное и антиоксидантное действие, замедляют процессы старения и корректируют гормональный дисбаланс в связи с возрастными изменениями [49]. Именно сучки ели норвежской являются уникальным богатым источником лигнанов [50].

Не смотря на существующий интерес со стороны исследователей до настоящего времени сучковая древесина недостаточно изучена с точки зрения эффек-

тивных способов экстрагирования и оптимизации режимных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ современного состояния вопроса экстракции биологически активных веществ из отдельных частей древесной биомассы хвойных пород позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Комплексная переработка древесной биомассы с извлечением ценных компонентов является перспективным направлением, позволяющим превращать растительные отходы в полезные компоненты и соединения, востребованные в фармацевтической, химической, косметической и других отраслях, и играющие важную роль в поддержании качества жизни общества при одновременном решении вопросов сохранения экологического баланса.

2. Анализ экстракционных технологий основных хвойных пород, составляющих лесной фонд Российской Федерации, позволил выявить как общие закономерности накопления экстрактивных веществ у хвойных пород, так и видовую специфику с учетом природных особенностей отдельных морфологических частей биомассы.

3. Анализ существующих исследований показал, что отдельные морфологические части древесной биомассы обладает уникальным физико-химическим профилем, требующим специфических подходов к переработке. При экстрагировании древесной зелени, богатой эфирными маслами, терпеноидами, витаминами и хлорофиллом, используются инструменты интенсификации для преодоления воскового барьера хвои и щадящего режима извлечения ценного эфирного масла. Для коры с высоким содержанием лигнина целесообразно применение щелочных экстрагентов, модификаторов или режимов при меняющемся давлении среды. Повышенная плотность и смолистость корней обеспечивают выход экстрактивных веществ из них в 2–6 раз выше, чем из стволовой части. Несмотря на существующий интерес со стороны исследователей, сучковая древесина и шишки недостаточно изучены с точки зрения эффективных способов экстракции целевых продуктов, но являются перспективными сырьевыми источниками для фармацевтики.

Исследования в области экстракции биологически активных веществ из хвойной биомассы носят научно-прикладной характер, а также имеют стратегическое значение для развития отечественной фармацевтической индустрии с целью обеспечения отечественной технологической независимости.

СВЕДЕНИЯ О ФИНАНСИРОВАНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение № 10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Данилов А. А. Яшалова Н. Н. Важность и необходимость статистики древесных отходов при реализации проектов циркулярной экономики в лесопромышленном комплексе // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2025. Т. 22, № 1 (139). С. 177–186.
2. Лесопромышленный комплекс. Итоги 2024 г. и январь–февраль 2025 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/216> (дата обращения: 19.02.2026).
3. Проблематика и направления повышения эффективности использования вторичных древесных ресурсов / З. А. Водождокова, С. К. Чиназирова, С. Ш. Гишева, А. Ш. Хуажева // The scientific heritage. 2020. № 54. С. 38–40.
4. Приказ Минприроды РФ от 17.01.2022 № 23 [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202150033> (дата обращения: 17.02.2026).
5. Балданова Л. П. Вопросы и решения утилизации отходов лесопромышленного производства // Региональные проблемы преобразования экономики. 2025. № 6 (176). С. 408–418.
6. Экстракция ценных компонентов из лесосечных отходов / А. В. Сафина, Н. Ф. Тимербаев, Д. Ф. Зиятдинова, Г. Р. Арсланова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 109–119.
7. Антигипоксическая активность фракций эфирного масла пихты сибирской / Д. К. Гуляев, Е. И. Яковлева, П. С. Машенко, С. Ю. Солодников, В. Д. Белогова // Химия растительного сырья. 2020. № 4. С. 273–280. DOI: 10.14258/jcprm.2020047321
8. Медведев С. О., Степень Р. А. Особенности качественных характеристик продуктов переработки древесной зелени пихты северных регионов // Химия растительного сырья. 2013. № 4. С. 233–236. DOI: 10.14258/jcprm.1304233
9. Бабкин В. А. Экстрактивные вещества древесины лиственницы: химический состав, биологическая активность, перспективы практического использования // Инноватика и экспертиза. 2017. № 2 (20). С. 210–224.
10. ООО «Научно технический центр «Химинвест» [Электронный ресурс]. URL: https://www.himinvest.icnn.ru/pdf/Katalog_produkcii_Himinvest.pdf?ysclid=mls2qwtlqt962230700 (дата обращения: 17.02.2026).
11. Фитопрепараты: анализ фармацевтического рынка Российской Федерации / Н. Н. Бойко, А. В. Бондарев, Е. Т. Жиликова, Д. И. Писарев, О. О. Новиков. URL: <https://rrmedicine.ru/journal/article/1278> (дата обращения: 18.02.2025). DOI: 10.18413/2313-8955-2017-3-4-30-38
12. Фармацевтический рынок России [Электронный ресурс]. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/farmatsevticheskiy-rynok-rossii> (дата обращения 19.02.2025).
13. Титов Е. В. Влияние местоположения на рост и состояние внутривидовых гибридов кедра сибирского в центральной лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 1. С. 31–35. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-31-35
14. Влияние экстрактивных компонентов древесной зелени ели на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной / С. К. Стеценко, Е. М. Андреева, Т. В. Хуршайнен, М. В. Ермакова // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 1. С. 120–129.
15. Исследование биоцидных свойств экстрактивных веществ древесной зелени хвойных / Т. В. Хуршайнен, Н. Н. Никонова, Я. И. Назарова, А. А. Широких, Н. Боков, И. Г. Широких, А. В. Кучин // Химия растительного сырья. 2025. № 1. С. 127–138. DOI: 10.14258/jcprm.20250115053
16. Биологическая активность эфирного масла древесной зелени сосны сибирской (*Pinus sibirica*) и его отдельных фракций с использованием тест-систем in vitro / Н. А. Полякова, В. А. Дубинская, А. А. Ефремов, Е. А. Ефремов // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2013. Т. 11, № 12. С. 4–8.
17. Рубчевская Л. П., Репях С. М. Современные направления переработки древесной зелени хвойных растений // Инновационный потенциал лесопромышленного комплекса Красноярского края. Лесосибирск : СибГТУ, 2001. С. 124–129.
18. Галяветдинов Н. Р., Воронин А. Е. Переработка древесной зелени с последующим получением полезных продуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 17(5). С. 138–140.
19. Ефремов А. А., Зыкова И. Д. Компонентный состав эфирных масел хвойных растений Сибири [Текст] : монография. Красноярск : Изд-во СФУ, 2013. 130 с. ISBN 978-5-7638-2713-2-7.
20. Солдатова С. Ю., Дубровин Г. А., Смирнов Д. А. Сравнительный анализ физико-химических показателей эфирного масла сосны обыкновенной, полученного разными методами // Бюллетень науки и практики. 2016. № 8 (9). С. 49–57.
21. Рунова Е. М., Угрюмов Б. И. Комплексная переработка зелени хвойных пород с целью получения биологически активных веществ // Химия растительного сырья. 1998. № 1. С. 57–60.
22. Повышение эффективности экстракции эфирных масел водяным паром / Р. Р. Сафин, А. Е. Воронин, Ф. В. Назипова, Л. В. Ахунова // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 8. С. 151–154.
23. Никонова Н. Н., Хуршайнен Т. В., Кучин А. В. Технология выделения низкомолекулярных компонентов древесной зелени сосны и лиственницы методом эмульсионной экстракции // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 239. С. 220–235. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.220-23
24. Совершенствование технологии и оборудования производства кедрового масла / В. Н. Невзоров, Ж. А. Кох, И. В. Мацкевич, В. Н. Холопов // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 444–449. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-444-449
25. Способ переработки древесной зелени хвойных пород: пат. № 2017782 Рос. Федерация: МПК C09F 1/00, C 11 B 1/10/ Рошин В. И., Васильев С. Н., Павлуцкая И. С., Колодынская Л. А.; заявитель и патентообладатель Рошин В. И. № 5008358/05; заявл. 22.07.1991, опубл. 15.08.1994, Бюл. № 5. 12 с.
26. Степень Р. А., Воронин В. М., Соболева С. В. Биологически активные вещества древесной зелени пихты и область их применения // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35, № 3–4. С. 120–124.

27. Ушанова В. М. Переработка древесной зелени и коры пихты сибирской с получением биологически активных продуктов // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 31, № 1–2. С. 138–142.
28. Транчук Н. В., Рощин В. И. Групповой состав экстрактов из кроны лиственницы сибирской летнего и осеннего сборов // Химия растительного сырья. 2015. № 4. С. 63–70. DOI: 10.14258/jcprm.201504684
29. Содержание экстрактивных веществ и острая токсичность экстрактов лиственницы Каяндера / С. М. Рожина, М. У. Кан, А. Н. Журавская, К. Р. Поскачин // Химия растительного сырья. 2024. № 4. С. 316–324. DOI: 10.14258/jcprm.20240413413
30. Гуляев Д. К., Машенко П. С., Белоногова В. Д., Петров Р. С. Исследование состава эфирного масла пихты сибирской шишек, острой токсичности и антирадикальной активности их водного извлечения // Медицина. 2023. № 3. С. 54–65. DOI: 10.29234/2308-9113-2023-11-3-54-65
31. Гуляев Д. К., Машенко П. С., Белоногова В. Д. Исследование эфирного масла шишек кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) // Медико-фармацевтический журнал Пульс. 2024. Т. 26, № 6. С. 177–184.
32. Определение количественного содержания экстрактивных веществ из древесины, корней и коры деревьев хвойных видов Сибири: лиственницы (*Larix sibirica* L.), сосны (*Pinus sylvestris* L.), пихты (*Abies sibirica* L.), ели (*Picea obovate* L.) и кедра (*Pinus sibirica* Du tour.) / Остроухова Л. А., Т. Е. Федорова, Н. А. Онучина, А. А. Левчук, В. А. Бабкин // Химия растительного сырья. 2018. № 4. С. 185–195. DOI: 10.14258/jcprm.2018044245.
33. Медведева Е. Н., Бабкин В. А., Остроухова Л. А. Арабиногалактан лиственницы – свойства и перспективы использования // Химия растительного сырья. 2003. № 1. С. 27–37.
34. Актуальное состояние отрасли комплексной переработки лиственницы / А. В. Сафина, Р. Г. Сафин, А. Р. Хайрутдинова, К. В. Валеев, Л. Ш. Асаева // Деревообрабатывающая промышленность. 2018. № 1. С. 83–91.
35. Способ получения дигидрокверцетина из отходов лесопереработки и лесозаготовки лиственницы: пат. № 2814536 Рос. Федерация: С07D 311/32 / Кершенгольц Б. М., Шашурин М. М., Журавская А. Н., Жуков М. А., Устинова Т. В., Кошцев В. В.; заявитель и патентообладатели Кершенгольц Б. М., Шашурин М. М., Журавская А. Н., Жуков М. А., Устинова Т. В., Кошцев. № 2023108217; заявл. 03.04.2023, опубл. 29.02.2024.
36. Способ выделения дигидрокверцетина из древесины лиственницы и установка для его осуществления: пат. № 2346941 Рос. Федерация: С07D 311/40, С07D 311/32, B01D 11/02 / Кислицын А. Н., Мальчиков Е. Л.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Элиор» Кислицын А. Н. № 2007114401/04; заявл. 20.02.2009, опубл. 20.02.2009. Бюл. № 5. 10 с.
37. Способ переработки древесины лиственницы с выделением дигидрокверцетина и устройство для его осуществления: пат. 2211836 C1 Рос. Федерация: B01J 8/00, С07D 311/40, С07D 311/32 / Кочетов А. С., Кочетов С. А. № 2002110754/04; заявл. 28.03.2002, опубл. 20.06.2003.
38. Левданский В. А., Левданский А. В., Кузнецов Б. Н. Выделение дигидрокверцетина и арабиногалактана из древесины лиственницы водно-этанольными растворами // Химия растительного сырья. 2022. № 4. С. 107–113. DOI: 10.14258/jcprm.20220411959
39. Малков Ю. А., Медведева Е. Н., Бабкин В. А. Усовершенствованная технология производства высококочистого арабиногалактана // Химия растительного сырья. 2018. № 2. С. 183–189. DOI: 10.14258/jcprm.2018023435
40. Состояние и перспективы использования древесной коры / З. Пастори, Г. А. Горбачева, В. Г. Санаев, И. Р. Мохачине, З. Борчок // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 5. С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
41. Еременко О. Н., Мишура П. В., Рязанова Т. В. Получение и обогащение экстрактов из коры хвойных // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33, № 5–6. С. 291–295.
42. Шудегова М. Д., Краснова Ю. В., Бутова С. Н. Определение оптимальных параметров экстракции веществ из коры сосны // Universum: технические науки. 2022. № 6-6 (99). С. 5–9.
43. Экстракция коры хвойных моноэтаноламином / О. Н. Еременко, Т. В. Рязанова, С. Р. Лоскутов, Е. И. Дубко // Решетневские чтения. 2017. Т. 2. С. 132–133.
44. Ионин В. А., Казаченко А. С., Елсуфьев Е. В. Переработка коры кедра сибирского (*Pinus sibirica*) с экспериментальной и математической оптимизацией выделения танинов и этанолигнинов // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2021. № 23. С. 54–66. DOI: 10.17223/24135542/23/5
45. Федорова Т. Е., Бабкин В. А. Экстрактивные вещества корней *Picea obovata* Ledeb // Химия растительного сырья. 2016. № 4. С. 165–168. DOI: 10.14258/jcprm.2016041401
46. Lignans and lipophilic extractives in Norway spruce knots and heartwood / S. M. Willför, J. Hemming, M. Reunanen, C. Eckerman, B. R. Holmbom // Holzforschung. 2003, a. 57:27–36. DOI: 10.1515/HF.2003.005
47. Phenolic and lipophilic extractives in Scots pine knots and heartwood / S. M. Willför, J. Hemming, M. Reunanen, B. Holmbom // Holzforschung. 2003, b. 57:359–372. DOI: 10.1515/HF.2003.054
48. Bioactive phenolic substances in industrially important tree species. Part 2: Knots and heartwood of fir species / S. M. Willför, L. Nisula, J. Hemming, M. Reunanen, B. R. Holmbom // Holzforschung. 2004, b. 58: 650–659. DOI: 10.1515/HF.2004.119
49. Серебренникова К. Г., Арутюнян Н. А. Влияние лигнанов на качество жизни женщин перименопаузального возраста // Гинекология. 2018. Т. 20, № 3. С. 61–65. DOI: 10.26442/2079-5696_2018.3.61-65
50. Smeds A. I., Eklund P. C., Willfor S. M. Chemical characterization of high-molar-mass fractions in a Norway spruce knotwood ethanol extract // Phytochemistry. 2016. 130: 207–17. DOI: 10.1016/j.phytochem.2016.05.006

REFERENCES

1. Danilov A. A., Yashalova N. N. Vazhnost' i neobkhodimost' statistiki drevesnykh otkhodov pri realizatsii projektov tsirkulyarnoy ekonomiki v lesopromyshlennom

komplekse // Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova. 2025. T. 22. № 1 (139). S. 177–186.

2. Lesopromyshlennyy kompleks. Itogi 2024 g. i yanvar'-fevral' 2025 g. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/216> (data obrashcheniya: 19.02.2026).

3. Problematika i napravleniya povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya vtorichnykh drevesnykh resursov / Z. A. Vodozhdokova, S. K. Chinazirova, S. Sh. Gisheva, A. Sh. Khuzhaeva // The scientific heritage. 2020. № 54. S. 38–40.

4. Prikaz Minprirody RF ot 17.01.2022 № 23 [Elektronnyy resurs]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202150033> (data obrashcheniya: 17.02.2026).

5. Baldanova L. P. Voprosy i resheniya utilizatsii otkhodov lesopromyshlennogo proizvodstva // Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki. 2025. № 6 (176). S. 408–418.

6. Ekstraktsiya tsennykh komponentov iz lesosechnykh otkhodov / A. V. Safina, N. F. Timerbaev, D. F. Ziatdinova, G. R. Arslanova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2018. № 1 (361). S. 109–119.

7. Antigipoksicheskaya aktivnost' fraktsiy efirnogo masla pikhty sibirskoy / D. K. Gulyaev, E. I. Yakovleva, P. S. Mashchenko, S. Yu. Solodnikov, V. D. Belonogova // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2020. № 4. S. 273–280. DOI: 10.14258/jcprm.2020047321

8. Medvedev S. O., Stepen' R. A. Osobennosti kachestvennykh kharakteristik produktov pererabotki drevesnoy zeleni pikhty severnykh regionov // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2013. № 4. S. 233–236. DOI: 10.14258/jcprm.1304233

9. Babkin V. A. Ekstraktivnye veshchestva drevesiny listvennitsy: khimicheskyy sostav, biologicheskaya aktivnost', perspektivy prakticheskogo ispol'zovaniya // Innovatika i ekspertiza. 2017. № 2 (20). S. 210–224.

10. ООО «Nauchno tekhnicheskyy tsentr «Khinninvest» [Elektronnyy resurs]. URL: https://www.himinvest.icnn.ru/pdf/Katalog_produkcii_Himinvest.pdf?ysclid=mls2qwt1qt962230700 (data obrashcheniya: 17.02.2026).

11. Fitopreparaty: analiz farmatsevticheskogo rynka Rossiyskoy Federatsii [Elektronnyy resurs] / N. N. Boyko, A. V. Bondarev, E. T. Zhilyakova, D. I. Pisarev, O. O. Novikov. URL: <https://rmedicine.ru/journal/article/1278> (data obrashcheniya: 18.02.2025).

12. Farmatsevticheskyy rynek Rossii [Elektronnyy resurs]. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/farmatsevticheskyy-rynek-rossii> (data obrashcheniya: 19.02.2025).

13. Titov E. V. Vliyanie mestopolozheniya na rost i sostoyanie vnutrividovykh gibridov kedra sibirskogo v tsentral'noy lesostepi // Khvoynye boreal'noy zony. 2024. T. 42. № 1. S. 31–35. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-31-35

14. Stetsenko S. K., Andreeva E. M., Khurshkaynen T. V., Ermakova M. V. Vliyanie ekstraktivnykh komponentov drevesnoy zeleni eli na rost i razvitie seyantsev sosny obyknovennoy // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2025. № 1. S. 120–129.

15. Issledovanie biotsidnykh svoystv ekstraktivnykh veshchestv drevesnoy zeleni khvoynykh / T. V. Khursh-

kaynen, N. N. Nikonova, Ya. I. Nazarova, A. A. Shirokikh, N. Bokov, I. G. Shirokikh, A. V. Kuchin // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2025. № 1. S. 127–138. DOI: 10.14258/jcprm.20250115053

16. Biologicheskaya aktivnost' efirnogo masla drevesnoy zeleni sosny sibirskoy (Pinus sibirica) i ego otdel'nykh fraktsiy s ispol'zovaniem test-sistem in vitro / N. A. Polyakov, V. A. Dubinskaya, A. A. Efremov, E. A. Efremov // Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii. 2013. T. 11, № 12. S. 4–8.

17. Rubchevskaya L. P., Repyakh S. M. Sovremennye napravleniya pererabotki drevesnoy zeleni khvoynykh rasteniy // Innovatsionnyy potentsial lesopromyshlennogo kompleksa Krasnoyarskogo kraya. Lesosibirsk : SibGTU, 2001. S. 124–129.

18. Galyavetdinov N. R., Voronin A. E. Pererabotka drevesnoy zeleni s posleduyushchim polucheniem poleznykh produktov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. № 17(5). S. 138–140.

19. Efremov A. A. Komponentnyy sostav efirnykh masel khvoynykh rasteniy Sibiri [Tekst]: monografiya / Krasnoyarsk : Izd-vo SFU, 2013. 130 s. ISBN 978-5-7638-2713-2-7.

20. Soldatova S. Yu., Dubrovin G. A., Smirnov D. A. Sravnitel'nyy analiz fiziko-khimicheskikh pokazateley efirnogo masla sosny obyknovennoy, poluchennogo raznymi metodami // Byulleten' nauki i praktiki. 2016. № 8 (9). S. 49–57.

21. Runova E. M., Ugryumov B. I. Kompleksnaya pererabotka zeleni khvoynykh porod s tsel'yu polucheniya biologicheskii aktivnykh veshchestv // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 1998. № 1. S. 57–60.

22. Povyshenie effektivnosti ekstraktsii efirnykh masel vodyanym parom / R. R. Safin, A. E. Voronin, F. V. Nazipova, L. V. Akhunova // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2015. T. 18, № 8. S. 151–154.

23. Nikonova N. N., Khurshkaynen T. V., Kuchin A. V. Tekhnologiya vydeleniya nizkomolekulyarnykh komponentov drevesnoy zeleni sosny i listvennitsy metodom emul'sionnoy ekstraktsii // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2022. № 239. S. 220–235. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.220-235

24. Nevzorov V. N., Kokh Zh. A., Matskevich I. V., Kholopov V. N. Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya proizvodstva kedrovogo masla // Khvoynye boreal'noy zony. 2022. T. 40, № 5. S. 444–449. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-444-449

25. Sposob pererabotki drevesnoy zeleni khvoynykh porod: pat. № 2017782 Ros. Federatsiya: MPK C09F 1/00, C 11 B 1/10 / Roshchin V. I., Vasil'ev S. N., Pavlutsкая I. S., Kolodinskaya L. A.; zayavitel' i patentoobladatel' Roshchin V. I. № 5008358/05; zayavl. 22.07.1991, opubl. 15.08.1994, Byul. № 5. 12 s.

26. Stepen' R. A., Voronin V. M., Soboleva S. V. Biologicheskii aktivnye veshchestva drevesnoy zeleni pikhty i oblast' ikh primeneniya // Khvoynye boreal'noy zony. 2017. T. 35, № 3–4. S. 120–124.

27. Ushanova V. M. Pererabotka drevesnoy zeleni i kory pikhty sibirskoy s polucheniem biologicheskii aktivnykh produktov // Khvoynye boreal'noy zony. 2013. T. 31, № 1–2. S. 138–142.

28. Tranchuk N. V., Roshchin V. I. Gruppovoy sostav ekstraktov iz krony listvennitsy sibirskoy letnego i

osennego sborov // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2015. № 4. S. 63–70. DOI: 10.14258/jcprm.201504684.

29. Soderzhanie ekstraktivnykh veshchestv i ostraya toksichnost' ekstraktov listvennitsy Kayandera / S. M. Rozhina, M. U. Kan, A. N. Zhuravskaya, K. R. Poskachin // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2024. № 4. S. 316–324. DOI: 10.14258/jcprm.20240413413

30. Issledovanie sostava efirnogo masla pikhty sibirskoy shishek, ostroy toksichnosti i antiradikal'noy aktivnosti ikh vodnogo izvlecheniya / D. K. Gulyaev, P. S. Mashchenko, V. D. Belonogova, R. S. Petrov // Meditsina. 2023. № 3. S. 54–65. DOI: 10.29234/2308-9113-2023-11-3-54-65

31. Gulyaev D. K., Mashchenko P. S., Belonogova V. D. Issledovanie efirnogo masla shishek kedrovogo stlanika (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) // Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal Pul's. 2024. T. 26. № 6. S. 177–184.

32. Opredelenie kolichestvennogo soderzhaniya ekstraktivnykh veshchestv iz drevesiny, korney i kory derev'ev khvoynykh vidov Sibiri: listvennitsy (*Larix sibirica* L.), sosny (*Pinus sylvestris* L.), pikhty (*Abies sibirica* L.), eli (*Picea obovate* L.) i kedra (*Pinus sibirica* Du tour.) / L. A. Ostroukhova, T. E. Fedorova, N. A. Onuchina, A. A. Levchuk, V. A. Babkin // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2018. № 4. S. 185–195. DOI: 10.14258/jcprm.2018044245

33. Medvedeva E. N., Babkin V. A., Ostroukhova L. A. Arabinogalaktan listvennitsy – svoystva i perspektivy ispol'zovaniya // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2003. № 1. S. 27–37.

34. Aktual'noe sostoyanie otrasli kompleksnoy pererabotki listvennitsy / A. V. Safina, R. G. Safin, A. R. Khayrutdinova, K. V. Valeev, L. Sh. Asaeva // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. 2018. № 1. S. 83–91.

35. Sposob polucheniya digidrokvertsetina iz otkhodov lesopererabotki i lesozagotovki listvennitsy: pat. № 2814536 Ros. Federatsiya: C07D 311/32 / Kershengol'ts B. M., Shashurin M. M., Zhuravskaya A. N., Zhukov M. A., Ustinova T. V., Koptsev V. V.; zayavitel' i patentoobladatel' Kershengol'ts B. M., Shashurin M. M., Zhuravskaya A. N., Zhukov M. A., Ustinova T. V., Koptsev V. V. № 2023108217; zayavl. 03.04.2023, opubl. 29.02.2024.

36. Sposob vydeleniya digidrokvertsetina iz drevesiny listvennitsy i ustanovka dlya ego osushchestvleniya: pat. № 2346941 Ros. Federatsiya: C07D 311/40, C07D 311/32, B01D 11/02 / Kislitsyn A. N., Mal'chikov E. L.; zayavitel' i patentoobladatel' Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Elior» Kislitsyn A. N. № 200711 4401/04; zayavl. 20.02.2009, opubl. 20.02.2009. Byul. № 5. 10 s.

37. Sposob pererabotki drevesiny listvennitsy s vydeleniem digidrokvertsetina i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya: pat. 2211836 C1 Ros. Federatsiya: B01J 8/00, C07D 311/40, C07D 311/32 / Kochetov A. S., Kochetov S. A. № 2002110754/04; zayavl. 28.03.2002, opubl. 20.06.2003.

38. Levdanskiy V. A., Levdanskiy A. V., Kuznetsov B. N. Vydelenie digidrokvertsetina i arabinogalaktana

iz drevesiny listvennitsy vodno-etanol'nymi rastvorami // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2022. № 4. S. 107–113. DOI: 10.14258/jcprm.20220411959

39. Malkov Yu. A., Medvedev E. N., Babkin V. A. Usovershenstvovannaya tekhnologiya proizvodstva vysokochistogo arabinogalaktana // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2018. № 2. S. 183–189. DOI: 10.14258/jcprm.2018023435

40. Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya drevesnoy kory / Z. Pastori, G. A. Gorbacheva, V. G. Sanaev, I. R. Mokhachine, Z. Borchok // Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin. 2020. T. 24. № 5. S. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88

41. Eremenko O. N., Mishura P. V., Ryazanova T. V. Poluchenie i oblagorazhivanie ekstraktov iz kory khvoynykh // Khvoynye boreal'noy zony. 2015. T. 33, № 5–6. S. 291–295.

42. Shudegova M. D., Krasnova Yu. V., Butova S. N. Opredeleniye optimal'nykh parametrov ekstraksii veshchestv iz kory sosny // Universum: tekhnicheskiye nauki. 2022. № 6-6 (99). S. 5–9.

43. Ekstraktsiya kory khvoynykh monoetanolinom / O. N. Yermenko, T. V. Ryazanova, S. R. Loskutov, Ye. I. Dubko // Reshetnevskiy chteniya. 2017. T. 2. S. 132–133.

44. Ionin V. A., Kazachenko A. S., Yelsuf'yev Ye. V. Pererabotka kory kedra sibirskogo (*Pinus sibirica*) s eksperimental'noy i matematicheskoy optimizatsiyey vydeleniya taninov i etanolligninov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. 2021. № 23. S. 54–66. DOI: 10.17223/24135542/23/5

45. Fedorova T. Ye., Babkin V. A. Ekstraktivnyye veshchestva korney *Picea obovata* Ledeb // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2016. № 4. S. 165–168. DOI: 10.14258/jcprm.2016041401

46. Lignans and lipophilic extractives in Norway spruce knots and heartwood / S. M. Willför, J. Hemming, M. Reunanen, C. Eckerman, B. R. Holmbom // Holzforschung. 2003, a. 57:27–36. DOI: 10.1515/HF.2003.005.

47. Phenolic and lipophilic extractives in Scots pine knots and heartwood / S. M. Willför, J. Hemming, M. Reunanen, B. Holmbom // Holzforschung. 2003, b. 57:359–372. DOI: 10.1515/HF.2003.054

48. Bioactive phenolic substances in industrially important tree species. Part 2: Knots and heartwood of fir species / S. M. Willför, L. Nisula, J. Hemming, M. Reunanen, B. R. Holmbom // Holzforschung. 2004, b. 58:650–659. DOI: 10.1515/HF.2004.119

49. Serebrennikova K. G., Arutyunyan N. A. Vliyaniye lignanov na kachestvo zhizni zhenshchin perimenopauzal'nogo vozrasta // Ginekologiya. 2018. T. 20, № 3. S. 61–65. DOI: 10.26442/2079-5696_2018.3.61-65

50. Smeds A. I., Eklund P. C., Willför S. M. Chemical characterization of high-molar-mass fractions in a Norway spruce knotwood ethanol extract // Phytochemistry. 2016. 130: 207–17. DOI: 10.1016/j.phytochem.2016.05.006

© Сафина А. В., Байгильдеева Е. И., 2026

ОЦЕНКА АРХИТЕКТониКИ И биОмАССЫ КОРНЕЙ ДЕРЕВЬЕВ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРА (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

В. А. Усольцев¹, Н. И. Плюха^{1,2}

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

²Ботанический сад Уральского отделения РАН
Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а
E-mail: ¹Usoltsev50@mail.ru, ^{1,2}nikcskript@mail.ru

Аннотация. Леса являются важным поставщиком экологических услуг для смягчения последствий изменения климата. Оценка распределения их биомассы на планете важна для определения масштабов связывания углерода, моделирования биогеохимических циклов и понимания последствий антропогенной деятельности. Подземная биомасса составляет 40 % от общей биомассы планеты и оценивается примерно в 230 Гт в углеродном эквиваленте. Архитектура корней облегчает адаптацию растений к стрессовым условиям окружающей среды и поддерживает экологические функции посредством морфологической дифференциации и стратегий динамического роста. Оценка биомассы скелетных корней как важного элемента углеродного баланса экосистемы, показала положительную корреляцию с повышенной концентрацией CO₂, и это означает, что точная количественная оценка биомассы скелетных корней имеет решающее значение для прогнозирования влияния будущего изменения климата на глобальную динамику выбросов углерода. Однако существующие приемы раскопок корней трудоемки и деструктивны в отношении корней и почв. В последние десятилетия были разработаны методы неразрушающего анализа скелетных корней посредством георадарной радиолокации. В предлагаемом обзоре анализируются методы оценки архитектуры корневых систем, диаметра корней и их биомассы с помощью георадара. Показано, что с помощью георадара можно оценивать архитектуру и биомассу скелетных корней деревьев с достаточной точностью и с несопоставимо меньшими затратами времени и труда по сравнению с традиционной раскопкой. Однако метод георадара имеет существенный недостаток, который состоит в невозможности оценки биомассы тонких корней, а также в занижении биомассы корней деревьев, произрастающих на влажных почвах, и корней, проникающих на глубину более 50–60 см.

Ключевые слова: корневые системы, метод георадара, архитектура корневых систем, размеры и биомасса корней.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 34–70

ESTIMATING THE ARCHITECTURE AND BIOMASS OF TREE ROOTS USING GROUND-PENETRATING RADAR (REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)

V. A. Usoltsev¹, N. I. Plyukha^{1,2}

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

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

202a, 8 Marta str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation
E-mail: ¹Usoltsev50@mail.ru, ^{1,2}nikcskript@mail.ru,

Abstract. Forests are an important provider of environmental services to mitigate the effects of climate change. Estimating the distribution of their biomass on the planet is important for determining the extent of carbon sequestration, for modeling biogeochemical cycles, and for understanding the effects of anthropogenic activities. Underground biomass accounts for 40 % of the total biomass of the planet and is estimated at about 230 Gt in carbon equivalent. Root architectonics facilitates plant adaptation to stressful environmental conditions and supports ecological functions through morphological differentiation and dynamic growth strategies. The assessment of skeletal root biomass as an important element of the ecosystem's carbon balance has shown a positive correlation with increased CO₂ concentrations, which means that accurate quantification of skeletal root biomass is crucial for predicting the impact of future climate change on global carbon emissions. However, the existing methods of root excavation are laborious and destructive in relation to roots and soils. In recent decades, methods of non-destructive analysis of large roots have been developed using GPR radar. The proposed review analyzes methods for assessing the architectonics of root

systems, root diameter, and their biomass using ground-penetrating radar. It is shown that using GPR, it is possible to evaluate the architectonics and biomass of skeletal tree roots with sufficient accuracy and with incomparably less time and labor compared with traditional excavation. However, the GPR radar method has a significant drawback, which consists in the impossibility of estimating the biomass of thin roots, as well as underestimating the biomass of tree roots growing on moist soils and roots penetrating to a depth of more than 50–60 cm.

Keywords: *root systems, ground-penetrating radar method, architectonics of root systems, root sizes and biomass.*

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия антропогенная деятельность привела к ряду климатических изменений с увеличением выбросов парниковых газов [23]. Увеличение концентрации парниковых газов было в центре внимания ряда международных конференций и конвенций, таких как Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата 1992 года, Киотский протокол 1997 года, программа REDD++ 2009 года, МГЭИК 2014 года, Парижское соглашение 2015 года и другие. Основная цель заключается в поиске стратегий сокращения выбросов парниковых газов в атмосфере. Это обусловило потребность в знаниях о способности растительных экосистем улавливать углерод из атмосферы и фиксировать его в своей биомассе [82].

В этом контексте леса являются важным поставщиком экологических услуг для смягчения последствий изменения климата. Углерод, удерживаемый в резервуарах живой биомассы (надземной и подземной) лесов, может составлять от 70 до 95 % поглощенного CO_2 в процессе их время роста, а остальное количество приходится на подстилку, сухостой и почвенный углерод. Оценка распределения биомассы на планете важна для определения масштабов связывания углерода, моделирования биогеохимических циклов и понимания последствий антропогенной деятельности. Подземная биомасса составляет 40 % от общей биомассы планеты и оценивается в 230 Гт С [10].

Архитектоника (архитектура) корневой системы (АКС) дает представление о пространственной конфигурации корней и их развитии в трехмерном пространстве [43]. Она облегчает адаптацию растений к стрессовым условиям окружающей среды и поддерживает экологические функции посредством морфологической дифференциации и ростовых стратегий [72; 98]. Ключевые функции АКС включают закрепление растений для устойчивого роста и противодействия ветру, поглощение воды и питательных веществ для их функционирования, распределение подземной биомассы и оптимизацию структуры почвы для улучшения удержания влаги и проникновения осадков [4; 102; 108]. Являясь важнейшим фактором, определяющим экологические функции растений и их адаптируемость к окружающей среде [63; 65; 84], АКС значительно повышает стабильность, устойчивое развитие и биоразнообразие лесных экосистем, улучшая связывание углерода в почве и регулируя микробную гетерогенность [42; 99; 111].

Из-за различий в морфологии и функциях при изучении корней обычно различают тонкие и скелетные (крупные) корни [77]. Как правило, скелетные корни произвольно определяются как корни диаметром не менее 2 мм [79]. Выполняемые скелетными корнями

функции устанавливают требования к их размеру и структуре [17; 54; 79; 80], что определяет важной задачей оценку их пространственной конфигурации [47]. Скелетные корни также играют важную экологическую роль. Их круговорот вносит углерод и питательные вещества в почву и почвенную биоту, влияя на долгосрочную продуктивность экосистем и выбросы CO_2 [79]. Известно, что в контексте глобальных изменений повышенная концентрация CO_2 и температура в сочетании с быстрыми и ускоряющимися изменениями в землепользовании и характере выпадения осадков оказывают воздействие на устойчивость экосистем [18]. Оценка биомассы скелетных корней как важнейшего элемента углеродного баланса экосистемы [73] показала положительную корреляцию с повышенной концентрацией CO_2 [94]. Таким образом, точная количественная оценка скелетной корневой биомассы имеет решающее значение для прогнозирования влияния будущего изменения климата на глобальную динамику выбросов углерода [17].

Однако 3D-реконструкцию и визуализацию АКС растений, а также определение их биомассы трудно осуществлять непосредственно [24; 41]. Традиционно крупные корни исследуются с помощью разрушающих методов, которые являются прямыми, но трудоемкими и отнимают много времени [80]. Кроме того, эти разрушающие методы нарушают среду ризосферы и разрушают корневую систему, что делает невозможными повторные измерения [35; 45; 81]. В целом, количественная оценка запасов углерода в подземной сфере насаждений является сложной задачей, сопряженной с высоким уровнем неопределенности [78]. Альтернативой деструктивному методу может быть косвенный метод, использующий аллометрические уравнения для оценки биомассы корней. Однако в литературе редко встречаются публикации, когда аллометрические модели корректировались бы для оценки биомассы корней в конкретных естественных условиях [55; 56].

В последние десятилетия были разработаны методы неразрушающего анализа крупных корней, включая маркировку радиоизотопами и стабильными изотопами, определение сокодвигания в ксилеме (sap flow approaches) и методы геофизической визуализации (например, томография электрического сопротивления, сейсмическая рефракционная томография и георадарная радиолокация [22; 24; 25; 51; 59; 68; 110]). Неразрушающие методы позволяют проводить непрерывное и долгосрочное наблюдение за крупными корнями с минимальными нарушениями. Сочетание крупномасштабных неразрушающих наблюдений с маломасштабными разрушающими методами (что обеспечивает валидацию и калибровку результатов неразрушающих наблюдений) демонстрирует суще-

ственный потенциал для полевого мониторинга крупных корней [47].

Каждый метод имеет свою область применения, среди которых георадар предоставляет основную геофизическую технологию для неразрушающего обнаружения крупных корней диаметром более 2–5 мм. Георадар, как геофизический метод зондирования ризосферы, стал многообещающей альтернативой косвенным методам после того, как был успешно применен для получения изображений подземной биомассы [51].

Георадар обладает преимуществами в эффективности, скорости, повторяемости и возможности проведения крупномасштабных исследований [50; 103]. Принцип работы георадара заключается в передаче высокочастотных электромагнитных импульсов (106–109 Гц) в почвогрунт и приеме их отражений, характеризующих некоторые параметры и пространственное распределение корневой системы [105]. Георадарные волны более высокой частоты обеспечивают более высокое разрешение корней, но и более быстрое ослабление сигнала и, следовательно, не проникают так глубоко в почвогрунт, как волны более низкой частоты. Отражения волн возникают из-за различий в диэлектрической проницаемости между объектами и почвой [39]. Ключевыми параметрами измерения являются время прохождения в обоих направлениях и амплитуда отраженной энергии. Любое отражение, вызванное изменением скорости электромагнитной волны из-за изменения диэлектрической проницаемости, будет отображаться в виде гиперболы из-за конической природы электромагнитного луча, вершина которого указывает на фактическое местоположение погребенного объекта [26]. В дополнение к местоположению объекта оценивается также его размер и ориентация, а также содержание воды, поскольку различие в содержании воды в гетерогенной среде является основным фактором изменения диэлектрических постоянных между объектами [11].

По схеме сетки трансект выполняют тысячи измерений в пределах фиксированной исследуемой области, которая может быть обработана и преобразована либо в двумерные (2D) изображения вертикального сечения почвогрунта, либо в трехмерную (3D) томограмму исследуемой области [5]. Повторные измерения исследуемой площади дают возможность неразрушающего наблюдения за корнями во времени, позволяя количественно оценить рост корней [11; 39].

Технический прогресс, приведший за последнее десятилетие к разработке высокочастотных антенн, сыграл ключевую роль в расширении возможностей георадара для обнаружения корней [11]. Эти достижения позволяют использовать низкочастотные антенны для крупномасштабных исследований (км), в то время как высокочастотные антенны могут применяться для мелкомасштабных исследований (см), где необходима более высокая точность [11]. По-прежнему существуют области применения георадара для зондирования скелетных корней, которые требуют дополнительного изучения, в частности, для согласования частоты антенны с желаемой точностью результата [9].

Текущие исследования крупных корней с использованием георадара в основном сосредоточены на их обнаружении [70; 71], оценке характерных параметров [14; 66], количественном определении биомассы [2; 83], а также на пространственном распределении и мониторинге состояния [60; 114]. Хотя эти исследования успешно характеризовали определенные аспекты и функции архитектуры и биомассы корней, всестороннее представление биофизических характеристик корней требует более полной реконструкции его пространственной структуры [41].

Перечень методов и результатов оценки архитектуры и биомассы корневых систем с помощью георадара можно было продолжить, поскольку в литературе они исчисляются сотнями. Но в рамках журнальной статьи практически нет возможности какого-либо их синтеза. Поэтому в нашем дальнейшем изложении основное внимание уделено описанию лишь некоторых наиболее продвинутых алгоритмов оценки архитектуры и биомассы корневых систем с помощью георадара.

ОЦЕНКА АРХИТЕКТУРИКИ КОРНЕВЫХ СИСТЕМ (АКС) НА ОСНОВЕ ГЕОРАДАРНЫХ ИНДЕКСОВ (В-СКАНИРОВАНИЕ)

Георадар как неразрушающий геофизический метод, широко применяется для обнаружения и картирования крупных корней [20; 51], однако в разных исследованиях сообщалось о противоречивых выводах [12; 29; 36; 49], и были признаны некоторые ограничения георадарного обнаружения крупных корней [20; 49]. Тем не менее, применение георадара для количественной оценки крупных корней продемонстрировало перспективный потенциал в оценке их параметров [13; 36; 94]. Для разработки стандартных протоколов в различных условиях необходим всесторонний анализ опубликованных работ по обнаружению скелетных корней и оценке их архитектуры с помощью георадара [47].

Подобный анализ был выполнен [47], и он имел две цели:

- 1) провести обзор современных знаний об измерении скелетных корней с использованием георадара, включая основные методы постобработки с выявлением основных факторов, влияющих на надежность и точность регистрации скелетных корней с помощью георадара;

- 2) обсудить текущие проблемы и возможные решения обнаружения скелетных корней с помощью георадара, а также некоторые перспективы на будущее [47].

Как уже отмечалось выше, принцип работы георадара основан на электромагнитном методе обнаружения изменений физических свойств (в частности, относительной диэлектрической проницаемости) в структуре поверхностных слоев ризосферы [27; 34]. Стандартная георадарная система состоит из трех основных компонентов: блока управления (включая генератор импульсов, компьютер и соответствующее программное обеспечение), антенного блока (включая спаренные передающую и приемную антенны) и дисплейного блока [26] (рис. 1, а). Во процессе георадарного зондирования высокочастотная электромагнитная энергия

(состоящая из соединенных осциллирующих электрических и магнитных полей), генерируемая передающей антенной, распространяется в землю в виде волн [47].

Когда радиолокационные волны проходят через границы раздела сред с различными электрическими или магнитными свойствами, возникают отражения (рис. 1, а) [3]. При этом часть энергии возвращается обратно к поверхности и регистрируется приемной антенной, в то время как остальная часть продолжает распространяться вглубь до тех пор, пока полностью не угаснет [12]. После отбора (sampling) и оцифровки блоком управления отраженные волны объединяются в трассу отражения (reflection trace) (также называемую А-сканированием), которая фиксирует время прохождения в обоих направлениях (т. е. время, прошедшее между излучением и обнаружением отраженного сигнала) на вертикальной оси, а также амплитуды отраженных сигналов и их поляризации вдоль горизонтальной оси (рис. 1, б) [12; 51].

Глубина расположения объекта или границы раздела сред, вызывающей радарные отражения, может быть определена, если известна скорость распространения волны (V) [34]:

$$D = \frac{V \cdot t}{2}, \quad (1)$$

где D – глубина проникновения; t – время прохождения волны в обоих направлениях. Скорость волны может быть получена из следующего уравнения [69]:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}}, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость; σ – электропроводность; ϵ – диэлектрическая проницаемость и ω – угловая частота (т. е. $\omega = 2\pi f$, где f – частота) излучаемого импульса. Для материалов с низкой проводимостью и немагнитных материалов (т. е. $\sigma < \omega\epsilon$ и $\mu_r = 1$, где μ_r –

относительная магнитная проницаемость) скорость распространения может быть оценена по формуле [3]:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме (0,2998 м в наносекунду); ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость. Энергия отражения на границе раздела двух сред зависит от коэффициента отражения R [3; 26]:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{V_2 - V_1}{V_1 + V_2}, \quad (4)$$

где ϵ_{r1} – относительная диэлектрическая проницаемость вышележащей среды; ϵ_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость нижележащей среды; V_1 – скорость распространения в вышележащей среде; V_2 – скорость распространения в нижележащей среде. Интенсивность отраженной энергии определяет относительный контраст диэлектрической проницаемости между соседними средами [27]. Содержание воды в корнях, более высокое чем в почвенной матрице, может обеспечить необходимый контраст диэлектрической проницаемости, что и делает возможным обнаружение корней с помощью георадара [29; 104].

При перемещении радарного устройства вдоль линии зондирования через определенный интервал времени или интервал расстояний генерируются электромагнитные импульсы, и может быть записано поперечное сечение отраженных сигналов (рис. 1, в). Следы могут быть интегрированы в радарограмму, которая отображает характер погребенных материалов в вертикальном масштабе с указанием времени прохождения сигнала в обе стороны по вертикальной оси и местоположения на поверхности по горизонтальной оси (рис. 1, в) [12; 20].

Передающая антенна георадара генерирует энергию в виде луча, который направляется вниз, образуя эллиптический конус (рис. 2, а) [8; 26].

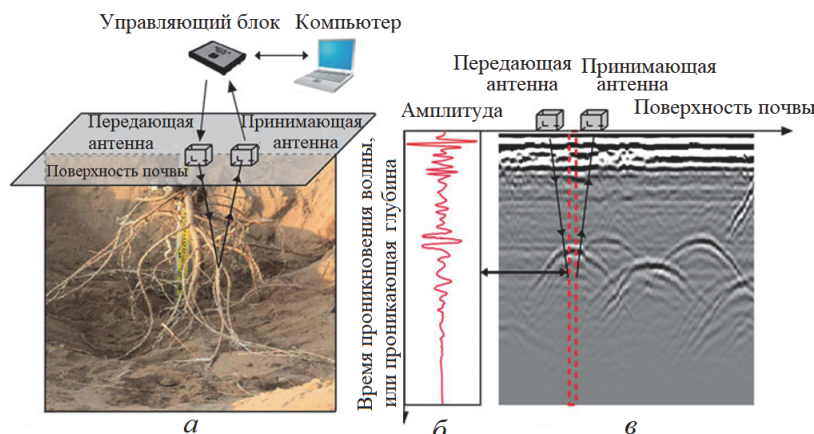


Рис. 1. Схематическая иллюстрация георадарного обнаружения корней караганы мелколистной (*Caragana microphylla* Lam.) в песчаной местности во Внутренней Монголии, Китай:

а – высокочастотные электромагнитные импульсы, излучаемые передающей антенной, отражаются от границы между почвой и корнями и затем принимаются приемной антенной. Время и уровень сигнала регистрируются блоком управления; *б* – форма отраженного сигнала (*А* – развертка) георадарной радиограммы, на которой отображается время прохождения в обоих направлениях (т. е. глубина проникновения) по вертикальной оси и амплитуды обратных сигналов по горизонтальной оси; *в* – необработанная радарограмма (*В* – сканирование), соответствующая рис. 1, *а*, с отражениями гиперболической формы, представляющими корневые отражения [47]

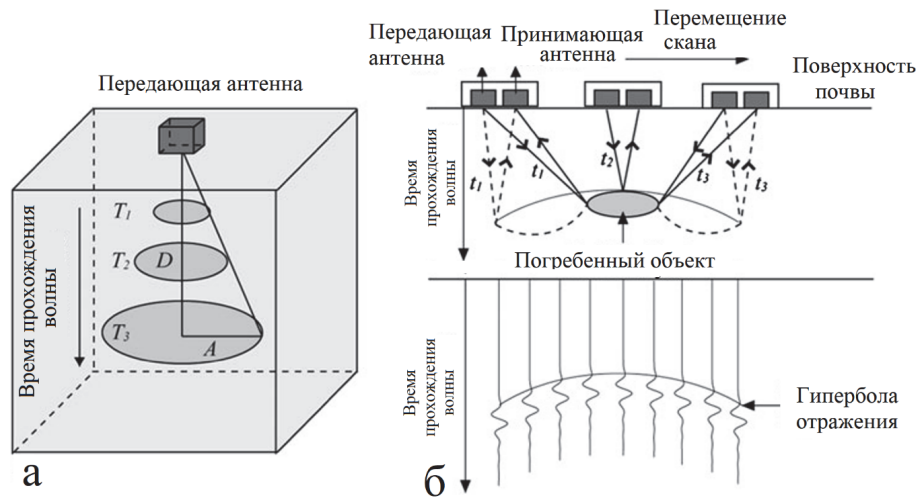


Рис. 2. Схематическая иллюстрация конической диаграммы направленности георадарных волн и генерации отражающей гиперболы:

a – распространяющийся след волны от антенны с увеличением времени прохождения. T_1 , T_2 и T_3 – это увеличение времени проникновения; D – глубина проникновения; A – большой размер радиуса следа; *б* – *Вверху*: коническое излучение радара позволяет отражать его сигнал от скрытого объекта до и после того, как антенны окажутся непосредственно над ним. Время прохождения в обоих направлениях (t_1 , t_2 и t_3) регистрируется и наносится на график непосредственно под антеннами; *б* – *Внизу*: различные А-сканы вдоль направления движения антенн, показывающие гиперболу отражения (гиперболу дифрагированной волны) [47]

С увеличением глубины проникновения радиус конуса также возрастает, что приводит к увеличению площади поверхности, просматриваемой под антенной [26]. Площадь поверхности может быть приблизительно определена по формуле [27]:

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}, \quad (5)$$

где A – большой размер радиуса следа; λ – длина волны центральной частоты излучения радара; D – расстояние от поверхности земли до отражающей поверхности; ϵ_r – средняя относительная диэлектрическая проницаемость сканируемого материала от поверхности земли до глубины отражателя D . Разрешение георадара, способность различать две близко расположенные цели, а также минимальный обнаруживаемый размер отрицательно коррелируют с площадью следа [20]. Минимальный обнаруживаемый размер объекта обычно меньше различаемого минимального расстояния между соседними объектами. Для георадарной системы с частотой антенного блока 900 МГц диаметр самого мелкого обнаруживаемого корня составляет 1,9 см, в то время как наименьший обнаруживаемый интервал между близко расположенными корнями составляет от 10 до 20 см [49]. Как правило, площадь поперечного сечения намечаемого объекта должна быть приблизительно равна площади следа. Таким образом, в соответствии с уравнением (5) разрешение георадарного обнаружения зависит от частоты антенного блока, электромагнитных свойств среды и глубины проникновения волны [26]. Общий диапазон минимального обнаруживаемого размера корня варьировал от 1 до 4 см, от 1 до 2,5 см и от 0,25 до 0,5 см для центральных частот антенного блока в диапазонах соответственно 400 и 500 МГц, 800 и 1000 МГц, 1500 и 2000 МГц [47].

Из-за конической формы диаграммы направленности георадарных волн энергия радара от небольших объектов (таких как поперечное сечение корней) будет отражаться по мере перемещения антенны непосредственно над ними [20; 26]. По мере приближения антенны к погребенному объекту регистрируемое время прохождения в обоих направлениях уменьшается до тех пор, пока антенна не окажется непосредственно над ним. Когда антенна удаляется от объекта, то же самое явление повторяется в обратном порядке, формируя гиперболу отраженной волны, вершина которой указывает на фактическое местоположение скрытого объекта (рис. 2, б) [26]. Однако четкие гиперболы отражения генерируются только от небольших точечных или линейных объектов, которые пересекаются под прямым углом к направлению движения антенны [12; 20]. Когда углы пересечения составляют менее 45°, линейный погребенный объект генерирует на радарограммах удлиненные линейные отражения [12; 20].

При проникновении через среду энергия радара со временем экспоненциально снижается [74]:

$$A(f, t) \propto \exp(-V\alpha t), \quad (6)$$

где $A(f, t)$ – значение амплитуды за время прохождения в обоих направлениях t с центральной частотой антенного блока f ; V – скорость волны; α – коэффициент затухания (который зависит от частоты). Таким образом, по мере того, как передаваемая энергия проникает все глубже в грунт, она становится менее доступной для отражения от последовательных границ раздела сред. В целом, георадар предназначен в первую очередь для исследования небольших глубин и неглубоко погребенных целей, когда к приемной антенне может поступать достаточное количество отраженной энергии радара [26].

Несмотря на то, что В-сканирование является основным продуктом георадарного обнаружения, диаграмму В-сканирования сложно использовать для получения реалистичного изображения объекта съемки. Последние достижения в области обработки георадарных данных и программного обеспечения их визуализации облегчили создание трехмерных псевдоизображений (также называемых С-сканирований) ризосферы путем интерполяции нескольких двумерных радарограмм [53]. Благодаря использованию цвета в качестве четвертого измерения, становятся возможными различные способы изображения погребенных объектов, обнаруживаемых с помощью георадара.

Важным этапом в интерпретации георадарных данных является обработка сигнала, необходимая как в ходе, так и после георадарного сканирования. Во время сканирования методы обработки сигналов и соответствующие параметры должны быть оптимизированы в соответствии с конкретными условиями объекта исследования. Некоторые исследования посвящены обнаружению корней с помощью георадара с подробным описанием настроек обработки сигнала во время сканирования, включая вертикальные цифровые фильтры (фильтры нижних и верхних частот) и горизонтальное сглаживание [19; 104]. Эти фильтры помогают улучшить соотношение сигнал/шум за счет уменьшения низкочастотных (проявляющихся в виде горизонтальных полос шума) и высокочастотных (проявляющихся в виде всплесков или «снежинок») помех, создаваемых взаимодействием антенны с землей, системными помехами или сигналами от близлежащих радиопередатчиков, а также другими электромагнитными помехами [47].

В отличие от оптического изображения, необработанные георадарные радиограммы вряд ли могут предоставить достаточную геометрическую информацию о погребенных объектах. Кроме того, радарограммы всегда загрязнены посторонними отражениями. Следовательно, перед интерпретацией необработанные радарограммы должны быть очищены и скорректированы. Основной целью последующей обработки сигнала является либо подготовка изображения, которое можно легко интерпретировать, либо классификация целевого сигнала в соответствии с известной процедурой тестирования [33]. Для обнаружения корней был представлен усовершенствованный протокол постобработки данных, который был принят и позднее модифицирован [19]. После его усовершенствования для обнаружения и количественной оценки корней был разработан стандартный протокол последующей обработки георадарных данных [12; 94]. Как правило, стандартный протокол постобработки георадарных данных должен включать стандартизацию радиограмм, подавление шума, усиление сигнала, перенос и преобразование Гильберта.

Для коррекции вертикального и горизонтального масштабов на изображениях радарограмм применяется их стандартизация. В ходе этого процесса смещение во времени между нулем во временном окне и первым разрывом (т. е. временем, необходимым для первого отражения от поверхности земли) между трассами может быть компенсировано путем устране-

ния постоянного смещения потока – (direct current offset – отклонение волновой формы относительно оси нулевого уровня) и дрейфа постоянной составляющей (direct current drift) [12], и был проведен анализ первого разрыва методом наименьших квадратов [29]. Если данные георадара получены на неровной поверхности или без измерительного колеса, горизонтальный масштаб радарограммы будет неравномерным. С помощью маркеров, нанесенных на георадарную карту с известными интервалами в пространстве, горизонтальное расстояние нормализуется, или корректируется рельеф местности [19; 28].

Фоновый шум на георадарных снимках включает в себя горизонтальные полосы, вызванные взаимодействием антенны с землей или близкими радиопомехами, множественные отражения, вызванные отражением георадарного сигнала от подповерхностных слоев, и высокочастотные всплески. Для устранения этих нежелательных отражений выполняется шумоподавление. Фильтры удаления фона (так называемые фильтры с конечной импульсной характеристикой) могут применяться для удаления параллельных полос низкочастотного шума [19; 94]. Шум, вызванный низкочастотными помехами, также может быть устранен с помощью фильтра верхних частот [29]. Высокочастотный шум может быть подавлен градиентным фильтром [12] или объединением нескольких трасс [47].

Как уже упоминалось, мощность радиолокационного сигнала экспоненциально уменьшается со временем прохождения в среде (см. уравнение (6). Для компенсации потерь энергии, вызванных затуханием в среде, потерями на рассеяние и диссипацией, используются изменяющиеся во времени регулировки усиления. Чтобы улучшить видимость гиперболических радиограмм применена комбинация линейного и экспоненциального усиления [12]. В других исследованиях [19; 28] увеличение дальности было установлено и скорректировано до проведения радиолокационной съемки. Однако в подобных случаях одновременно будет увеличен уровень шума на георадарных снимках.

Необработанные георадарные снимки дают искаженное изображение стратиграфии ризосферы и погребенных объектов. Точечные отражатели (например, корни, пересекающиеся сигналом перпендикулярно их осям), генерируют гиперболические отражения, что делает определение скрытых целей на георадарных снимках непрямым. Искажения могут быть исправлены с помощью миграции Кирхгофа, которая прослеживает отражения гиперболических волн до их источников и удаляет «рукава» или «хвосты» гиперболических волн. (*Kirchhoff migration – метод сейсмической миграции, который использует интегральную форму (уравнение Кирхгофа) волнового уравнения. Суть метода заключается в том, чтобы суммировать энергию, произведенную каждым вторичным источником, и перенести её в точку генерации*).

Миграция Кирхгофа – это распространенный метод, используемый при обнаружении корней с помощью георадара. Согласно этому методу сначала вычисляется угол падения и расстояние до погребенного отражателя. Затем положение целевого отражателя корректируется путем сворачивания рукава гиперболической волны к его вер-

шине [26]. В качестве альтернативного метода может быть применена неконтролируемая миграция максимальной выпуклости [12]. Этот метод предполагает использование полугиперболической функции максимальной выпуклости и суммирует значения каждого отдельного А-сканирования в точке, в которой он пересекает полугиперболический фокус по совокупному набору данных. Вся синфазная энергия складывается в фазе, в то время как некогерентная энергия обычно находится вне фазы и стремится к нулю [34]. Как для неконтролируемой миграции максимальной выпуклости, так и для миграции Кирхгофа, для правильной интерпретации требуется знание скорости георадарной волны. Скорость волны может быть оценена на основе анализа почвы согласно уравнению (3) [24], или измерена путем закапывания металлического предмета на известную глубину [19], или определена с использованием характерной гиперболической формы отражения от точечного источника [12].

В отличие от миграции Кирхгофа, преобразование Гильберта выражает взаимосвязь между величиной и фазой радиолокационного сигнала, позволяя реконструировать фазу сигнала по его амплитуде, а не по его геометрии, что позволяет выявить тонкие свойства и объекты и уменьшить количество многократных отражений [76]. С помощью этого метода отражения гиперболы, генерируемые корнями, могут быть разложены. В некоторых исследованиях миграция была исключена путем применения преобразования Гильберта [19; 86]. Влияние основных процедур обработки сигналов на радарограмму показано на рис. 3. В целом, усовершенствованные методы постобработки значительно улучшили качество радарограмм [47].

Картирование скелетных корней можно разделить на 3D-реконструкцию архитектуры корневой системы

и 2D/3D-картирование корневой зоны. На начальном этапе использования георадара для исследования корней большинство усилий было приложено для проверки применимости георадара к визуализации корневой 3D-архитектуры [24; 51; 93]. В этих исследованиях для картографирования скелетных корней четырех различных пород деревьев в разных экологических, в том числе городских, условиях использовалась георадарная система с центральной частотой антенного блока 450 МГц. После этапов постобработки данных (включая усиление и перенос сигнала) 3D-изображения скелетной корневой системы (рис. 4) были перерисованы вручную на основе радарограммы. Затем корневые системы были оцифрованы для определения длины скелетных корней и плотности занимаемого ими объема на разной глубине. Однако в этих исследованиях не было предоставлено никакой конкретной информации о том, как карта корней была перерисована с помощью георадара. Расположение корней и их диаметры были сначала оценены на каждой радарограмме, а корни между соседними радарограммами для создания корневой 3D-карты были связаны вручную.

Метод картирования скелетных корней с использованием георадара имеет несколько преимуществ перед другими методами, включая: 1) не инвазивное и эффективное сканирование корневых систем; 2) возможность многократного и долгосрочного наблюдения за распределением и развитием корней в различных условиях [51]. Однако когда скелетные корни были перерисованы вручную в соответствии с георадарными снимками и сравнены с фактическими полевыми наблюдениями, полученными при раскопках и фотографировании, было обнаружено лишь ограниченное сходство в их структуре, особенно при вертикальном разрезе.

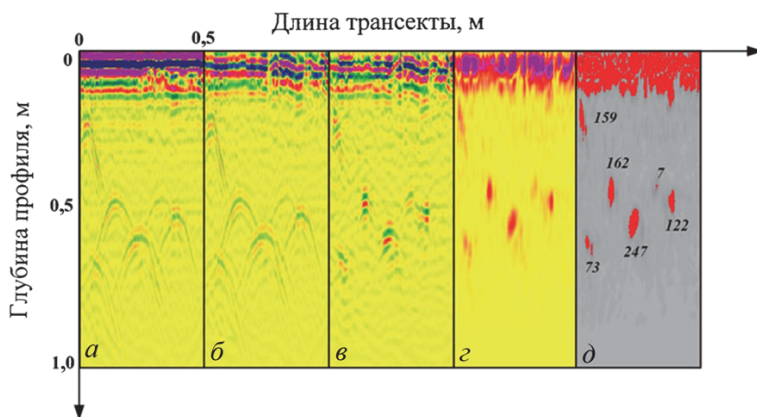


Рис. 3. Пример георадарных радиограмм, полученных сканированием кустарника (*Caragana microphylla*) в песчаной местности во Внутренней Монголии, Китай, демонстрирующих способность георадара обнаруживать два фрагмента корней и эффект последующей обработки георадарного изображения:

а – необработанные данные, полученные с помощью георадарной системы IDS с частотой антенного блока 900 МГц с гиперболическими отражениями корней; *б* – та же радарограмма, обработанная в программном обеспечении Reflex-Win 5.0 (Sandmeier Scientific Software, Германия) с устранением дрейфа постоянной составляющей, удалением фона и полосным фильтром (как верхних, так и нижних частот), используемым для устранения низкочастотных и высокочастотных помех; *в* – миграция Кирхгофа, используемая для отслеживания гиперболических отражений до их источников; *г* – преобразование Гильберта путем выражения амплитуды сигналов для выявления малозаметных объектов и уменьшения множественных отражений; *д* – радарограмма, преобразованная в 8-битное изображение в серой шкале. Выделенные области указывают на пиксели в пределах порогового диапазона (интенсивность от 60 до 255), полученные с помощью программного обеспечения Sigma Scan (Systat Software Inc., США). Цифры, указанные над сигналами корневого радара, представляют собой сумму пикселей в пределах порогового диапазона каждого сигнала радара [47]

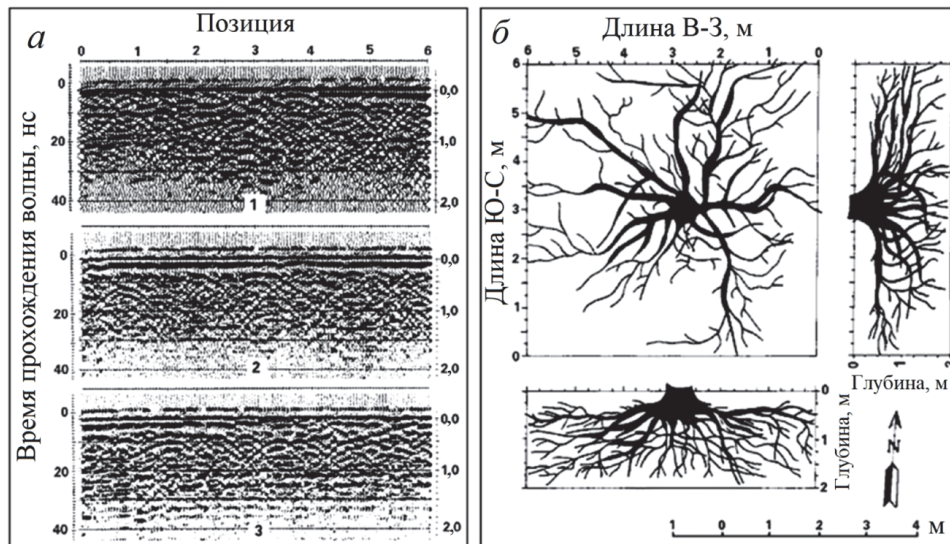


Рис. 4. Картографирование корневой системы с использованием георадара:

a – георадарные снимки *in situ* с многочисленными показателями корней дуба (*Quercus petraea*) [47]. Были оценены местоположение и диаметр корней на каждой радиограмме. Путем привязки корневых отражений к соседним георадарным снимкам были получены ориентация и длина каждого отдельного корня, а затем вручную были перерисованы различные типы корневых систем; *б* – горизонтальная проекция, виды спереди и сбоку корневой системы. Максимальная глубина укоренения, схема ветвления корней и схема пространственного распределения корней были получены на основе изображений, показанных ранее [51]

Это было вызвано тем, что георадар не мог идентифицировать объекты, движущиеся параллельно направлению распространения электромагнитных импульсов, а методы анализа его данных не позволяли отличить корни разных растений. Более того, поскольку окончательные карты корней были произвольно обрисованы на основе георадарных снимков в соответствии с личным опытом оператора, при оценке диаметра корней и предположении о характере ветвления может возникнуть погрешность. Поэтому применение такого метода для реконструкции трехмерной архитектуры скелетной корневой системы является сложной задачей [47].

Хотя применение георадара для 3D-визуализации архитектуры ветвления скелетной корневой системы является спорным, была доказана целесообразность использования георадара для обнаружения и 3D-визуализации отдельных скелетных корней. Была использована георадарная система с антенным блоком частотой 900 МГц, установленная на тележке для сканирования корней. Данные распределены по обычной сетке, чтобы очертить область корневой зоны при любом интервале глубины (который может быть получен по известным интервалам времени прохождения и скорости волны). Псевдоизображения с горизонтальным временным срезом в 3D-формате облегчают определение характеристик изменений в корневой зоне в связи с глубиной. К сожалению, в этих исследованиях не удалось оценить точность картирования корневой зоны на основе георадара, и количественная связь между плотностью корней и уровнем сигнала на временных срезах была неясной [47].

В целом, при дальнейшем совершенствовании конструкции георадара, программного обеспечения для обработки данных, протоколов сбора полевых данных и методов оценки параметров корней этот не

инвазивный метод обладает перспективным потенциалом для изучения скелетных корней.

ОЦЕНКА АРХИТЕКТониКИ КОРНЕВЫХ СИСТЕМ (АКС) НА ОСНОВЕ ГЕОРАДАРНОЙ МГНОВЕННОЙ АМПЛИТУДЫ (С-СКАНИРОВАНИЕ)

Реконструкция пространственного распределения АКС объединяет в себе 3D-реконструкцию топологии и морфологических характеристик корней. Задача реконструкции топологии корней – восстановить закономерности роста и структуру ветвления корневой системы. Ключевыми этапами в этом процессе являются извлечение параметров (features) корней и подключение корневой топологии. Задача реконструкции морфологических особенностей корней состоит в том, чтобы восстановить их геометрические характеристики, тем самым создавая естественное 3D-изображение корневой системы. Ключевые этапы этого процесса включают оценку геометрических параметров корневых сегментов и обеспечение их плавного перехода в ходе роста корня. Предыдущие исследования показали, что возможно использование вершин гипербол, отраженных радиолокационными волнами, для представления корневых точек с целью идентификации и определения местоположения корней [31], что привело к разработке алгоритмов пространственной связи для восстановления топологии корней [40; 107]. Однако такие факторы, как разрешение георадарного антенного блока [30], угол сканирования [97] и почвенная среда [1], могут повлиять на результаты обнаружения, что делает неопределенными эффективность и точность определения корневых точек. Кроме того, методы соединения корневых сегментов, определенные вручную, могут привести к накоплению ошибок при топологической реконструкции [41].

В настоящее время морфологические характеристики корней в основном восстанавливаются путем анализа отраженных сигналов радара. Однако точность оценки геометрических параметров в значительной степени зависит от методов извлечения признаков из этих сигналов [109] и методов, используемых для обработки георадарных данных [113]. Кроме того, достоверность оценки параметров скелетных корней не поддается тщательной проверке. Поэтому современные подходы, которые интегрируют корневую топологию и морфологию для реконструкции пространственного распределения АКС, масштабировать для его крупномасштабной реконструкции довольно проблематично [41].

В провинции Шаньдун в Китае было проведено исследование корневой системы триплоидного тополя В301 ($(P. tomentosa \times P. bolleana) \times P. tomentosa$), направленное на разработку метода реконструкции пространственного распределения АКС на основе характеристик мгновенной амплитуды (*instantaneous amplitude*) георадара [41]. *Мгновенная амплитуда (instantaneous amplitude) в георадаре – это огибающая исходного сигнала, которая используется в обработке георадиолокационных данных. Метод мгновенной амплитуды используется для выделения участков радарограммы, отличающихся от соседних областей более высокой или более низкой энергией сигнала. Такие участки не имеют четких отражающих границ, но отличаются более высоким или более низким уровнем сигнала.*

В отличие от предыдущих подходов, согласно которым по отдельности восстанавливали топологию, а затем морфологию, предлагаемый метод использует мгновенную амплитуду для характеристики границы отражения энергии от погребенной АКС. Построение трехмерного объема данных (С-сканирование) на основе георадарных профилей позволяет лучше видеть пространственное распределение мгновенной амплитуды и корреляцию между соседними профилями. Затем АКС автоматически восстанавливается в 3D-формате с помощью пространственной интерполяции и извлечения изоповерхностей. Наличие существенного различия почвы и корней по содержанию влаги способствует исследованию АКС с помощью георадара [41].

Было отобрано 9-летнее дерево (рис. 5, а) с диаметром ствола на высоте груди 17,0 см, высотой 15,1

м, взятое из посадки по схеме 2×3 м. У него отсутствует выступающий стержневой корень, и он имеет преимущественно неглубокие боковые корни, которые отходят под углом к горизонтальной поверхности менее 30°. Корневая система сосредоточена в верхнем 1-метровом слое почвы, который содержит более 86 % общей биомассы корней [41].

Был использован георадар TRU™ (Tree Radar Unit) (Tree Radar, Inc, США) с центральной частотой антенного блока 1600 МГц. Для неразрушающего обнаружения корневой системы были применены две схемы: сканирование с квадратной сеткой и концентрическое круговое сканирование, как показано на рис. 5, б и 5, в. Схема сканирования с квадратной сеткой включала в себя в общей сложности 44 линии сканирования, в том числе 22 линии вдоль оси X (Y000, Y015, ..., Y150; Y210, Y225, ..., Y360) и 22 линии вдоль оси Y (X000, X015, ..., X150; X210, X225, ..., X360). Длина каждой линии сканирования составляла 3,60 м, а расстояние между соседними параллельными линиями сканирования составляло 15 см. Таким образом, общая площадь сканирования равнялась 12,96 м². Схема концентрического кругового сканирования была сосредоточена вокруг корневой шейки, при этом сканирование выполнялось по часовой стрелке. Длина каждой линии сканирования соответствовала длине окружности. Радиус увеличивали с 30 см до 180 см с шагом 15 см, в результате чего было получено 11 линий сканирования (R030, R045, ..., R180), а общая площадь составила 10,18 м² [41].

Точность и эффективность реконструкции пространственного распределения АКС на основе георадара оценивались путем сравнения с фактическими данными, полученными в результате полного извлечения корневой системы сразу после георадарной съемки. Линии сканирования вдоль оси Y (X000, X015, ..., X150; X210, X225, ..., X360) были обработаны как профили вынимаемого грунта. Земляные работы проводились с обоих концов (X000 и X360) по направлению к корневой шейке в центре (X180), при этом каждая профильная траншея была вырыта на глубину 1 м (рис. 6, а). Для каждого извлекаемого профиля записывались пространственные координаты и диаметры всех корней диаметром более 5 мм до тех пор, пока не была извлечена вся корневая система (рис. 6, в).

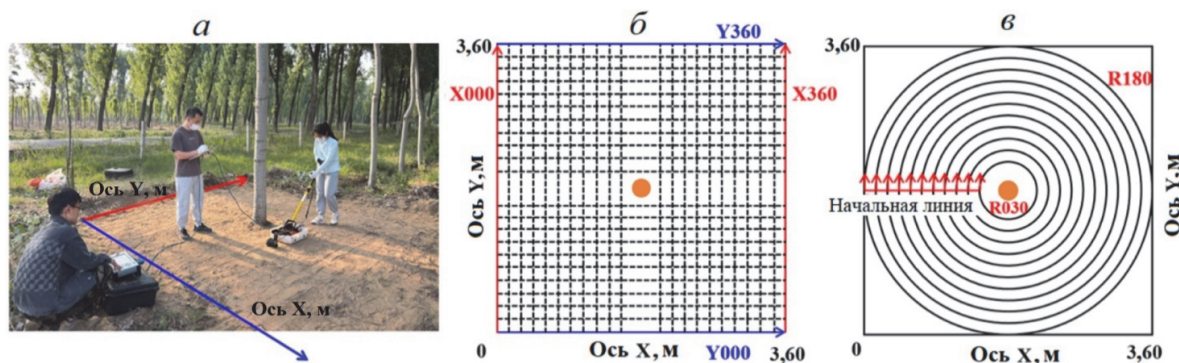


Рис. 5. Георадарная съемка модельного тополя (а); схема сканирования с квадратной сеткой (б) и схема концентрического кругового сканирования (в) [41]

На рис. 6, *з* представлена модель корневой системы, реконструированная по фактической АКС, в которой боковые корни 1-го порядка обозначены в последовательности от M-R1 до M-R9. Фенотипирование корней было основано на параметрах, рассчитанных в соответствии с моделью усеченного конуса, предложенной ранее [40]. Кроме того, когда выемка грунта достигла профиля X090, в стенку траншеи на глубинах 15, 30, 50 и 70 см были горизонтально вставлены четыре стальных стержня длиной 40 см и диаметром 9 мм, как показано на рис. 6, *б* (обозначены как A, B, C, D). Затем георадар был использован для сканирования этих металлических отражателей на известных глубинах, чтобы откалибровать скорость распространения радиолокационной волны для коррекции глубины сканирования [41].

Исходные данные, полученные георадаром, были сохранены в формате .dzt и предварительно обработаны с помощью программного обеспечения matGPR (Foundation Inc, США). Операции предварительной обработки включают в себя:

- коррекцию нулевого значения времени, выравнивание положения отражения поверхности с нулевой точкой на оси времени;
- удаление постоянной составляющей, вычитание среднего значения из каждой трассы;
- медианную фильтрацию для удаления случайного шума и устранения глобального фона на одной радарограмме;

– преобразование единиц времени в единицы глубины профиля на основе измеренной скорости радиолокационной волны; среднее значение составило 0,13 м/нс.

Двумерный (2D) георадарный профиль после предварительной обработки данных показан на рис. 7, *а*, где горизонтальная ось представляет длину сканирования профиля, вертикальная ось – глубину обнаружения, а гиперболические отражения указывают на наличие подземных объектов [41].

Трехмерная реконструкция пространственного распределения АКС. Определение местоположения подземных объектов с использованием корневых точек является распространенным подходом. Однако корневая точка не отражает размер объекта, и восстановление топологии АКС исключительно по этим точкам может привести к неправильной идентификации и ошибочным подключениям, что снижает точность результирующей модели. На энергию отраженного импульса при использовании георадара влияют размеры объекта и его глубина [44]. Анализ амплитуды этих отражений позволяет охарактеризовать подземные структуры и их физические свойства [92]. В целом, представленный метод трехмерной реконструкции АКС основан на построении пространственной изоповерхности на основе свойств мгновенной амплитуды, которая использует распределение мощности сигнала по последовательности 2D георадарных профилей [41].

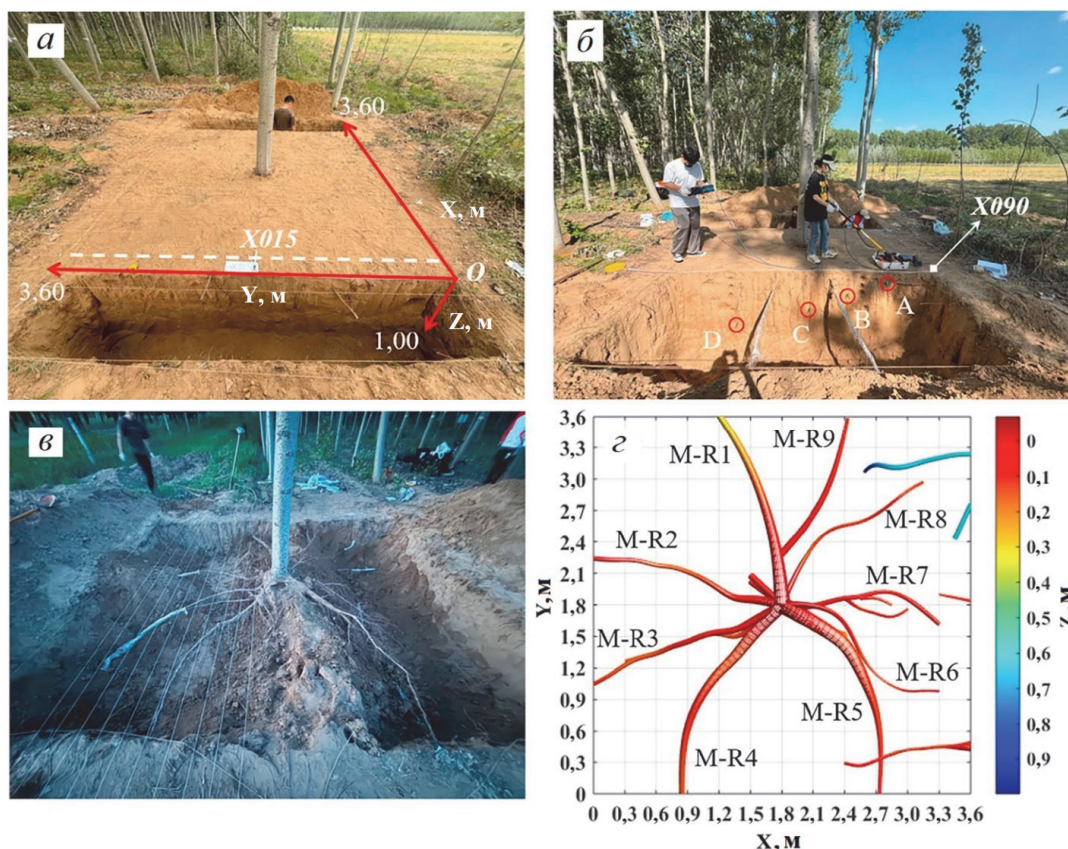


Рис. 6. Выемка грунта вдоль профиля сканирования для регистрации пространственного распределения структуры корневой системы АКС (*а*); измерение скорости георадарной волны с помощью металлических отражателей (*б*); пространственное распределение фактической АКС (*с*) и модель, реконструированная на основе фактической АКС (*з*) [41]

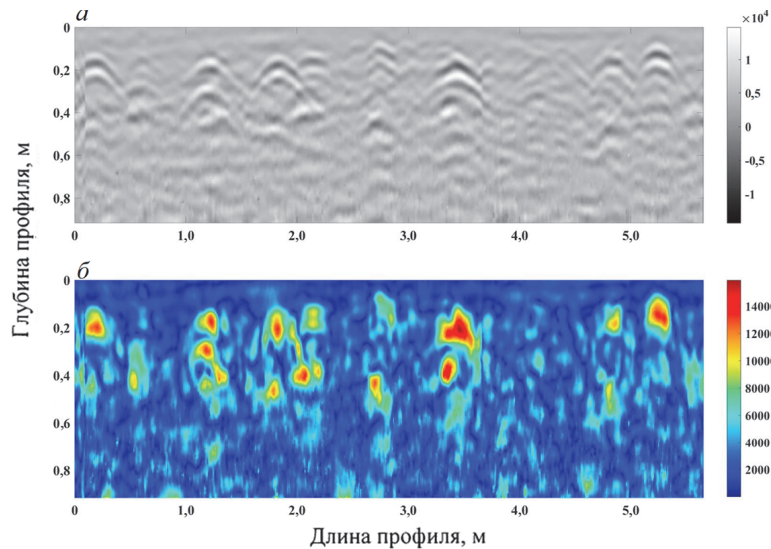


Рис. 7. Предварительно обработанные двумерные (2D) данные георадарного профиля (а) и характеристика отраженной энергии с мгновенной амплитудой георадара (б) [41]

На основе анализа сигналов в ходе исследования из данных георадара были получены характеристики мгновенной амплитуды (огнивающей сигнала) для представления пространственного распределения энергии отраженного сигнала. Этот процесс эффективно преобразует корневую отражающую гиперболу в карту интенсивности волнового сигнала радара, где выделенная амплитуда точно определяет области вершин отражающих гипербол (рис. 7, б). При сканировании корней, обладающих отличными от окружающей почвы диэлектрическими свойствами, мгновенная амплитуда на визуализации (рис. 7, б) показывает сильный или слабый отклик, обозначенные соответственно красным или синим цветом [41]. Мгновенная амплитуда вычисляется путем построения аналитического сигнала на основе его реального значения с помощью преобразования Гильберта:

$$A(t) = \sqrt{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}, \quad (7)$$

где $A(t)$ представляет собой мгновенную амплитуду георадарного сигнала; $s(t)$ – временную вейвлет-функцию радиолокационного импульса; $\hat{s}(t)$ – преобразование Гильберта от $s(t)$, определяемое как

$$\hat{s}(t) = s(t) \cdot \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (8)$$

Местоположение подземных целей может быть определено по одному двумерному профилю мгновенной амплитуды. Однако такой профиль имеет ограниченные возможности для визуализации формы, пространственного распределения и других характеристик целей. Чтобы решить эту проблему, последовательности 2D-профилей как из квадратной сетки, так и из концентрических круговых схем сканирования, были интегрированы в С-сканирование, что значительно повысило качество и эффективность 3D-интерпретации (рис. 8). В этой 3D-визуализации прозрачность всех профилей мгновенной амплитуды установлена на 0,7. Каждый двумерный профиль из

схемы с квадратной сеткой был равномерно обрезан до размера $0,9 \times 3,6$ м, в то время как профили из концентрической круговой схемы были обрезаны до $0,9 \times l$ м, где l представляет собой окружность, соответствующую радиусу сканирования. Последовательность профилей из концентрической круговой схемы нанесена в цилиндрических координатах следующим образом:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta, \\ y = r \sin \theta, \\ z = z, \end{cases} \quad (9)$$

где $0 \leq \theta \leq 2\pi$ и r – радиус сканирования концентрических окружностей [41].

Двумерные профили мгновенной амплитуды были приведены к общему масштабу для облегчения обработки и сравнений, поскольку их амплитудные распределения варьировали по профилям. Это было достигнуто путем линейного отображения мгновенной амплитуды в едином диапазоне:

$$A_n = k \cdot \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}, \quad (10)$$

где A_n – нормализованная амплитуда; A – исходная мгновенная амплитуда текущего двумерного профиля; $A_{\min}$ и $A_{\max}$ представляют минимальную и максимальную мгновенную амплитуду профиля; k – масштабный коэффициент. Поскольку амплитуды в большинстве профилей находятся в диапазоне от 0 до 12000, значение k было установлено равным 12000 [41].

На рис. 8 показано пространственное распределение мгновенной амплитуды георадара. Однако объем трехмерных данных содержит существенные пробелы между соседними параллельными профилями из-за ограниченного интервала георадарной выборки, что затрудняет оценку непрерывности распространения корней. С целью плавной реконструкции АКС для оценки мгновенных значений амплитуды в областях без дискретизации между профилями была использована кубическая сплайн-интерполяция, что повысило непрерывность визуализации амплитуды [41].

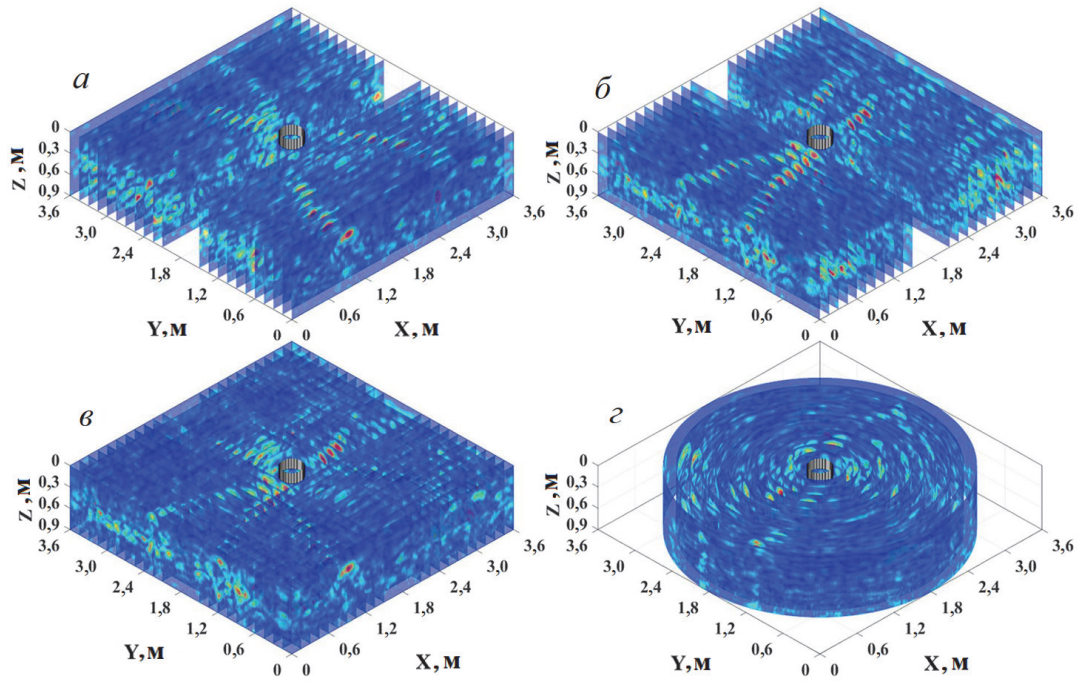


Рис. 8. Георадарное С-сканирование по квадратной сетке (ось X) (а); георадарное С-сканирование по квадратной сетке (ось Y) (б); совокупность всех профилей квадратной сетки (в) и георадарное С-сканирование по концентрической круговой схеме (г) [41]

Кубическая сплайн-интерполяционная функция $s(x)$ может быть удобно решена с помощью трех-моментного уравнения, которое характеризуется выражением $s(x)$ через его вторые производные в узлах m_i (т. е. $m_i = s''(x_i)$) и использованием непрерывности $s'(x)$ во внутренних узлах x_i и граничных условий для определения m_i . Ее выражение задается с помощью:

$$s(x) = m_i \frac{(x_{i+1} - x)^3}{6h_i} + m_{i+1} \frac{(x - x_i)^3}{6h_i} + \left(y_i - \frac{m_i h_i^2}{6} \right) \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + \left(y_{i+1} - \frac{m_{i+1} h_i^2}{6} \right) \frac{x - x_i}{h_i}, \quad (11)$$

где $x \in [x_i, x_{i+1}]$, $h_i = x_{i+1} - x_i$, $i = 1; 2; \dots; n - 1$ [41].

Используя условие

$$\lim_{x \rightarrow x_i^+} s'(x) = \lim_{x \rightarrow x_i^-} s'(x),$$

можно вывести, что

$$\mu_i m_{i-1} + 2m_i + \lambda_i m_{i+1} = d_i, \quad (12)$$

где

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}, \\ \lambda_i = 1 * \mu_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}, \\ d_i = 6 \frac{f[x_i, x_{i+1}] - f[x_{i-1}, x_i]}{h_{i-1} + h_i}. \end{cases} \quad (13)$$

Начальными значениями μ_i , λ_i и d_i являются (граничное условие Дирихле: $s'(x_0) = f'_0$, $s'(x_n) = f'_n$):

$$\begin{cases} \lambda_0 = 1, d_0 = \frac{6}{h_0} (f[x_0, x_1] - f'_0), \\ \mu_1 = 1, d_n = \frac{6}{h_{n-1}} (f'_n - f[x_{n-1}, x_n]). \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом, матричная форма для определения изгибающих моментов m_i имеет вид

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 2 & \lambda_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \mu_n & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_{n-1} \\ d_n \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В этом исследовании $f(x_i)$ представляет собой мгновенное значение амплитуды $A_i(x; z)$ или $A_i(y; z)$ в определенной точке i -го двумерного профиля, в зависимости от его ориентации. Граничные условия Дирихле были получены с использованием формулы численного дифференцирования, основанной на теореме Тейлора. Интерполяция была выполнена на наборах из трех последовательных двумерных профилей мгновенной амплитуды A_k , A_{k+1} и A_{k+2} . После вставки 14 интерполированных изображений с равными интервалами между соседними профилями интервал выборки был сокращен до 0,01 м [41].

Если A_k – первый профиль, то используется формула прямой разности коэффициентов:

$$A'_k \approx \frac{A_{k+1} - A_k}{x_{k+1} - x_k}. \quad (16)$$

Когда A_{k+2} является последним профилем, используется формула обратной разности коэффициентов:

$$A'_{k+2} \approx \frac{A_{k+2} - A_{k+1}}{x_{k+2} - x_{k+1}}. \quad (17)$$

После интерполяции количество профилей в С-сканировании увеличилось до 722 для схемы с квадратной сеткой и до 151 для схемы с круговым сканированием. На основании расширенного набора установлено распределение АКС как пространственное распределение мгновенной амплитуды. Затем была сгенерирована изоповерхность (S) путем соединения всех точек С-сканирования, где мгновенная амплитуда равнялась определенному пороговому значению A_t [41]. Эти изоповерхности представляют собой восстановленную георадаром АКС, благодаря чему достигается ее 3D-реконструкция и визуализация:

$$S = \{(x, y, z) : A(x, y, z) = A_t\}. \quad (18)$$

Фенотипирование корней и оценка его точности. Под фенотипированием корневой системы растений понимается изучение её размеров, архитектуры, ветвления и др. в конкретных условиях внешней среды. Фенотипирование корней позволило количественно определить три ключевых морфологических признака из АКС, реконструированной с помощью георадара: длину (l), азимутальный угол (φ) и угол депрессии (θ). (*Угол депрессии (depression angle) – это угол, под которым нужно смотреть вниз с горизонтального положения, чтобы увидеть объект, расположенный на более низком уровне*). Азимутальный угол (φ) определяется как угол в направлении против часовой стрелки от положительной оси X к проекции основной оси на плоскость XOY . Угол депрессии (θ) – это угол между основной осью и плоскостью XOY . Их математические определения заключаются в следующем:

$$l = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (19)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right), \quad (20)$$

$$\theta = -\arctan\left(\frac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}}\right), \quad (21)$$

где (x, y, z) и (x_0, y_0, z_0) обозначают трехмерные координаты соответственно конечной и начальной точек корня. Азимутальный угол φ находится в диапазоне от $-\pi$ до π , а угол депрессии θ – в диапазоне от 0 до $\pi/2$ [41]. Кроме того, точность реконструкции АКС была количественно оценена с помощью параметра p :

$$p = \frac{n}{N} \times 100 \%, \quad (22)$$

где n представляет собой количество корней, восстановленных с помощью георадара; N – общее количество корней [41].

Наконец, ошибки реконструкции для фенотипирования корней были определены количественно в виде

абсолютной ошибки (E) и относительной ошибки (ε). В качестве примера была использована длина корня l :

$$[E_l = |l_{\text{gpr}} - l_{\text{manual}}|], \quad (23)$$

$$\varepsilon_l = \frac{E_l}{l_{\text{manual}}} \times 100 \%, \quad (24)$$

где E_l – абсолютная погрешность определения длины корня; ε_l – относительная погрешность ее определения, l_{gpr} представляет длину корня, восстановленную с помощью георадара, а l_{manual} относится к длине корня, измеренной с помощью ручного выкапывания [41].

Пространственное распределение мгновенной амплитуды георадара. Данные мгновенной амплитуды трехмерного георадара были пространственно интерполированы, и были сгенерированы срезы по глубине профиля с интервалом 10 см для обеих схем сканирования (рис. 9). На этих срезах синие области представляют области с низкой амплитудой, соответствующие фону почвы, в то время как оранжево-красные цвета указывают на области с высокой амплитудой, обычно связанные с подземными объектами. Пространственное распределение высокой мгновенной амплитуды показывает две ключевые характеристики:

- по горизонтали зоны высокой амплитуды расходятся от центра к краю срезов;
- по вертикали эти радиальные особенности сосредоточены в диапазоне глубин 0–0,4 м, с наибольшими амплитудами в неглубоких слоях (0,1–0,2 м) вблизи центра, сужаясь к краям.

Эта картина соответствует типичному росту корневых систем деревьев, которые берут начало от корневой шейки на небольшой глубине и растут радиально наружу и в глубину и уменьшаясь в диаметре. Таким образом, пространственная картина мгновенной амплитуды георадара эффективно отражает характерную архитектуру корневых систем, демонстрируя применимость этого признака для характеристики пространственного распределения корней [41].

Трехмерная реконструкция АКС. Из интерполированного набора трехмерных данных мгновенной амплитуды были извлечены изоповерхности для представления подповерхностных слоев АКС. При пороговом значении изоповерхности (A_t), установленном на 6000, результаты 3D-реконструкции для обеих схем сканирования представлены на рис. 10. Здесь на рис. 10, а показана фактическая корневая система, извлеченная из грунта, на рис. 10, б показана реконструкция по схеме квадратной сетки, а на рис. 10, в – по концентрической круговой схеме. Метки M-R, S-R и C-R обозначают корни, реконструированные соответственно в результате ручной выемки, методом квадратной сетки и методом концентрических кругов. В результатах, полученных с помощью георадара, изоповерхности отображаются зеленым цветом с подсветкой для улучшения восприятия глубины [41].

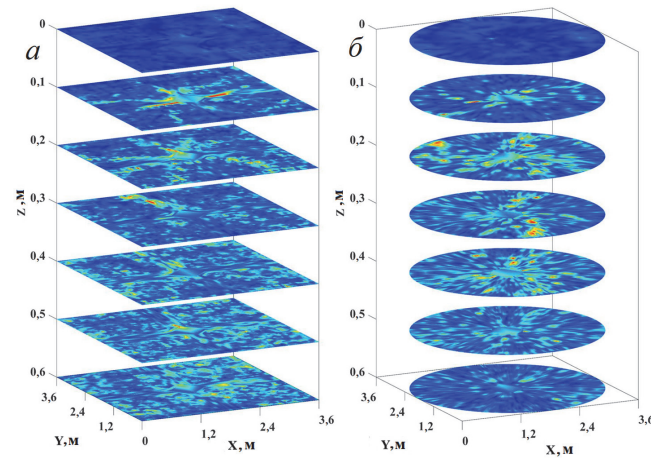


Рис. 9. Срезы вертикального профиля (глубины) с мгновенной амплитудой, выполненные с помощью георадара: *a* – схема сканирования с квадратной сеткой; *б* – схема концентрического кругового сканирования [41]

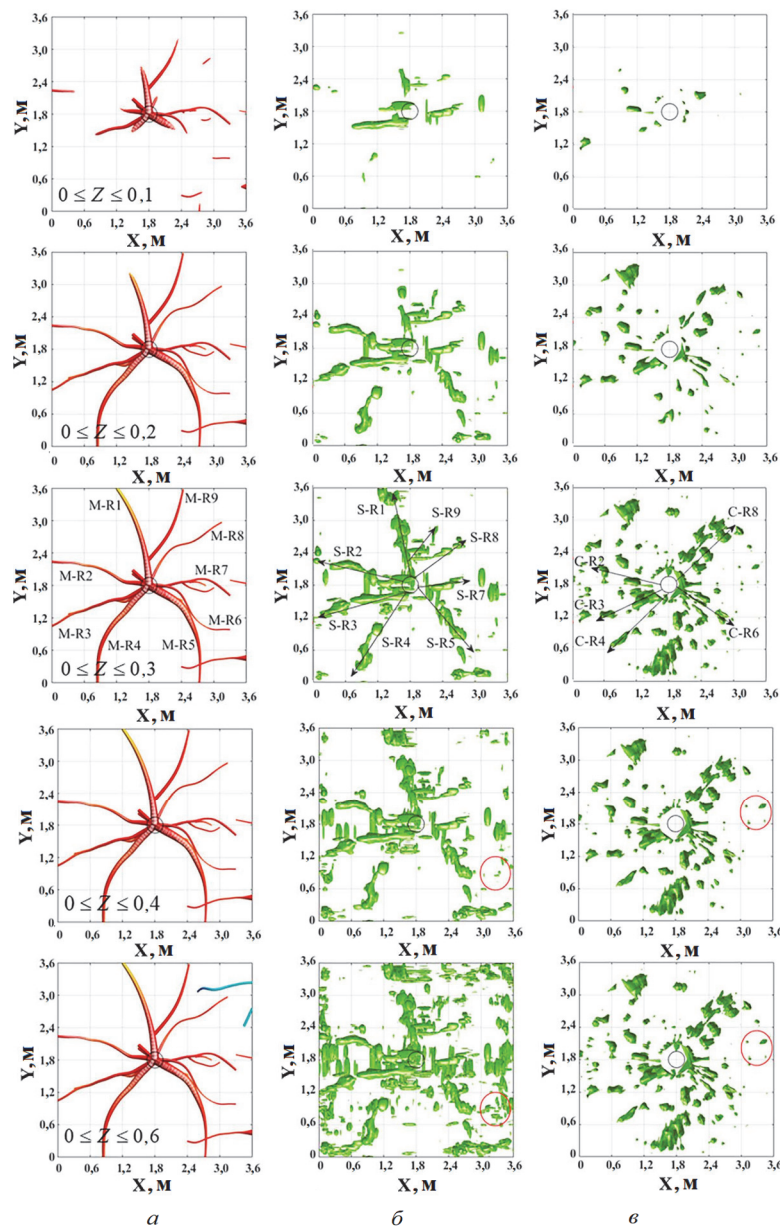


Рис. 10. Сравнение результатов трехмерной реконструкции: *a* – раскопанная АКС; *б* – реконструкция на основе квадратной сетки; *в* – реконструкция на основе концентрических кругов [41]

Выкопанная корневая система распространяется радиально от корневой шейки в рассредоточенном виде, превышая площадь измерения $3,6 \times 3,6 \text{ м}^2$ по горизонтали. Диаметр корней уменьшается с увеличением длины, и система в основном ограничивается диапазоном глубины 0–0,3 м (за пределами этой глубины новых корней обнаружено не было, за исключением корней соседних деревьев). АКС, реконструированная по схеме квадратной сетки, демонстрирует пространственное распределение, аналогичное фактическому. На небольших глубинах (0–0,1 м) мгновенная амплитуда изоповерхностей концентрируется вблизи корневой шейки, расширяясь по мере увеличения глубины (0,1–0,3 м). По этой схеме идентифицировано 8 из 9 фактических корней (обозначенных от S-R1 до S-R5 и от S-R7 до S-R9), что обусловило точность реконструкции около 89 %. Напротив, концентрическая круговая схема идентифицировала только 5 корней (от C-R2 до C-R4, C-R6, C-R8), достигая точности около 56 %. Она показывает худшее соответствие с фактической АКС и создает изоповерхности с пониженной непрерывностью. Оба метода генерируют небольшой шум (выделен красными кружками на рис. 10, б и 10, в), который увеличивается с глубиной, особенно на глубинах между 0,4 и 0,6 м. Таким образом, из-за повышенных шумовых помех георадар с антенной частотой 1600 МГц менее надежен для восстановления корней, залегающих глубже 0,4 м.

Количественное фенотипирование корней. На рис. 11 сравниваются фенотипические параметры корней, полученные в результате фактических раскопок, а также согласно двум схемам георадарной реконст-

рукции. Длина корней, восстановленная с помощью георадара (рис. 11, а), как правило, меньше фактических значений. Для метода квадратной сетки абсолютная погрешность E_l составляла от 5,03 до 79,15 см, а относительная погрешность ε_l – от 2,6 до 51,5 %. Для концентрической круговой схемы E_l варьировала от 24,2 до 91,8 см, а ε_l – от 11,9 % до 48,0 %. В целом, суммарная длина корней, восстановленная методом квадратной сетки, составила 1249,1 см (71,7 % от фактической общей длины) по сравнению с 736,9 см (42,3 %) для метода концентрических кругов. На рис. 11, б азимутальные углы 9 фактических корней распределены равномерно между -180° и 180° , и только M-R5, MR6 и M-R7 показывают независимое распределение корней. Азимутальный угол E_ϕ для метода квадратной сетки составил от $0,8^\circ$ до $22,3^\circ$, а для метода концентрических кругов – от $0,7^\circ$ до $15,6^\circ$. Аналогично, для угла депрессии (рис. 11, в) значение E_ϕ для метода квадратной сетки варьировало от $0,4^\circ$ до $4,2^\circ$, а для метода концентрических кругов – от $0,8^\circ$ до $8,8^\circ$.

Для дальнейшей оценки точности реконструкции были проанализированы результаты более эффективного метода квадратной сетки в зависимости от диаметра корня с использованием интервала диаметров 1 см (рис. 12). Здесь средний диаметр корня определяется как среднее значение его начального и конечного диаметров. Средняя абсолютная погрешность (E) и средняя относительная погрешность (ε) для длины корня, азимутального угла и угла депрессии были рассчитаны путем усреднения ошибок для всех корней в пределах каждого класса диаметров [41].

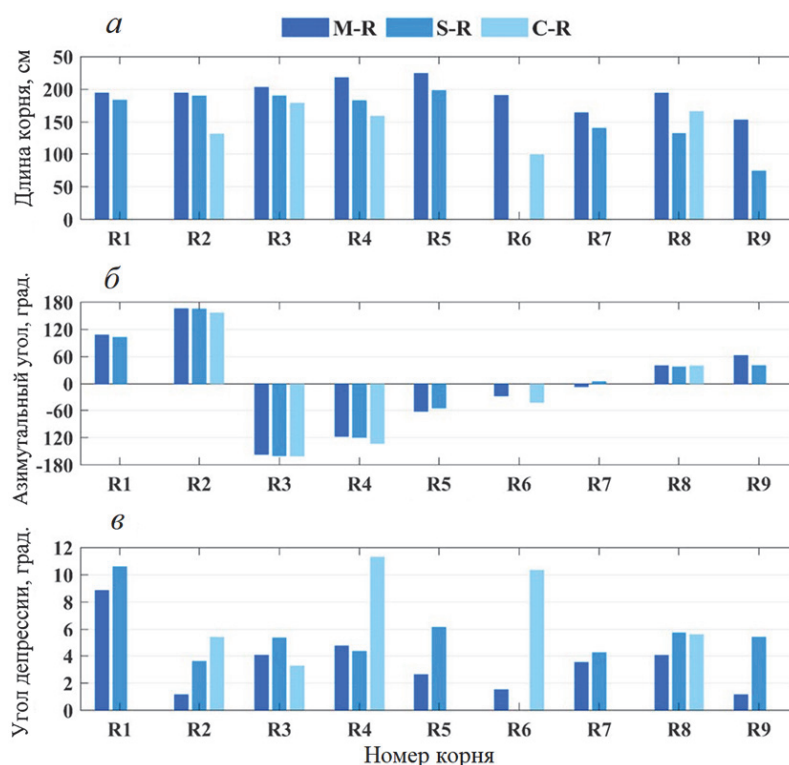


Рис. 11. Количественное фенотипирование корней: сравнение их длины (а), азимутального угла (б) и угла депрессии (в).

Метки M-R, S-R и C-R обозначают корни, реконструированные соответственно в результате ручной выемки, методом квадратной сетки и методом концентрических кругов [41]

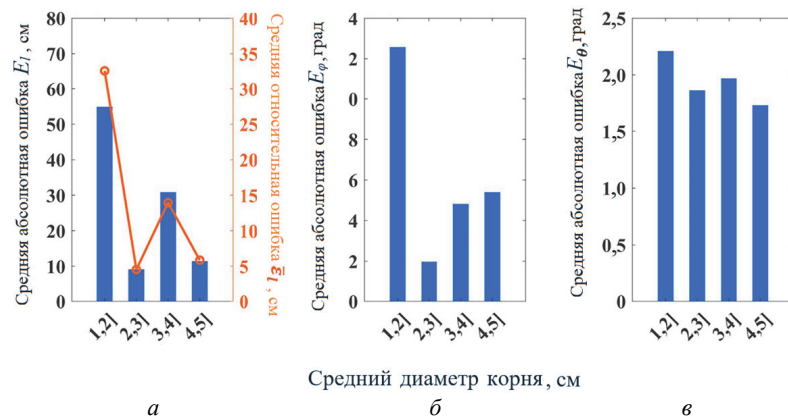


Рис. 12. Эффективность реконструкции по классам диаметров: длины корня (а), азимутального угла (б) и угла депрессии (в) [41]

На рис. 12а показано, что:

- георадар с частотой антенны 1600 МГц может обнаруживать корни диаметром не менее 1 см, в то время как корни тоньше этого порогового значения обнаружить невозможно,

- наибольший источник ошибок при восстановлении длины корней связан с корнями диаметром 1–2 см, средняя абсолютная погрешность (E_l) которых составляет 54,9 см, а средняя относительная погрешность (ε_l) – 32,6 %, и

- для корней диаметром более 2 см E_l падает ниже 30 см, а ε_l – ниже 15 % [41].

По мере увеличения среднего диаметра с 1–2 см до более 2 см точность реконструкции повышается с 67,4 до 86,0–95,5 %, что подчеркивает значительное влияние диаметра корня на оценку его длины. Аналогично, на рис. 12, б показано, что погрешность восстановления азимутального угла наиболее высока для корней диаметром 1–2 см ($E_\phi = 12,6^\circ$), снижаясь до уровня ниже 6° для корней размером более 2 см. Что касается угла депрессии, то точность реконструкции практически не зависит от класса диаметров из-за небольшой глубины корней, при этом E_θ остается менее $2,5^\circ$ (рис. 12, в).

Преимущества подхода, его ограничения и перспективы на будущее. По сравнению с другими разрушающими методами обнаружения корней деревьев георадар обладает тремя основными преимуществами [41]:

- высокое разрешение: при оснащении высокочастотными антеннами георадар может достигать разрешения в миллиметровом масштабе [29], что позволяет четко идентифицировать мелкие морфологические детали корней [67];

- высокая эффективность: одна съемка может быть выполнена в течение нескольких минут, что обеспечивает значительно большую эффективность по сравнению с традиционными методами, такими как томография электрического сопротивления и сейсморазведка;

- возможность пространственного анализа: благодаря гибкому размещению нескольких линий съемки в виде сетки георадар облегчает 3D-реконструкцию АКС и позволяет отслеживать процесс роста корней [30].

Следовательно, георадар становится незаменимым инструментом для исследования неглубокой корневой

системы и предпочтительным методом в экологических исследованиях. В этом исследовании представлен новый метод реконструкции пространственного распределения АКС на основе георадара. Процедура состояла из трех основных этапов: во-первых, применение преобразования Гильберта для получения атрибута мгновенной амплитуды, который использовался для построения двумерной карты интенсивности корневого отражения; во-вторых, выполнение пространственной интерполяции и извлечение изоповерхностей для восстановления трехмерного пространственного распределения АКС; и, наконец, проверка осуществимости и эффективности предложенного способа путем сравнения с результатами выкапывания целой корневой системы. По сравнению с традиционными методами реконструкции АКС, предложенный подход демонстрирует несколько неоспоримых преимуществ [41]:

- в отличие от ранее предложенных методов [52; 82], основанных на выявлении отраженных гиперболических волн и ручном определении границ для восстановления АКС, настоящий метод обеспечивает автоматизированную и эффективную реконструкцию пространственного распределения АКС, значительно улучшая 3D-визуализацию;

- в отличие от ранее предложенных методов [75; 107], согласно которым реконструировали корневую топологию на основе предопределенных правил подключения вручную, настоящий метод характеризует АКС, используя непрерывные изоповерхности мгновенной амплитуды, что позволяет избежать потенциальных неправильных подключений при ручном варианте;

- по сравнению с методами реконструкции АКС отдельного дерева, основанными на моделях роста корней [40], согласно предложенному методу АКС реконструируется непосредственно на основе пространственного распределения мгновенной амплитуды. Этот подход позволяет не только точно реконструировать корневую систему отдельного дерева, но и позволяет одновременно реконструировать АКС нескольких деревьев в масштабе участка. Более того, метод может быть расширен для получения быстрой визуализации других подземных объектов с высоким разрешением и непрерывными характеристиками [41].

Несмотря на то, что данное исследование показало успешную и точную реконструкцию подземной АКС в условиях городского лесопарка, необходимо признать ряд ограничений. Во-первых, исследование проводилось в относительно однородной супесчаной среде, и необходимо еще подтвердить обоснованность метода и обеспечить воспроизводимость результата. Установленный показатель эффективности обнаружения корней 82,7 % очевидно лучше по сравнению с показателем в 47,7 %, достигнутым ранее [109] в лесном сообществе на гранитах. Во-вторых, корни изученных деревьев *Populus tomentosa* были преимущественно неглубокими (в пределах 0–30 см), а сильный контраст в содержании воды между корнями (в среднем 208,7 %) и почвой (в среднем 5,3 %) создавал благоприятные условия для четкой идентификации корней с помощью георадара. Хотя валидация с помощью выкапывания всего корня подтвердила применимость метода, надежность предложенного подхода не была проверена в более сложных полевых условиях. Необходима дальнейшая валидация с использованием деревьев большего размера и на больших площадях. Поэтому будущая работа должна быть сосредоточена на совершенствовании методов обработки сигналов в сложных полевых условиях, постоянном совершенствовании алгоритма восстановления АКС и повышении его способности к обобщению и надежности [41].

Факторы, влияющие на реконструкцию пространственного распределения АКС. Это исследование по 3D-реконструкции АКС и фенотипированию корней демонстрирует общее превосходство схемы сканирования с квадратной сеткой над методом концентрических кругов. Теоретически, концентрический круговой метод должен быть более эффективным при обнаружении радиально распространяющихся корней [4], поскольку траектории его сканирования преимущественно перпендикулярны направлению роста корней. Однако его применение в полевых условиях сталкивается с двумя основными ограничениями:

- поддержание постоянного радиуса вращения (turning radius) является сложной задачей, что приводит к накоплению ошибок позиционирования, искажению пространственного распределения мгновенной амплитуды и, следовательно, к менее точной реконструкции АКС;

- на окружностях радиусом менее 60 см измерительный ходометр (survey wheel) имеет тенденцию скорее проскальзывать, чем вращаться, что приводит к сбоям при сборе данных, неточной локализации корней и невозможности идентифицировать сигналы от соседних корней.

Следовательно, выбор метода сканирования требует практического компромисса между ожидаемой корневой архитектурой и полевыми ограничениями. Это исследование еще раз подтверждает выводы о том, что направление роста корней значительно влияет на эффективность их обнаружения [9; 64; 97]. Например, в квадратной сетке сканирование вдоль положительной оси X восстановило только корни S-R1, S-R4 и S-R5, в то время как сканирование вдоль положительной оси Y выявило только корни S-R2, S-R3, S-R6 и S-R7 (рис. 13). Таким образом, для повышения точности обнаружения при обследовании следует использовать несколько направлений сканирования. Эта стратегия гарантирует, что угол между линиями георадарного сканирования и направлением роста корней остается в пределах от 45° до 135° [97], что значительно повышает точность реконструкции АКС [41].

Оптимизация интервала сканирования имеет решающее значение для георадарной съемки подземных объектов. Как правило, более высокая плотность линий сканирования приводит к более высокому разрешению изображения, но это также приводит к существенному увеличению стоимости сбора и обработки данных [85]. Однако на практике не было достигнуто консенсуса относительно оптимального интервала при профилировании корней. Текущие исследования в основном определяют этот параметр эмпирически, в зависимости от конкретных целей обнаружения и полевых условий; в частности:

- для задач идентификации и локализации корней (таких как грубое пространственное картографирование и оценка их диаметра) интервал сканирования обычно устанавливается в диапазоне от 0,3 до 0,5 м [57; 95]. На открытых экспериментальных площадках или у деревьев большего возраста она может быть дополнительно снижена до 1,0 м [100];

- для задачи высокоточной реконструкции пространственного распределения корней интервал должен быть уменьшен до 0,1–0,3 м с целью получения более мелких пространственных деталей [15; 61];

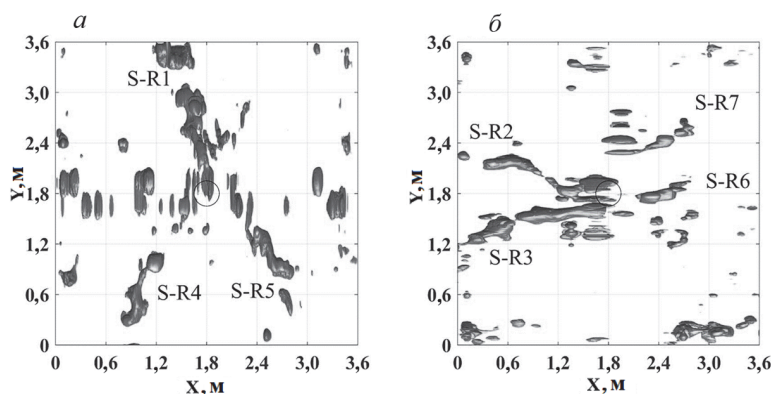


Рис. 13. Реконструкция АКС с использованием однонаправленного георадарного сканирования в направлении оси X (а) и оси Y (б) [41]

– для задачи 3D-реконструкции АКС необходимы измерения с плотной сеткой, требующие интервала порядка 0,05 м [115];

– для задачи получения 3D-изображений корневой системы с полным разрешением интервал сканирования должен удовлетворять теореме Найквиста (*теорема Найквиста, или теорема дискретизации, описывает принцип, который определяет условия, при которых непрерывный аналоговый сигнал может быть точно восстановлен по его дискретизированной версии*); названный интервал для обеспечения дискретизации сигнала без смешанных эффектов (alias-free sample) должен составлять менее четверти длины волны, соответствующей центральной частоте антенны (например, приблизительно 0,01 м для антенны 1600 МГц в почве типичной влажности) [116].

Эти измерительные линии высокой плотности на сантиметровом уровне, как правило, подходят только для детального изучения отдельных образцов корней растений. Для съемки корней в масштабе участка и на больших площадях использование метода получения разреженных линий съемки и интерполяции является приемлемым компромиссом, который может обеспечить качество изображения при значительном снижении затрат [41].

Наконец, результаты проведенного исследования показывают, что точность реконструкции АКС очень чувствительна к установке порога мгновенной амплитуды (A_t). Для систематической оценки его влияния результаты реконструкции оценивались по ряду пороговых значений, увеличенных с шагом 1200. Как показано на рис. 14, а, качество реконструкции значительно варьировало в зависимости от порогового значения. При низких пороговых значениях (≤ 4800) общая пространственная структура корневой системы была различима, но распознавание отдельных корней было затруднено из-за значительного фоновых шума, в результате чего изображения характеризовались высоким уровнем шума, но хорошо сохраняли целостность корней. При средних пороговых значениях ($4800 < A_t \leq 7200$) контуры отдельных корней становились отчетливыми с заметным подавлением шума; однако непрерывность корней постепенно ухудшалась по мере увеличения порога, в результате чего получались изображения с низким уровнем шума и умеренной непрерывностью.

Наконец, при высоких пороговых значениях ($7200 < A_t \leq 9600$) шум был практически устранен, но это сопровождалось сильной фрагментацией корней и потерей пространственных характеристик, что приводило к получению изображений с минимальным уровнем шума, но значительными разрывами. Основываясь на этих результатах, данное исследование было сосредоточено на оптимальном пороговом диапазоне 4800–7200. Влияние порогового значения A_t оценивалось путем количественного определения суммарных абсолютных ошибок для трех ключевых фенотипических параметров реконструированной АКС: длины корня (ΣE_l), азимутального угла (ΣE_ϕ) и угла депрессии (ΣE_θ). Результаты показали, что в диапазоне A_t от 4800 до 6000 эти показатели ошибок

неуклонно возрастали (рис. 14, б). В следующем диапазоне ($6000 < A_t \leq 7200$) суммарные абсолютные погрешности этих трех параметров увеличивались ускоренными темпами с более крутым наклоном. Когда значение A_t было установлено на уровне 6000, ошибки всех корневых фенотипических параметров для восстановленной АКС оставались относительно низкими, что эффективно уравнивало требования как к подавлению шума, так и к сохранению непрерывности. Поэтому в качестве эмпирического оптимального порога для формирования изоповерхности мгновенной амплитуды было выбрано значение A_t , равное 6000. Для дальнейшего подтверждения всеобщности этого порогового значения в будущих исследованиях рекомендуется учитывать большее количество моделей и различные почвенные условия [41].

Таким образом, для получения пространственного распределения подповерхностных АКС предложен метод реконструкции на основе георадара, состоящий из трех основных этапов: во-первых, применение преобразования Гильберта к последовательностям георадарных профилей для преобразования гипербол корневого отражения в пространственную карту мгновенной амплитуды. Во-вторых, построение трехмерного объема данных с мгновенной амплитудой и использование кубической сплайн-интерполяции для повышения его пространственной непрерывности.

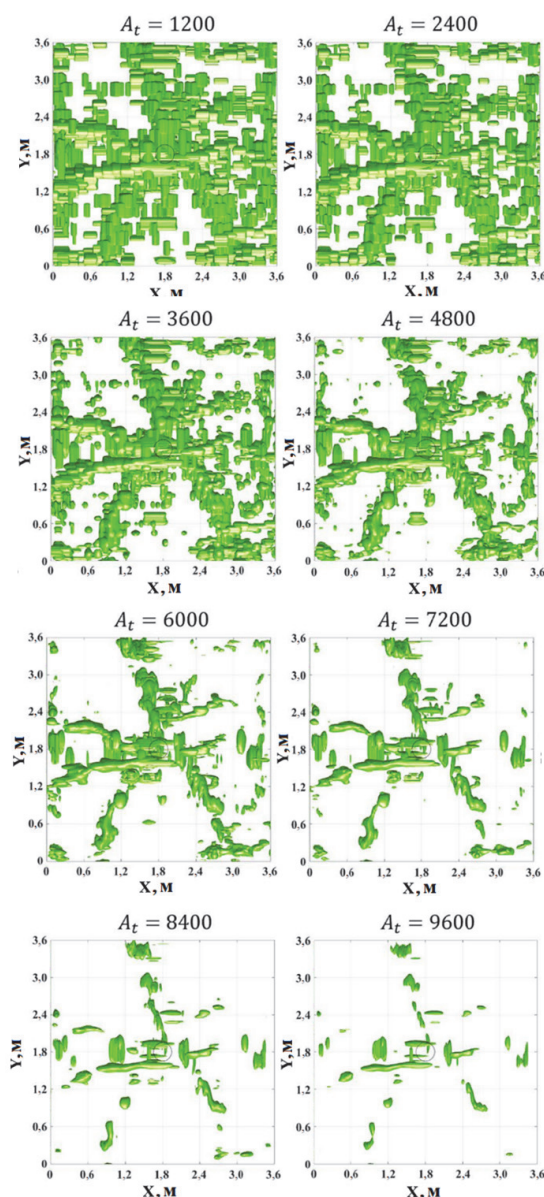
Наконец, извлечение изоповерхностей мгновенной амплитуды из интерполированного С-сканирования позволяет реконструировать пространственное распределение АКС, обеспечивая 3D-реконструкцию и визуализацию. В данном исследовании в качестве примера использована корневая система 9-летнего триплоидного тополя в городском лесопарке, чтобы проверить эффективность и осуществимость предложенного метода реконструкции пространственного распределения АКС. Исследование показало, что:

– георадар с частотой 1600 МГц может эффективно реконструировать пространственное распределение корней со средним диаметром более 1 см на глубине до 0,4 м в условиях супесчаного суглинка;

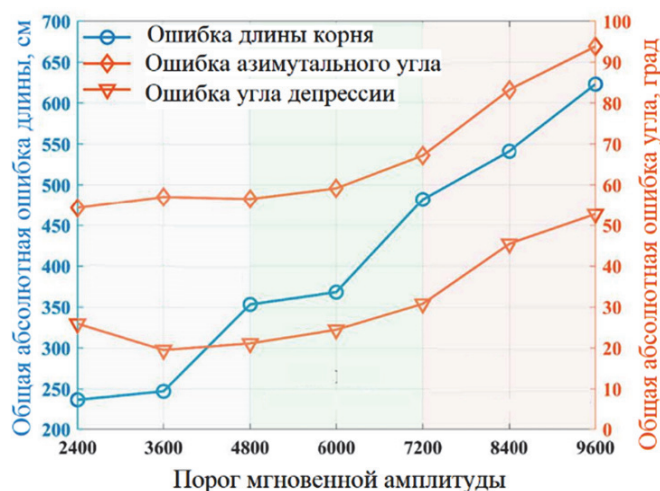
– АКС, восстановленная с использованием схемы сканирования с квадратной сеткой, работает лучше, чем схема концентрического кругового сканирования и схема сканирования профиля в одном направлении. Точность восстановления АКС с использованием схемы с квадратной сеткой составляет приблизительно 89 %;

– величина диаметра корня влияет на точность восстановления АКС. Когда средний диаметр корня составляет от 1 до 2 см, точность восстановления длины корня составляет 67,4 %. Когда средний диаметр корня превышает 2 см, точность восстановления длины корня колеблется от 86,0 до 95,5 %.

Выполненное исследование обеспечивает техническую базу для мониторинга корневой системы деревьев, закладывая основу для мониторинга роста корней, анализа взаимодействия корней с почвой и изучения роли корней в стабилизации почвы и связывании углерода [41].



а



б

Рис. 14. Результаты реконструкции АКС при различных пороговых значениях мгновенной амплитуды (а) и общая абсолютная ошибка фенотипирования корней при различных пороговых значениях мгновенной амплитуды (б) [41]

ОЦЕНКА ДИАМЕТРА И БИОМАССЫ КОРНЕЙ ДЕРЕВЬЕВ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРА

Деревья поглощают углекислый газ из атмосферы посредством фотосинтеза, накапливая его в ветвях, стволах и корнях, где подземная доля углерода, составляющая примерно четверть от общего количества, демонстрирует значительную межвидовую изменчивость корневой биомассы. Оценка количества углерода, накопленного в корнях деревьев различных видов, является ключом к пониманию важного аспекта изменения климата и изучению того, как естественные леса, политика в области посадки деревьев в городах и проекты по лесовосстановлению могут помочь в решении этой проблемы. В этом контексте одним из наиболее известных методов неразрушающего контроля, позволяющих оценить диаметр и длину корней на разной глубине, являются геотехниче-

ские исследования с проникновением в грунт благодаря точности определения местоположения погребенного материала в различных условиях, хотя стандарты для правильного управления наборами данных, относящимися к подземным корневым системам, еще не разработаны [82].

При работе с высокочастотными электромагнитными методами (>1 МГц) важную роль играет диэлектрическая проницаемость среды. Для частот от 1 до 2,6 ГГц диэлектрические свойства материалов определяет содержание воды, поскольку относительная проницаемость для воды в десять раз превышает характеристическую диэлектрическую проницаемость корней. Высокочастотные антенны обеспечивают лучшие результаты на сухих почвах с электрическим сопротивлением, поскольку затухание прямо пропорционально электропроводности среды. Чем выше электропроводность почвы, тем быстрее затухание

электромагнитной волны [7]. Как уже отмечалось выше, биомасса скелетных корней увеличивается с повышением концентрации CO_2 , что указывает на то, что корни могут поглощать избыточный CO_2 из атмосферы [94]. Чтобы лучше понять экологическую функцию корней, необходимо оценить такие параметры, относящиеся к корням, как диаметр корней, их биомасса, распределение и трехмерная архитектура [18].

Исследование крупных корней с помощью георадара было выполнено для различных типов почв и видов растений [6; 58], в том числе с целью оценки диаметра корней на основе графического представления полученных данных в виде радарограмм [4; 57]. Однако получаемые результаты зависели от почвенных условий, электромагнитных свойств корней, частоты георадарной антенны и глубины залегания корней [4; 20; 101].

Для оценки диаметра корней и их биомассы была использована интенсивность сигнала, определяемая с помощью георадара по величине площади амплитуды [20]. При этом коэффициенты детерминации между извлеченной интенсивностью сигнала и диаметром корня на глубинах 15 и 30 см составили 0,81 и 0,55 соответственно (рис. 15), а коэффициент детерминации связи интенсивности сигнала и биомассы корня составил 0,55 (рис. 16). В первую очередь, это было связано с влиянием ослабления энергии радиолокационного сигнала с глубиной [20].

В последующих исследованиях исследователи усовершенствовали метод обработки радиолокационных данных и получили коэффициент детерминации

0,68 между параметром данных и биомассой корней; однако это было применимо только к корням на одинаковой глубине [49; 94]. Напротив, при радарной оценке диаметра ствола по параметрам формы отражающей волны на разных глубинах коэффициент детерминации составил 0,89 (рис. 17) [12]. Правда, эксперимент был проведен в идеальных для георадара условиях песчаных почвогрунтов.

Следующие два подраздела посвящены описанию двух экспериментов с использованием формы отражающей волны георадара, один из которых связан с оценкой диаметра корня, а второй – с оценкой диаметра корня и его биомассы.

Оценка диаметра корней деревьев по форме отражающей волны георадара. В Бразилии на примере трех видов – *Schizolobium parahyba*, *Mangifera indica* и *Acacia farnesiana* (L.) Willd. – была исследована возможность определения фактического диаметра скелетных корней с помощью георадарных данных и преобразования Гильберта [82]. Согласно принципу работы георадара (рис. 18), излученные электромагнитные волны возвращаются в виде отраженных, дифрагированных и преломленных волн [7]. Электрический сигнал преобразуется в цифровой сигнал и распределяется по трассам, которые представляют изменения амплитуды электромагнитного сигнала в зависимости от времени прохождения. По набору следов, полученных по траектории или времени, с одинаковым расстоянием между антеннами, формировалась радарограмма [82].

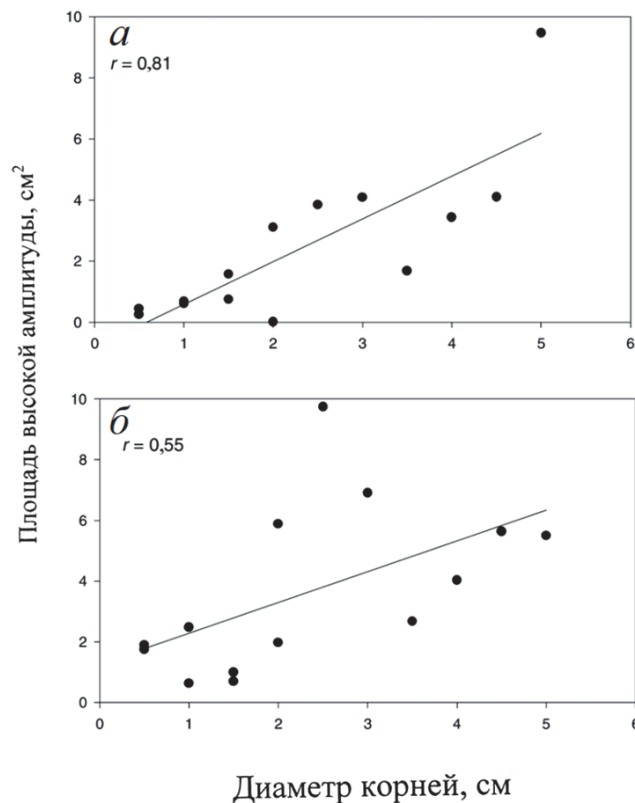


Рис. 15. Связь площадей высокой амплитуды отражения, полученных по радиолокационным профилям, с диаметром корней сосны ладанной на глубине 15 см (а) и 30 см (б) [20]

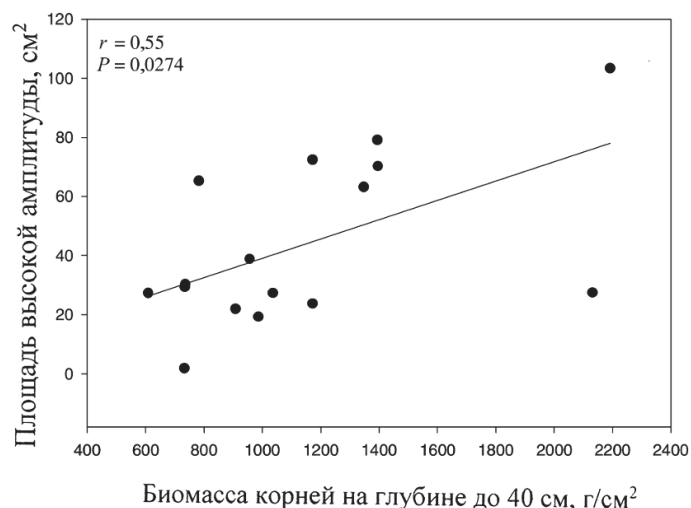


Рис. 16. Связь площадей высокой амплитуды отражения, полученных по радиолокационным профилям, с биомассой корней на глубине 40 см [20]

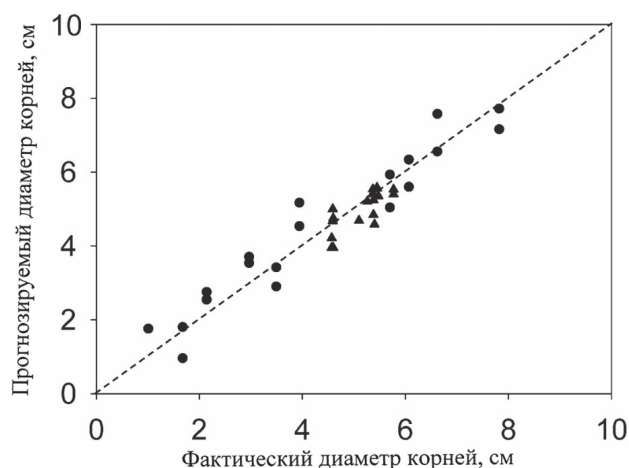


Рис. 17. Соотношение диаметра корней эвкалипта, оцененного по параметрам формы отражающей волны радара на глубинах 15–155 см, и его эмпирическими значениями. Пунктирная линия показывает соотношение 1:1 [12]

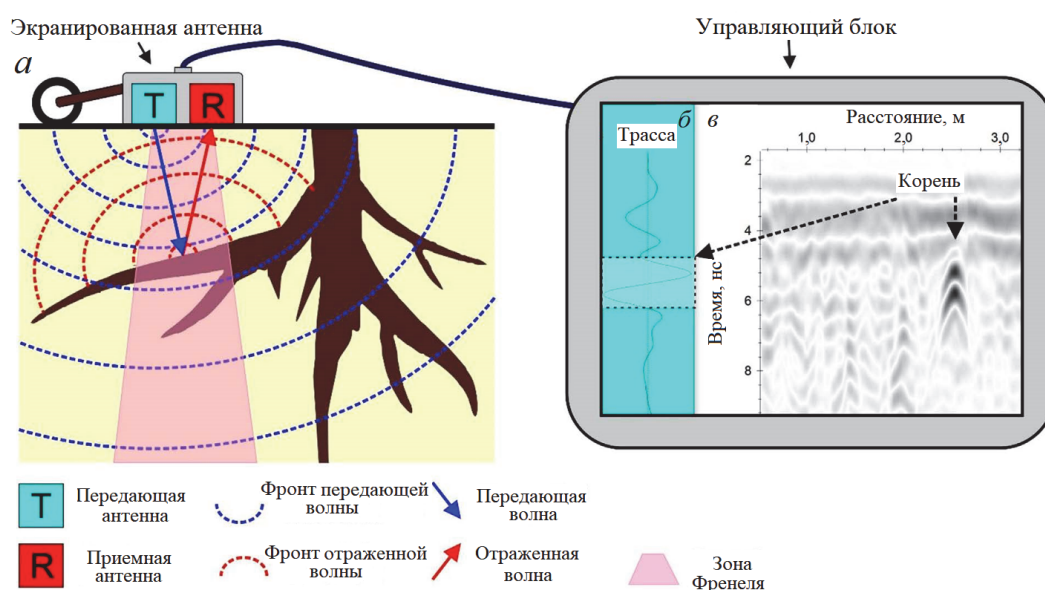


Рис. 18. Графическое изображение распространения электромагнитной волны георадара в однородной среде при наличии корней (а); георадарный импульс, зарегистрированный при наличии корня (б); радарограмма с указанием гиперболы, связанной с корнем (в) [82]

Для сбора данных был использован георадар модели SIR-3000 (производства Geophysical Survey Systems, Inc.), оснащенный парой экранированных антенн с центральной частотой 900 МГц и одометрическим колесом. Данные были получены с помощью метода фиксированного расстояния между антеннами, при котором пара антенн (передающая и приемная) одновременно перемещаются вдоль каждого профиля, что позволяет визуализировать отражения от объекта в режиме реального времени. Данные были собраны по профилям длиной 4 м, расстояние между которыми равнялось 5 см. Набор 2D георадарных сечений, полученных с таким небольшим расстоянием между профилями, позволяет выполнять интерполяцию всех трасс в 3D-формате [46]. Диаметры корней были измерены вначале на двумерных георадарных снимках, а затем непосредственно на вскрытых корнях, от пня до их окончаний. В ходе натурных измерений для каждого дерева было отобрано 10 модельных корней разного диаметра [82].

Затем были разработаны синтетические модели с использованием программного обеспечения ReflexW версии 7.5 [89]. Программа обеспечивала моделирование распространения электромагнитных волн, используя входные значения диэлектрической проводимости и диэлектрической проницаемости для каждой координаты x и z . Алгоритм моделирования использует метод конечных разностей во временной области для решения уравнений Максвелла. Было создано 16 различных моделей, в которых варьировали значения диэлектрической проницаемости почвы, электропроводности почвы, диаметра корней и глубины их залегания. Названное варьирование было необходимо, чтобы провести синтетический контролируемый эксперимент по изучению сложной корневой системы, представленной в реальном наборе данных [82].

Для создания конечно-разностной модели с численной эффективностью было необходимо определить горизонтальное пространственное приращение (dx) как функцию вертикального приращения (dz). Пространственное приращение dx зависит от кратчайшей длины волны λ согласно уравнению (24):

$$\lambda = c / f \cdot \sqrt{\epsilon}, \quad (25)$$

где центральная частота f равна 900 МГц, а скорость в вакууме c равна 0,3 м/нс. Для определения временно-го приращения dt , учитывающего численную стабильность, использовано уравнение (2) [96]:

$$dt \leq c \cdot \sqrt{\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dy^2} + \frac{1}{dz^2}}. \quad (26)$$

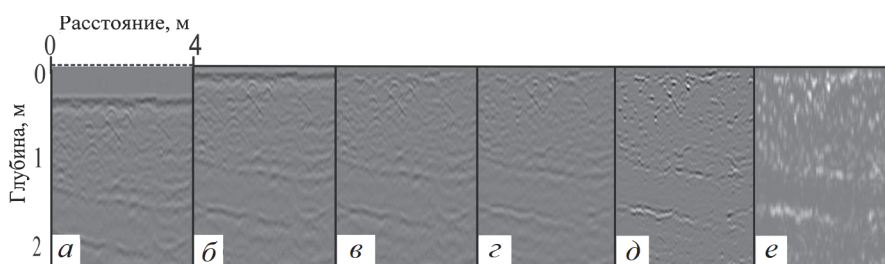


Рис. 19. Исходные данные (а); радарграмма после коррекции по нулевому времени (б); удаление фона (в); снижение усиления (г); миграция по Столту (д) и преобразование Гильберта (огibaющая трассировки) (е) [82]

Был установлен временной интервал dt , равный 0,0046 с, и пространственный интервал dx , равный 0,0028 м. В качестве источника использована плоская волна Кюппера с центральной частотой 900 МГц, имитирующая антенну, которая была использована для сбора фактических данных. Корень-мишень была определена в виде круглого слоя на разной глубине (20, 30, 40 и 50 см) и в виде круглого слоя разного диаметра (10 и 20 см). После обработки данных те же показатели были извлечены из синтетических радарграмм и проанализированы аналогично полученным реальным данным [82].

В каждом конкретном применении георадара для идентификации корней в условиях окружающей среды были разработаны процедуры обработки данных, включая стандартизацию георадарных снимков, снижение уровня шума, миграцию и преобразование Гильберта [48; 104]. Рабочий процесс обработки сигнала показан на рис. 19. Он состоял из преобразования в формат файла необработанных данных (а), настройки коэффициента усиления (б), удаления фона (в) снижения коэффициента усиления (г) и миграции по Столту (д). Преобразование времени в вертикальное расстояние было выполнено с помощью гиперболической корректирующей скорости, определяемой с точностью до 0,12 м/нс. Полученные данные (рис. 5, е) преобразуются из данных истинной амплитуды в огibaющую трассы. Согласно Сандмейеру [89], миграция по методу Столта работает в области частотных волновых чисел (fk). Миграция направлена на отслеживание отраженной и диффигированной энергии обратно к источнику (рис. 19, д).

Огибающая трассы – это амплитуда преобразования Гильберта. Большие амплитуды на участке огибающей интерпретируются как корни. В огибающей трассы измеряются корни (расстояние между верхней и нижней частями корня) с использованием шкалы глубины для преобразования их в сантиметры. Оцененные диаметры по радиогаммам и фактические значения диаметров корней были сопоставлены с использованием модели линейной регрессии. Чтобы ослабить эффекты гетероскедастичности и устранить нелинейность, исходные данные зависимой переменной были экспоненциально преобразованы [82].

В итоге установлено, что остаточные ошибки для экспоненциально преобразованного набора данных были гомоскедастичными. Линейная регрессия для экспоненциально преобразованного набора данных показала наличие R^2 , равного 0,965, что указывает на надежность прогнозирования диаметров корней по георадарным изображениям (рис. 20).

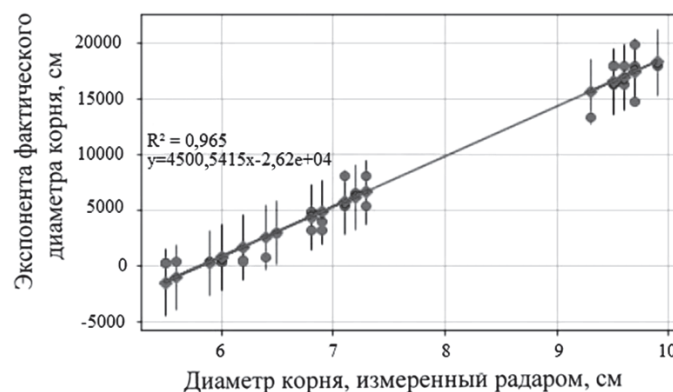


Рис. 20. Соотношение толщины корней, измеренной в полевых условиях и с помощью 2D-георадарного сигнала [82]

Таким образом, показана тесная корреляция между диаметром корня, измеренным с помощью георадара, и измеренным непосредственно после вскрытия. Тем не менее, в данной области исследований остаются некоторые открытые вопросы, например, как влияют на результаты георадарного зондирования содержание воды в почве и в корнях, различия в глубине залегания корней, толщине корней и их ориентации относительно направления волны [14]. Необходимо дальнейшее совершенствование программных средств постобработки для интеграции полевых данных и данных георадара с целью разработки более совершенных статистических решений [82].

Оценка диаметра и биомассы корней деревьев по форме отражающей волны георадара. Как уже отмечалось выше, точность оценки биомассы корней по-прежнему неудовлетворительна, поскольку в современных моделях для ее расчета используется информация об энергии отраженной волны, которая обычно уменьшается с увеличением глубины залегания корней и сильно зависит от почвенных условий, таких как влажность или содержание глины. И наоборот, параметры формы отраженной волны радара, используемые при оценке диаметра корня, не зависят от глубины и нечувствительны к шуму. Поэтому для построения зависимости диаметра корня и последующей оценки его биомассы на основе зависимости между диаметром корня и биомассой более перспективным является использование параметров формы отраженной волны георадара [29].

На песчаных дюнах Внутренней Монголии (Китай) были исследованы возможности применения георадара для оценки диаметра и биомассы корней на примере вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.). Целями исследования были:

- проверка потенциала георадарных данных высокого разрешения (частота 2 ГГц) для оценки диаметра и биомассы корней деревьев в полевых условиях;
- поиск подходящего параметра формы отраженной волны георадара для построения модели оценки диаметра корней с помощью передовой технологии цифровой обработки сигналов; и
- разработка метода оценки биомассы корней на основе модели оценки диаметра корней с помощью георадара.

Корни были выкопаны и из них были отобраны отрезки длиной 70 см, которые были взвешены в свежем состоянии и у них штангенциркулем измерены диаметры. Затем они были разделены на шесть классов в зависимости от среднего диаметра – 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,5 см. Для каждого класса было отобрано по двенадцать корней, которые были пронумерованы как 1, 2, ..., 12 [29].

Для проведения исследования была вырыта траншея длиной 4,2 м, шириной 1,2 м и глубиной 1,2 м. Перпендикулярно обеим стенкам траншеи были просверлены шесть отверстий с горизонтальными интервалами в 60 см. Расстояние по вертикали от уровня земли до отверстий составляло 10, 20, 30, 40, 60 и 80 см (рис. 21, а). В отверстия на одной стороне траншеи были вставлены шесть корней, пронумерованных от 1 до 6, из одного класса корней, так чтобы каждый корень выходил наружу за пределы отверстия примерно на 5 см (рис. 21, б). Корни, пронумерованные от 7 до 12, были вставлены таким же образом в противоположную стенку траншеи. Затем траншея была засыпана песком, а поверхность выровнена [29].

В эксперименте использована полевая портативная георадарная система Zone-12e (Radar Systems, Inc.) с частотой 2 ГГц. В ходе эксперимента для каждой стороны траншеи было намечено шесть трансект с интервалом в 10 см перпендикулярно корням (рис. 21, б), вдоль которых перемещалась антенна радара, чтобы получить двумерный радиолокационный профиль. Таким образом было получено шесть радиолокационных профилей для корней каждого класса. Затем измеренные корни заменены корнями другого класса, и были проведены те же измерения. Весь процесс повторялся шесть раз, пока не были измерены все корни разных классов диаметра. Радиолокационные профили для корней 1–6 для каждого класса диаметров были использованы для построения оценочных моделей, а данные из корней 7–12 – для проверки модели. Однако трудно измерить скелетный корень длиной в несколько метров с помощью георадара в соответствии с описанным выше методом. Поэтому корни разного диаметра, измеренные на одной и той же глубине с помощью георадара, были виртуально соединены и сформирован единый скелетный корень. Обычно отраженный профиль георадара содержит

посторонние отражения. Поэтому была проведена предварительная обработка данных по аналогии с процедурой, изложенной в предыдущем разделе [29].

Была разработана следующая последовательность оценки биомассы скелетных корней с помощью георадара:

- измерить среднюю плотность корней, собрав небольшое количество образцов корней;
- построить модель оценки диаметра корня на основе георадара и затем оценить диаметр корня;
- рассчитать объем корня, используя его диаметр, исходя из предположения, что крупные корни имеют цилиндрическую форму;
- рассчитать биомассу крупных корней, используя плотность корня и его объем.

При оценке биомассы корней с помощью данного метода ключевым фактором является точный замер их диаметра. Поэтому на основе информации, полученной с помощью георадара, необходимо было найти параметр, существенно влияющий на диаметр корней. С использованием программного обеспечения Gaia-Spectrum (Reinaldo Alvarez-Cabrera Geoscanners AB,

Швеция) для извлечения релевантной информации была выбрана трасса, проходящая через центр каждого корня в каждом профиле (рис. 22, а). Поскольку скорость распространения радиолокационной волны на коротких расстояниях изменяется незначительно, было обнаружено, что параметр ΔT , или время между моментом, когда волна достигает нижней части корня, и моментом, когда она достигает его верхней части, имеет отношение к диаметру корня (рис. 22, б). Кроме того, параметр ΔT определяет внутреннюю характеристику формы сигнала, который легко извлекается и не зависит от глубины положения корня, и этот параметр ΔT использовался для анализа взаимосвязи с диаметром корня [29].

По данным, полученным для каждого радиолокационного профиля, установлены связи диаметра корня на разной глубине (рис. 23, а) и его биомассы (рис. 23, б) с параметром ΔT характеризующиеся R^2 , равным соответственно 0,88 и 0,79. Это означает, что для оценки диаметра корней параметр ΔT был более подходящим, чем для их биомассы.

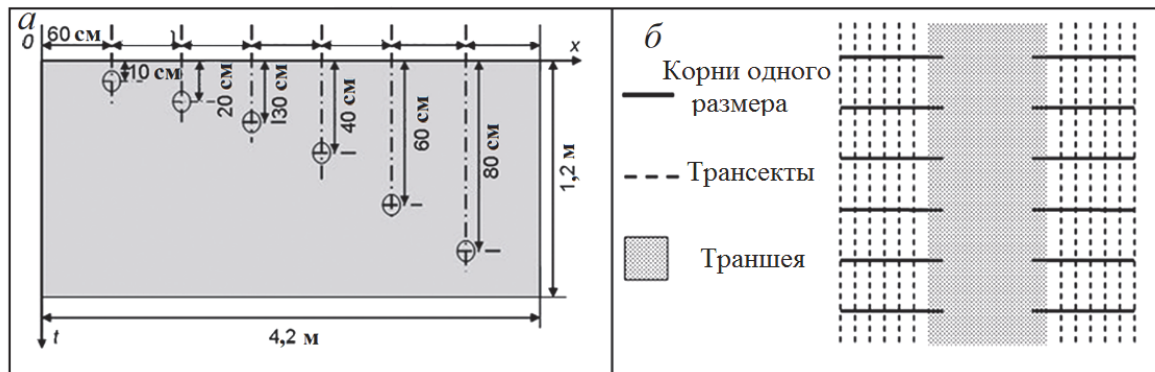


Рис. 21. Расположение корней в стенке песчаной траншеи (а) и расположение корней, зарытых в песок (сплошные горизонтальные линии), и разрезы, вдоль которых была ориентирована антенна радара (прерывистая вертикальная линия) (б) [29]

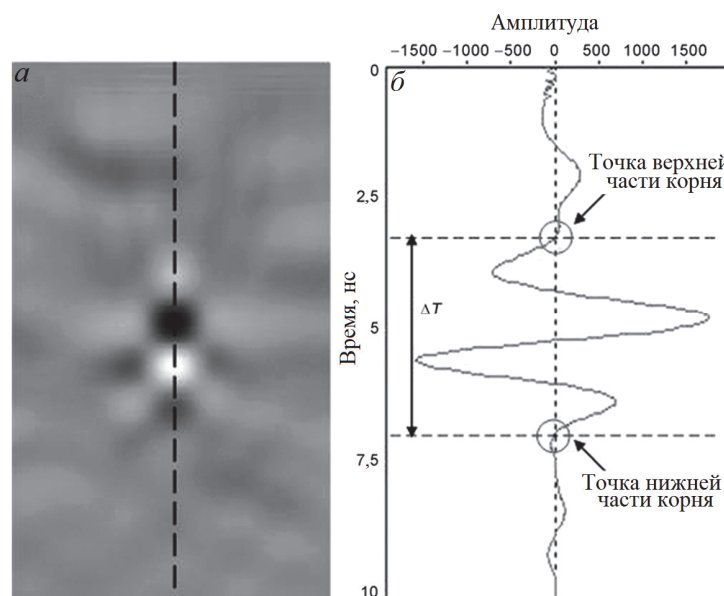


Рис. 22. Трасса, извлеченная из обработанного профиля с частотой 2 ГГц по средней линии корня (а), и параметр ΔT , извлеченный из трассы (б) [29]

Для образцов корней, пронумерованных 1–6, была разработана модель оценки диаметра корня путем проведения регрессионного анализа с использованием параметра ΔT в качестве независимой переменной (рис. 24, а), характеризуемая значением R^2 , равным 0,87. Проверка модели, основанная на независимых данных о корнях с номерами 7–12 на противоположной стороне траншеи, показала наличие R^2 , равного 0,86, и это означает, что модель, основанная на данных георадара, эффективно и точно оценивает диаметр корня [29].

Биомасса корней с номерами 7-12 дополнительно оценена на основе расчетного диаметра, полученного по данным георадара. При этом каждый образец корня рассматривался как цилиндр, а его биомасса рассчитана по формуле

$$W_m = \frac{1}{4} \pi D_m^2 l d, \quad (27)$$

где W_m – биомасса корня; D_m – диаметр корня, рассчитанный с помощью модели, основанной на георадаре; d – средняя плотность образцов корней и l – длина корня. Результат оценки биомассы корней (рис. 25, а) характеризуется значением R^2 , равным 0,84. Кроме

того, с использованием изложенного метода была оценена биомасса каждого из 75 длинных корней, которые были смонтированы из нескольких коротких корней, и было получено хорошее соответствие расчетных и фактических данных ($R^2 = 0,82$) (рис. 25, б). В целом, предложенный метод оценки биомассы является выполнимым и надежным независимо от длины корня [29].

Основной целью данного исследования была разработка метода оценки биомассы корней с использованием диаметра корней и их средней плотности. Ключевым фактором в оценке биомассы является точная оценка диаметра корней на основе параметра ΔT , полученного с помощью антенн с частотой 2 ГГц. Основное преимущество параметра ΔT заключается в том, что он зависит только от формы отраженной волны и не зависит от амплитуды, которая уменьшается с увеличением глубины залегания объекта. Соответственно, его можно использовать для точной оценки диаметра и биомассы корней без учета глубины положения корня. Очевидно, что предложенный метод является более надежным и точным, чем существующие модели, которые оценивают биомассу корней по интенсивности сигнала георадара.

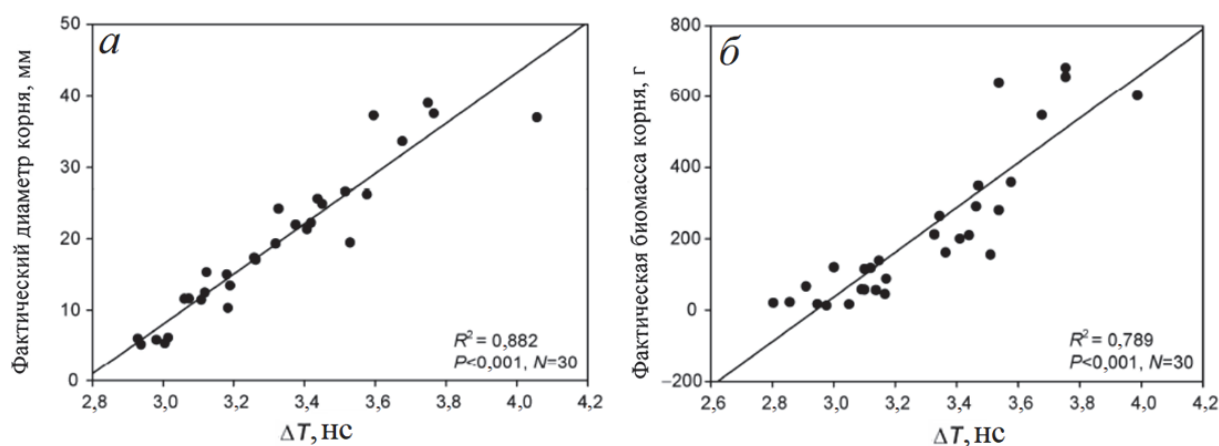


Рис. 23. Зависимость фактического диаметра корня на разной глубине (а) и фактической свежей биомассы корня (б) от величины ΔT [29]

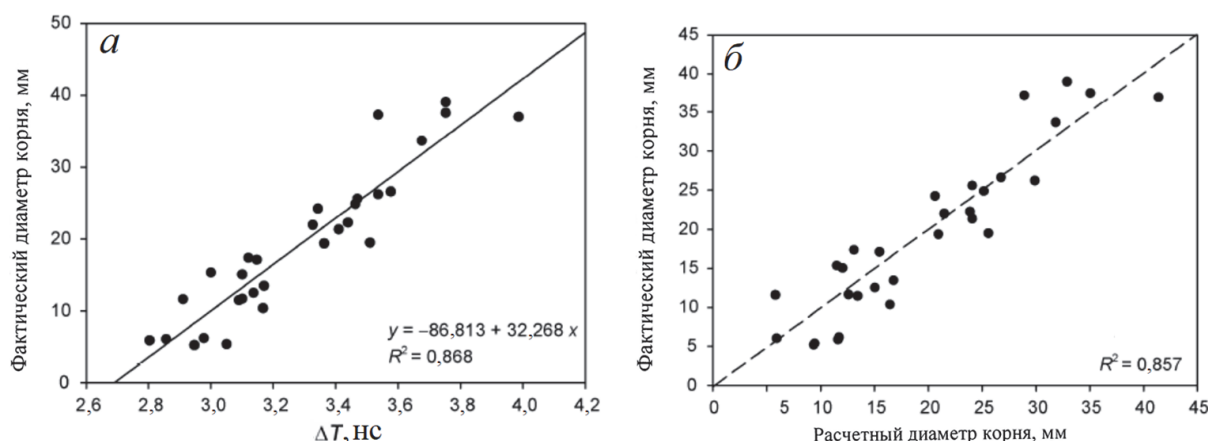


Рис. 24. Зависимость фактического диаметра корня от величины ΔT на основе данных обнаружения корней под номерами 1-6 (а) и от прогнозируемого диаметра корня с использованием эмпирической модели (рис. 8, а) на основе данных обнаружения корней под номерами 7-12 (б). Пунктирная линия показывает соотношение 1:1 [29]

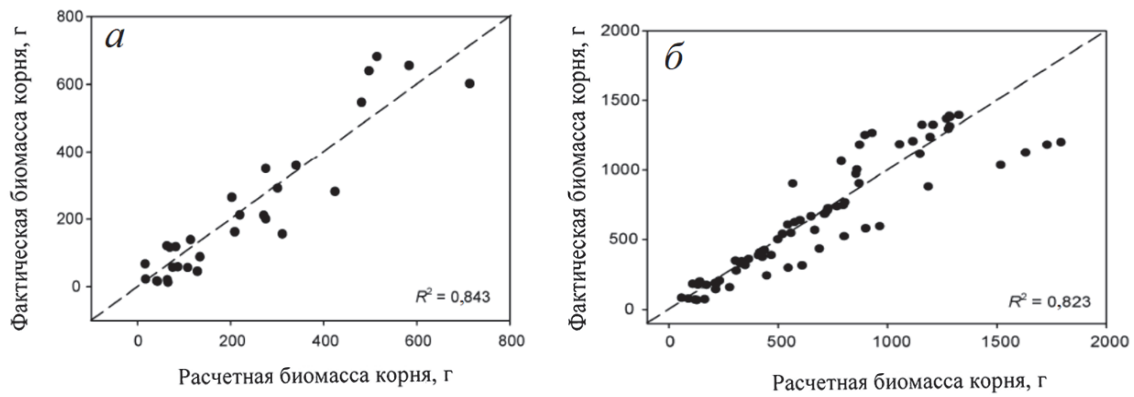


Рис. 25. Проверка модели на основе прогнозируемой биомассы. Соотношение фактической и прогнозируемой биомассы отрезков корней (а) и цельных корней (б). Пунктирная линия представляет собой соотношение 1:1 [29]

Однако метод имеет некоторые ограничения [29].

1. Исследование было основано на предположении, что форма скелетных корней цилиндрическая или коническая, в то время как фактически она довольно сложная, что показано на рис. 18 предыдущего раздела. Поэтому предстоит разработать метод георадарного картирования сложных корневых систем.

2. Антенна с частотой 2 ГГц обладает высоким пространственным разрешением, но с довольно ограниченной глубиной обнаружения (менее 80 см). Поэтому предстоит найти способ, который объединял бы высокое пространственное разрешение антенны с частотой 2 ГГц и оптимальную глубину обнаружения с низкочастотной антенной.

3. Эксперимент проводился в почти идеальных условиях песчаных дюн, наиболее подходящих для обнаружения корней радаром. При этом корни были без пересечений, а направление антенны радара было перпендикулярно осям корней. Обычно же состав почв неоднороден, а корни растут в разных направлениях, срastaются или собираются в кластеры. Это может привести к получению более сложных георадарных данных и повлиять на точность оценки биомассы корней. Поэтому оценка параметров корней с помощью георадара в естественных условиях по-прежнему остается сложной задачей.

ОЦЕНКА БИОМАССЫ СКЕЛЕТНЫХ КОРНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОРАДАРА НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Исследования показали, что количество и распределение крупных корней может быть получено быстро и точно путем интерпретации радарограммы [106]. В этом смысле радарограмма аналогична профилю почвы, используемому в традиционных методах измерения корней на стенках траншеи. При традиционном методе количество и пространственное распределение корней, наблюдаемых в стенке траншеи, являются важными параметрами в экологических исследованиях корней [90]. Была предложена геометрическая модель для расчета массы корней на основе их количества, полученного подсчетом на стенке траншеи, показавшая, что количество корней может быть полезным для быстрой оценки биомассы корней в полевых условиях [90].

Однако процесс отбора проб в траншеях является трудоемким и разрушительным, что затрудняет наблюдение за количеством и пространственным распределением корней в профиле почвогрунта. Технология георадара позволяет быстро, просто и неразрушающим образом подсчитать количество корней (количество корней, идентифицированных на радарограммах) в измеренных профилях. Был предложен простой неразрушающий метод оценки биомассы крупных боковых корней кустарников, основанный на количестве корней, полученных с помощью георадара [113]. Данные о корнях были собраны на основе полевых экспериментов с использованием георадара с центральными частотами антенны 900 и 400 МГц. В качестве объектов измерения были выбраны пять кустов караганы мелколистной (*Caragana microphylla* Lam.) разных размеров, и для сбора георадарных данных было установлено в общей сложности 40 линий съемки. Для получения общей биомассы корней на каждой радарограмме использовался метод выемки грунта по профилям. Модель для оценки биомассы корней была построена путем установления взаимосвязи между биомассой корней в каждом профиле и количеством корней, интерпретируемым по радарограммам. Разработанные модели обеспечили высокую достоверность оценки сухой биомассы корней с использованием георадарных данных, полученных на двух частотах антенны. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,73 для частоты 900 МГц и 0,71 для частоты 400 МГц [113].

С целью разработки модели пространственного распределения биомассы корней с помощью георадара и установления корреляции между площадью кроны и характеристиками пространственного распределения корней, в автономном районе Внутренняя Монголия в Китае было выполнено исследование в сообществе караганы мелколистной [112].

Для обнаружения корней использована портативная двухчастотная георадарная система RIS MF Hi-MOD с центральной частотой антенны 900 МГц. Вокруг ствола кустарника были проложены десять или более концентрических линий с интервалом 0,2 м, формирующих зону георадарной съемки. Радиус каждой линии съемки варьировал от 0,4 до 3 м (рис. 26). Георадарные данные обрабатывались с использованием пакета RGPR, включающего весь комплекс предвари-

тельной обработки георадарных гиперболических сигналов, отраженных корнями. После обработки радиолокационного изображения на радарограммах появились сигналы гиперболического отражения корней. После обработки гиперболические сигналы, отраженные корнями, были автоматически извлечены с использованием усовершенствованного метода YOLOV4 [62].

Упомянутые выше модели [113] были использованы в данном исследовании [112] по оценке биомассы скелетных корней с использованием георадара на основе логистической модели. С помощью упомянутого соотношения, основанного на данных георадара с частотой 900 МГц, количество корней было преобразовано в сухую биомассу корней.

В этом исследовании для определения пространственной структуры распределения биомассы корней кустарников в горизонтальном направлении использована логистическая модель (28):

$$y = \frac{A}{1 + be^{-kx}}, \quad (28)$$

где y – суммарная биомасса корней, соответствующая диапазону x ; x – это радиальное расстояние до центра ствола кустарника; A , b , k – постоянные, которые получают путем подгонки.

Логистическая модель широко используется при изучении размеров особей и популяций, количества и густоты растений. Она была применена для характеристики глобальных закономерностей распределения глубины залегания корней по различным типам растительности [91]. В предыдущем исследовании [38] было обнаружено, что площадь корневой системы (см^2) в комплексных системах «карагана – травяной покров» увеличивалась, а затем уменьшалась с увеличением расстояния по горизонтали от кустов караганы.

В данном исследовании [112] было измерено 58 кустарников с площадью кроны от 0,64 до 7,79 м^2 и высотой от 0,5 до 1,79 м. Количество измерительных линий варьировало от 10 до 14 в зависимости от размера кустарников. В качестве примера взяты два отдельных кустарника. Ширина кроны первого кустарника составляет 3,5 м, а начальный радиус измерений для георадарного сканирования равен 1,2 м. Ширина кроны второго кустарника составляет 2,3 м, а начальный радиус измерения равен 0,4 м. Хотя характеристики распределения корневой системы и начальное расстояние измерения варьировали у кустов разных размеров, характеристики распределения корней в горизонтальном направлении эффективно описаны логистической моделью ($R^2 = 0,999$ и $0,996$ соответственно) (рис. 27).

Были выделены три признака корней на основе параметров адаптированной логистической модели. Параметр A представляет общую биомассу корневой системы кустарника. Зона активного роста корней, рассчитанная с использованием $\ln b/k$, представляет собой область с наиболее активным ростом, демонстрирующую наибольшую биомассу корней в горизонтальном направлении. Скорость роста корней, равная параметру k , отражает способность корней осваивать новые ресурсы почвы.

Для анализа метода эффективной оценки признаков корней и пространственного распределения их

биомассы использована взаимосвязь между площадью кроны и выделенными признаками корней (т. е. параметрами логистической модели). Модели, рассчитанные по данным отдельных кустов, характеризовались средним значением R^2 , равным 0,990. Логистические модели показали хорошую эффективность при описании пространственного распределения корневой системы кустарников (рис. 28).

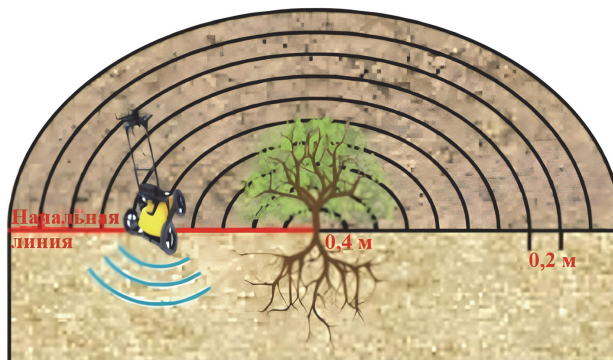


Рис. 26. Принципиальная схема закладки линии георадарной съемки [112]

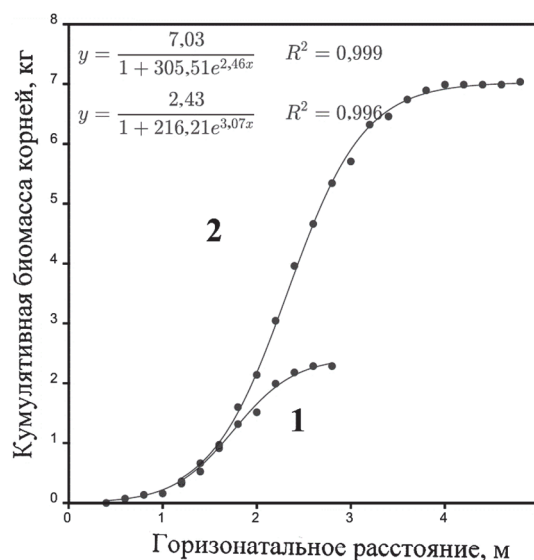


Рис. 27. Согласно логистической модели суммарная биомасса корней изменяется с увеличением абсолютного расстояния по горизонтали для двух кустов с диаметром кроны 2,3 (1) и 3,5 м (2); соответственно $R^2 = 0,996$ и $0,999$. Абсолютное расстояние по горизонтали равно радиальному расстоянию от ствола [112]

Критические характеристики корней для 58 отдельных кустов были получены непосредственно из адаптированной логистической модели, представленной на рис. 28. Эти характеристики включают общую биомассу корней, зону активного роста и скорость роста корней. Эти критические свойства корней связаны с параметрами логистической модели. Средняя общая биомасса корней и скорость их роста составили 1,45 кг и 3,64 г соответственно. Средний радиус кроны составляет 0,99 м, что указывает на то, что зона с максимальной биомассой корней постоянно выходит за пределы кроны ($1,41 \text{ м} > 0,99 \text{ м}$, $1,49 > 1$).

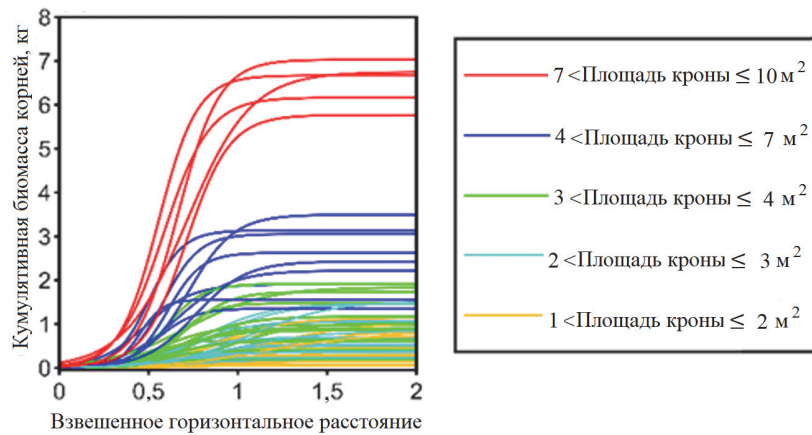


Рис. 28. Суммарная биомасса корней, как логистическая функция расстояния по горизонтали для отдельных кустов, для разных площадей кроны [112]

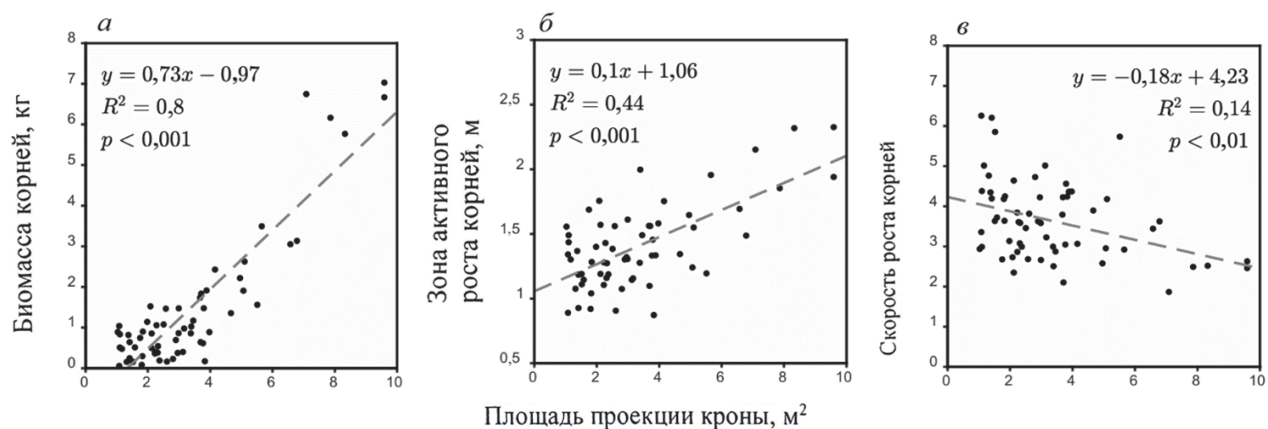


Рис. 29. Зависимость общей биомассы корней, кг (а), зоны активного роста корней, м (б) и скорости роста корней (в) от площади кроны [112]

Корреляция между площадью кроны и признаками корней показана на рис. 29. Очевидно, что с увеличением горизонтальной проекции площади кроны общая биомасса постепенно увеличивалась, а зона активного роста становилась все более удаленной, при этом R^2 составил 0,80 и 0,44 соответственно. С другой стороны, существует отрицательная корреляция между площадью кроны и скоростью роста корней, характеризуемая значением R^2 , равным 0,14.

Таким образом, по данным георадара определено пространственное распределение биомассы корней караганы в горизонтальном направлении и установлено, что оно соответствует логистической модели. Из адаптированной логистической модели извлекаются такие критические характеристики корневой системы, как общая биомасса корней, зона активного роста корней и скорость их роста. Параметры логистической модели также могут быть оценены по площади проекции крон, которая может быть быстро вычислена с помощью БПЛА. Сочетание данных дистанционного зондирования и взаимосвязи между площадью крон и характеристиками корней может быть использовано для составления карт биомассы корней в крупных регионах. Георадарная съемка расширяет возможности исследований архитектуры корневой системы растений и взаимодействия надземной и подземной частей [112].

ОЦЕНКА БИОМАССЫ СКЕЛЕТНЫХ КОРНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОРАДАРА И ПОЧВЕННЫХ КЕРНОВ

Было выполнено исследование [9], в котором рассматривалась методология сканирования и разных конфигураций его трансект с использованием антенны 1500 МГц с целью мелкомасштабной оценки биомассы, распознавания мертвых корней и решения проблем, связанных с затенения корней в почвенном профиле.

Место проведения исследования находилось в экологическом заповеднике Блэкуотер, штат Вирджиния, США. Большая часть территории заповедника состояла из песчаных равнин и смешанных дубовых насаждений на песчаных холмах. Смешанное дубовое насаждение было выбрано из-за относительно низкой густоты деревьев, обеспечивающей достаточно места для работы при обеспечении необходимой густоты корней, и идеального состава почвогрунта для георадарного сканирования [9].

Ранее было показано, что георадар позволяет диагностировать корни диаметром до 2–5 мм с помощью антенны частотой 1500 МГц [20], и эта частота признана предпочтительной для оценки биомассы корней. Однако в упомянутых исследованиях использовались только трансекты с однонаправленным сканированием [19; 29; 87; 88] или ортогональные трансекты с двунаправленным сканированием [16; 28; 37].

Было показано, что угол, под которым волна георадарной антенны пересекается с корнем, влияет на амплитуду отраженного сигнала и на предполагаемый размер корня [48; 97; 106]. Был применен метод трех направлений для коррекции неортогональной ориентации корней относительно георадарных трансектов, но при этом получаемые данные не были экстраполированы на оценку биомассы на системном уровне [48]. Не проводилось никаких исследований с целью определить, обладают ли модели, построенные с использованием четырех направлений сканирования, более высоким потенциалом снижения объясненной вариабельности в зависимости от ориентации корня по сравнению с моделями, основанными на меньшем количестве направлений трансекта. Мелкомасштабная выборка по сравнению с крупномасштабной более ограничена в пространстве и, следовательно, в большей степени подвержена влиянию вариабельности в результате ориентации корней. Из-за потенциальной возможности занижения биомассы в результате наклонной ориентации скелетных корней, при оценке их биомассы определяли ее точность при нескольких направлениях сканирования, от одного до четырех, установленных с интервалом в 45 градусов [48; 97; 106].

Существует ряд других методологических проблем, связанных с применением георадара для диагностирования крупных корней. Было обнаружено, что показатели георадара лучше коррелируют с биомассой живых крупных корней, чем с совокупной биомассой живых и мертвых корней [21]. Кроме того, отмечалось, что оценка биомассы крупных корней с помощью георадара может быть проблематичной из-за низкого содержания воды в корнях, что позволяет предположить, что низкое содержание воды в корнях оказывает такое же негативное влияние, как и высокая влажность почвы [47]. Предыдущие исследования также показали, что корни с низким содержанием воды могут быть представлены более слабыми гиперболическими отражениями, что приводит к занижению оценок их биомассы [36; 49]. Отмершие корни включены в углеродный пул, но содержание воды в них становится сопоставимым с содержанием воды в почвогрунте, что потенциально затрудняет их идентификацию с помощью георадара. Если разница между влажностью корней и почвы невелика, радар не сможет идентифицировать отмершие корни. Чтобы количественно оценить эту проблему, в предложенном исследовании были использованы имитированные фрагменты отмерших корней, в которых содержание воды было уравнено с окружающим почвогрунтом [9].

Ранее было обнаружено, что георадар не может надежно различать также разветвления корней и территориально сближенные отдельные корни [49; 93]. При этом использовалась георадарная антенна с частотой 900 МГц, которая позволяет стабильно идентифицировать корни диаметром более 2 см [21]. Антенна с частотой 1500 МГц обеспечивает более высокое разрешение корней и потенциально устраняет некоторые неточности в количественном определении корней, которые расположены близко друг к другу или пересекаются. В идеальных условиях антенна с частотой 1500 МГц обычно ориентирована на верхние

50 см почвы, и на этот же слой приходится большинство корней деревьев [21].

Диэлектрическая проницаемость почвы является ключевым фактором, определяющим скорость распространения электромагнитных георадарных волн в почве, и необходимо определять диэлектрическую проницаемость сканируемого почвогрунта, поскольку это обеспечивает точное представление глубины без искажений. Диэлектрическая проницаемость зависит от многих факторов; такие, как влажность почвы, минералогический состав, температура и атмосферное давление, могут существенно изменяться изо дня в день в неоднородной почве и будут различаться в разных условиях роста [9].

Чтобы точно рассчитать диэлектрическую проницаемость, четыре алюминиевых стержня длиной 90 см и диаметром 1 см были помещены в стенку вырытой траншеи параллельно на глубину 10, 20, 30 и 40 см. Половину каждого стержня вставляли в стенку траншеи так, чтобы он был покрыт нетронутой почвой, оставляя другую половину покрытой нарушенной почвой после того, как траншея была засыпана вынутым песком [29]. Вся корневая масса была отделена от почвы с помощью сита, прежде чем использовать почву для обратной засыпки траншеи. Для диэлектрической калибровки были подготовлены две трансекты: одна с ненарушенным грунтом для одной половины каждого стержня, а вторая с нарушенным грунтом для другой половины стержней. Первая трансекта использовалась, когда георадар применялся для сканирования ненарушенных участков, а вторая – для всех измерений, которые проводились на экспериментальных участках, которые были раскопаны и затем засыпаны [9].

Поскольку диэлектрическая проницаемость может меняться изо дня в день, соответствующая трансекта сканировалась с помощью георадара в начале каждого дня измерений. Все полевые исследования в рамках данного исследования проводились с использованием антенны 1500 МГц, подключенной к блоку управления георадаром SIR-3000. Как только был получен четкий снимок диэлектрического профиля, отмечалось местоположение стержней, и их известная глубина вводилась в георадарный блок [9].

Программное обеспечение георадара автоматически настраивало диэлектрическую проницаемость таким образом, чтобы она соответствовала заданной глубине расположения стержней. Это новое значение диэлектрической проницаемости записывалось и выполнялось подтверждающее сканирование, чтобы убедиться, что стержни находятся на нужной глубине. Значение диэлектрической проницаемости за определенный день использовалось для всех сканирований. Используя диэлектрический профиль в качестве ориентира, было определено, что диапазон в 10 наносекунд, фильтр конечной импульсной характеристики и трехточечное ручное усиление позволили получить наилучшие георадарные изображения заглубленных стержней, и эти настройки использовались для всех проведенных измерений [9].

На исследуемой площади было отобрано 30 почвенных кернов (монолитов) диаметром 15 см и глуби-

ной 60 см. Эти керны были использованы для построения регрессии, показывающей взаимосвязь между пикселями с высокой амплитудой, идентифицированными с помощью георадара, и фактической биомассой крупных корней, т. е. были специально выбраны для представления полного спектра густоты корней на исследуемом участке. Перед отбором керна каждое местоположение было просканировано с помощью георадарной антенны с частотой 1500 МГц. Поперек каждого керна была натянута направляющая нить, разделяющая его по центру пополам. Была применена ламинированная направляющая для сканирования керна (рис. 30), позволяющая осуществлять повторяющийся сбор данных в четырех конкретных относительных направлениях. Затем каждый керн сканировали в четырех относительных направлениях: (1) 0° (2) 45° (3) 90° и (4) на 135°. Было проведено восемь параллельных трансект в каждом направлении с интервалом в 2 см, по 400 сканирований на метр вдоль каждой трансекты. Все сканирование проводилось с помощью антенны 1500 МГц, установленной на ручной тележке, оборудованной измерителем расстояния перемещения, чтобы гарантировать, что измерения проводились с равными интервалами. Первоначально на каждый участок приходилось 32 трансекты; однако позже было установлено, что время сканирования можно сократить вдвое без существенной потери точности. Для устранения краевых эффектов каждая трансекта расширялась еще на 15 см в каждом направлении и еще на 15 см в каждом направлении за пределы круга диаметром 15 см, представляющего собой основную область, подлежащую раскопкам [9].

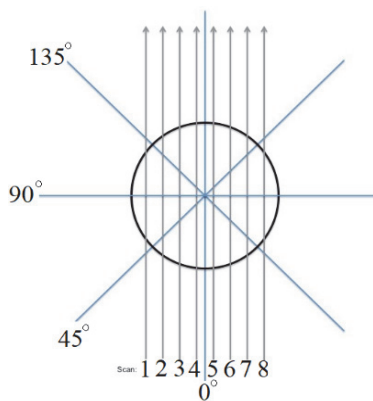


Рис. 30. Схема сканирования корней с помощью георадара для 15-сантиметровых кернов, показывающая четыре направления сканирования и восемь параллельных трансект, проложенных с интервалом 2 см (32 сканирования на керн) [9]

После завершения сканирования каждого керна их выкапывали на глубину 60 см, а все корни толщиной более 5 мм в полевых условиях отделяли от почвы посредством просеивания. Затем оставшуюся почву засыпали в шурфы, а корни из каждого керна в лабораторных условиях промывали, высушивали в термостате в течение 48 часов при температуре 70 °С и после сушки взвешивали для определения сухой массы. Обработка радарограмм проводилась с использованием

программного обеспечения RADAN 7.0 и программы для анализа изображений SigmaScan Pro в соответствии с протоколом обработки, описанным ранее [94] (рис. 31).

Объекты были идентифицированы как группы пикселей с использованием порогового значения их интенсивности. Изменяющиеся почвенные условия могут привести к тому, что один и тот же объект с помощью георадара будет казаться больше или меньше, с большим или меньшим количеством пикселей в пределах порога; таким образом, соответствующие значения порога были определены на основе анализа диэлектрических снимков, собранных в тот же день, что и экспериментальные данные. Поскольку стержни, используемые в диэлектрической траншее, имели известный диаметр, эти изображения служили ориентиром, поскольку порог можно было регулировать до тех пор, пока не будет обеспечен соответствующий размер объекта. После применения порогового значения идентифицированные корневые объекты были количественно оценены с помощью суммирования пикселей внутри группировок и определено количество пикселей, представляющих корни. Чтобы обеспечить основу для оценки биомассы, была рассчитана линейная регрессия для количественной оценки взаимосвязи между наблюдаемой биомассой корней в почвенных пробах и количеством пикселей в пределах порогового диапазона интенсивности сигналов георадара [9].

С целью проверки было выделено 15 квадратных площадок со стороной 50 см (размером 0,25 м²). Каждая площадка была отсканирована в тех же четырех направлениях, которые использовались для разработки уравнения регрессии с целью проверить точность оценки биомассы. В каждом направлении было пять параллельных трансект, расположенных с интервалом 10 см для направлений 0° и 90° и 14 см для направлений 45° и 135° из-за увеличения ширины участков при переходе на диагональные направления (рис. 32).

После завершения сканирования каждая площадка была выкопана на глубину 60 см и корни отделены от почвы с помощью просеивания. Оставшаяся почва была засыпана на участки для последующих экспериментов. Корни промывали, сушили в термостате в течение 48 часов при температуре 70 °С и после сушки взвешивали для определения сухой массы [9].

Георадарные снимки площадок были обработаны с использованием протокола, установленного при анализе кернов. По углам сетки были взяты сорок 15-сантиметровых почвенных кернов (по 10 с каждого направления сканирования). На основе уравнения регрессии, разработанного на основе кернов, была определена средняя биомасса на данном участке, используя количество пикселей корневого изображения, идентифицированных в пределах этих кернов. Чтобы определить эффективность георадара с использованием различных направлений сканирования для точной оценки биомассы скелетных корней, был применен непараметрический критерий рангов Уилкоксона, чтобы определить, значительно ли отличается оцененная биомасса от наблюдаемой [9].

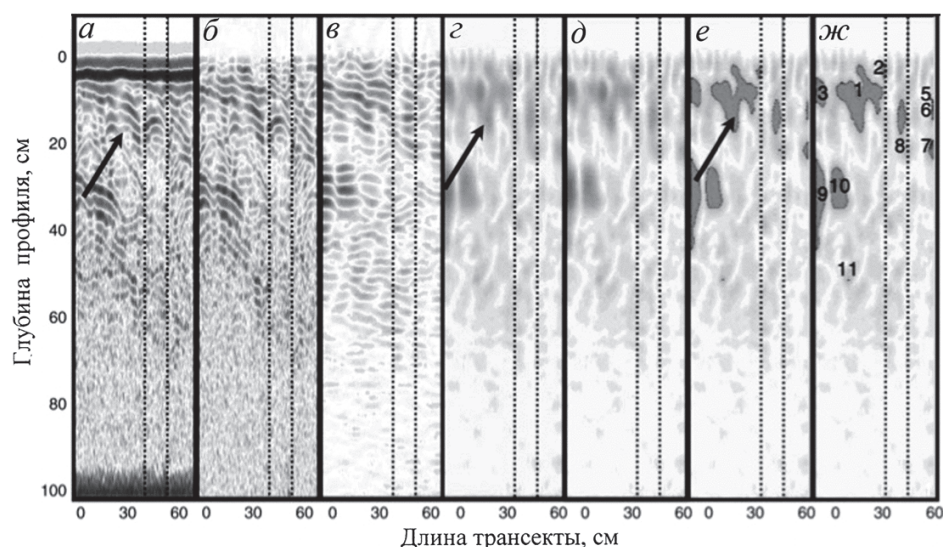


Рис. 31. Этапы обработки радарограммы:

а – необработанная радарограмма; *б* – удаление фона для уменьшения шума; *в* – миграция Кирхгофа для корректировки положения объекта и гиперболической геометрии; *г* – преобразование Гильберта для улучшения видимости малозаметных объектов и уменьшения числа ложных «эхо-сигналов»; *д* – обработанное изображение, преобразованное в 8-битную шкалу серого; *е* – группировки, определенные на основе интенсивности пикселей; *жс* – объекты, количественно определенные путем суммирования пикселей внутри группировок. Стрелки указывают на отражатель (корень) [94]

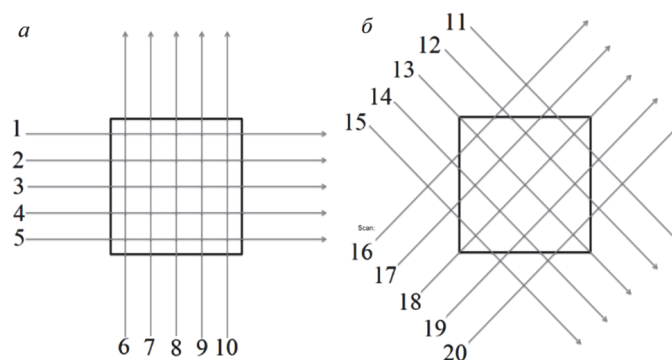


Рис. 32. Направляющие георадарного сканирования для участков площадью $0,25 \text{ м}^2$, показывающие 5 параллельных трассек, для направлений:

а – 0° и 90° (расстояние 10 см); *б* – 45° и 135° (расстояние 14 см) [9]

Для оценки способности георадара отличать живые корни от мертвых использовали 5 ранее выкопанных площадок, которые были засыпаны просеянной почвой. На каждой площадке были размещены сегменты четырех «живых» и четырех «мертвых» корней. «Мертвые» корни были подготовлены с использованием живых корней, которые были выкопаны на площадке, высушены в течение 24 часов при температуре 70°C и preserved на одну неделю, чтобы их влажность сравнялась с локальной влажностью почвы. После недельного пребывания в почве у фрагментов отмерших корней среднее содержание влаги в корнях составляло 12 %. Корни были размещены на глубине 10 см от поверхности, с чередованием «живых» и «мертвых» корней по всей площадке. Расположение как «живых», так и «мертвых» корней было задокументировано для сравнения с данными георадарного сканирования. Все восемь корней на каждой площадке были ориентированы перпендикулярно направлению сканирования. Для каждого из 5 тестов было проведено 5 параллельных сканирований с ин-

тервалом в 10 см на каждой экспериментальной площадке. Все сканы были обработаны в RADAN и SigmaScan в соответствии с установленным протоколом. Обработанные радарограммы в RADAN были проанализированы для определения наличия/отсутствия каждого корня на основе наличия/отсутствия пикселей в пределах установленного порога интенсивности пикселей. Наличие корней определялось, если в SigmaScan были идентифицированы объекты с пикселями в пределах заданного диапазона интенсивности. Для определения уровня значимости видимых корней по сравнению с невидимыми использовался U-критерий Манна–Уитни [9].

Для оценки влияния затенения корней на георадарные измерения было проведено 5 тестов, по 5 вариантов в каждом. Варианты были следующими: 1) без корней; 2) крупные корни до глубины 3 см с корнями меньшего размера до глубины 13 см; 3) крупные корни у поверхности удаляли, оставляя корни меньшего размера до глубины 13 см; 4) крупные корни у поверхности с корнями меньшего размера до глубины

20 см; 5) удаление крупных корней до глубины 10 см с оставлением мелких корней до глубины 20 см. В каждом варианте на указанную глубину (по одному в каждом из четырех квадрантов площадки) помещали четыре затененных корня (полученные и подготовленные таким же образом, как и «живые» корни, использованные в предыдущем эксперименте). Все корни были примерно 20 см в длину, в то время как крупные корни имели диаметр около 30 мм, а мелкие – около 10 мм. Корни были ориентированы перпендикулярно направлению сканирования, и было выполнено пять параллельных сканирований с интервалом в 10 см на каждой экспериментальной площадке в каждом варианте. Все сканы были обработаны в RADAN и SigmaScan в соответствии с установленным протоколом [9].

По данным 15-сантиметровых кернов с использованием четырех направлений сканирования была выявлена тесная корреляция ($R^2 = 0,774$) между биомассой скелетных корней и количеством пикселей с высокой амплитудой. Снижение затрат сканирования наполовину (четыре сканирования в каждом направлении, в общей сложности 16 сканирований на керна) существенно не изменило коэффициент детерминации, поскольку эта взаимосвязь по-прежнему оставалась ($R^2 = 0,754$) (рис. 33). Применяя все четыре направления сканирования к площадкам размером

$0,25 \text{ м}^2$ и метод построения сетки для определения местоположения следов корней в пределах площадки, регрессия, полученная на основе полученных данных, показала, что биомасса крупных корней составляет $2525 \pm 463 \text{ г/м}^2$, что существенно не отличалось от фактической биомассы в размере 2637 г/м^2 [9].

При выявлении потенциала георадара для различения живых и мертвых корней установлено, что он смог правильно идентифицировать все 20 «живых» корневых сегментов, использованных в эксперименте, но только 3 из 20 «мертвых» корней, которые адаптировались к влажности окружающей почвы. Повидимому, георадар не способен надежно идентифицировать корни, имеющие влажность, сопоставимую с влажностью окружающей их почвы (рис. 34).

При проверке влияния затенения корней на георадарные измерения было установлено, что георадар был менее эффективен при выявлении мелких корней, которые были «затенены» более крупными корнями, опуская 5 из имеющихся 40. Для сравнения – при отсутствии крупных корней был опущен только один мелкий корень, но это не привело к значительному снижению эффективности обнаружения. Незатененные корни были представлены в среднем 3428 ± 188 пикселями, в то время как затененные корни были представлены 3215 ± 375 пикселями.

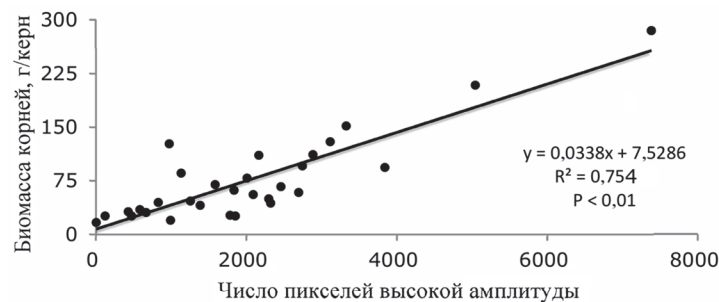


Рис. 33. Зависимость между общей наблюдаемой биомассой, полученной из кернов толщиной 15 см на глубине 60 см, и коэффициентом отражения корней с помощью георадара, измеренного с помощью пикселей с высокой амплитудой в пределах участка исследования [9]

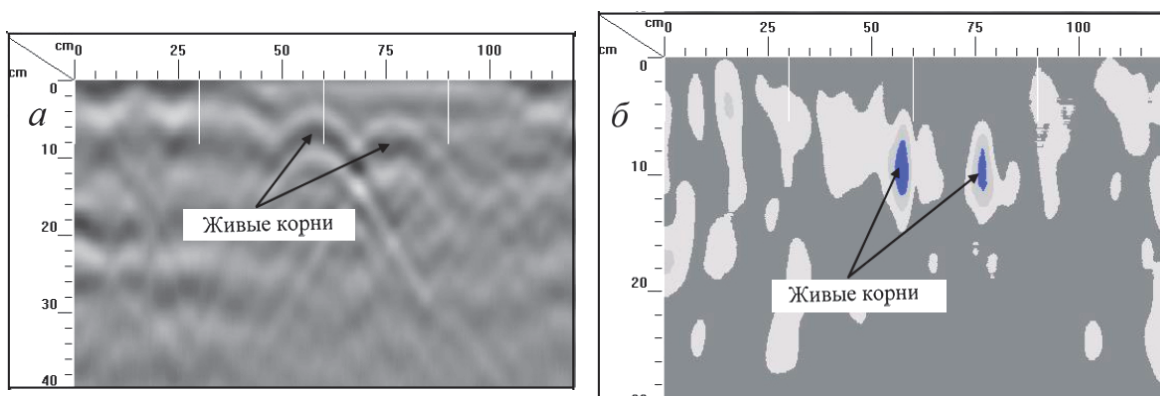


Рис. 34. Фрагменты радарограмм:

a – предварительной обработки; *б* – последующей обработки изображений одной трансекты во время эксперимента с «живыми» и «мертвыми» корнями. Показано, что с помощью георадара были обнаружены только живые корни. Площадки размещены на расстоянии от 50 до 100 см вдоль оси X, а «живые» корни были размещены с интервалом в 10 см; таким образом, «живые» корни были обнаружены на расстояниях 60 и 80 см, в то время как «мертвые» корни должны были быть видны на расстояниях 70 и 90 см [9]

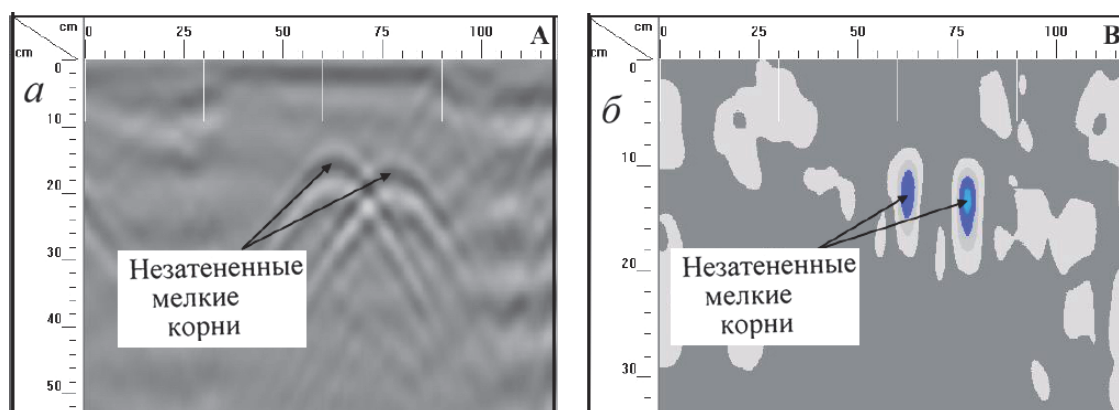


Рис. 35. Изображения радарограмм:

a – предварительной обработки; *б* – последующей обработки двух трансект, полученных в эксперименте с затенением корней. Показана георадарная сигнатура корней диаметром 10 см, когда они не затенены более мелкими корнями. Здесь и далее: расстояние между участками составляет от 50 до 100 см вдоль оси X, а расстояние между корнями составляет 60 и 80 см [9]

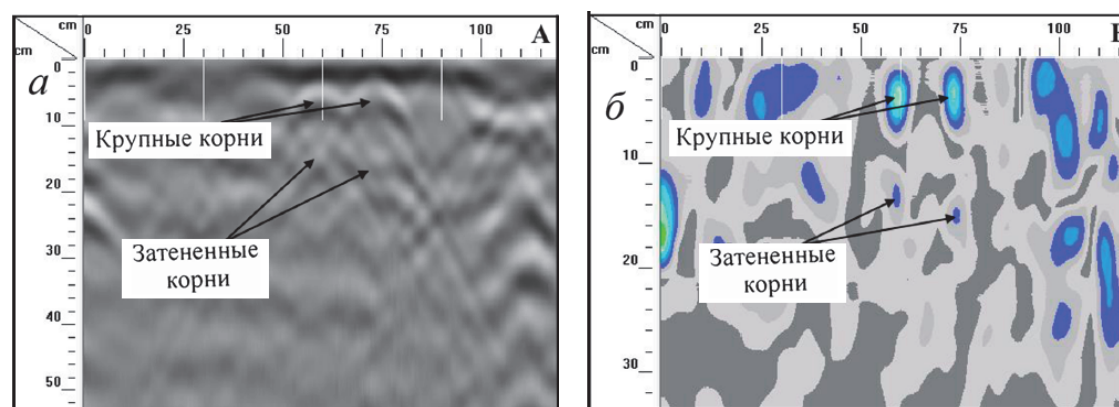


Рис. 36. Изображения радарограмм:

a – предварительной обработки; *б* – после обработки двух трансект с корнями диаметром 10 см, когда крупные корни расположены на 10 см выше и затеяют мелкие корни [9]

Кроме того, не было выявлено существенной разницы между количеством пикселей, представляющих затененные и незатененные корни. Однако анализ изменчивости количества пикселей для затененных корней показал наличие стандартной ошибки, почти вдвое превышающей ошибку для незатененных корней, что говорит о том, что, хотя георадар является точным для затененных корней, он не так точен по сравнению с незатененными корнями (рис. 35 и 36).

Полученные результаты показали, что при использовании георадара для оценки биомассы скелетных корней одно- и двунаправленное сканирование не дает оценок биомассы, которые существенно отличаются от того, что было обнаружено в кернах. Но использование нескольких направлений сканирования может устранить вариабельность, вызванную ориентацией корней, что может быть предпочтительным методом. Полученные данные также подтверждают предыдущие выводы о том, что отсутствие существенной разницы между влажностью почвы и корней значительно снижает полезность георадара, что позволяет предположить, что отмершие, но еще не разложившиеся крупные корни не вошли в оценку биомассы крупных корней, полученных с помощью гео-

радара. Использование георадара для измерения крупных корней является молодой и развивающейся областью подземной экологии и является лишь одним из многих инструментов, необходимых для эффективного измерения корневых систем [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наличие современного технического и программного обеспечения информационных технологий позволяет с помощью георадара оценивать архитектуру и биомассу скелетных корней деревьев и кустарников с достаточной точностью и с несопоставимо меньшими затратами времени и труда по сравнению с традиционной раскопкой. Достоинство метода георадара состоит также в возможности его применения на больших площадях и во временной последовательности, что дает возможность отслеживать возрастную динамику архитектуры и биомассы корней. Недостаток метод георадара состоит в невозможности оценки биомассы тонких (сосущих) корней, участвующих в физиологических процессах дерева, а также в занижении биомассы корней деревьев, произрастающих на влажных почвах, и корней, проникающих на глубину более 50–60 см.

REFERENCES

1. Aboudouri A., Serhir M., Lesselier D. A processing framework for tree-root reconstruction using ground-penetrating radar under heterogeneous soil conditions // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. Vol. 59. P. 208–219.
2. Agbona A., Teare B., Ruiz-Guzman H. et al. Prediction of root biomass in cassava based on ground penetrating radar phenomics // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article 4908.
3. Al Hagrey S. A. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity // *Journal of Experimental Botany*. 2007. Vol. 58. P. 839–854.
4. Alani A. M., Lantini L. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: a focus on ground penetrating radar // *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41. P. 605–646.
5. Al-Nuaimy W., Huang Y., Nakhkash M. et al. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern // *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43. P. 157–165.
6. Altdorff D., Botschek J., Honds M. et al. *In situ* detection of tree root systems under heterogeneous anthropogenic soil conditions using ground-penetrating radar // *Journal of Infrastructure Systems*. 2019. Vol. 25, No. 3. Article 05019008.
7. Annan A. P., Chua L. T. Ground penetrating radar performance predictions // *The Geological Survey of Canada, Paper 90-4*, 1992. P. 5–13.
8. Annan A. P., Cosway S. W. GPR frequency selection. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Waterloo Center for Groundwater Research, Waterloo Canada, 1994. P. 747–760.
9. Bain J. C., Day F. P., Butnor J. R. Experimental evaluation of several key factors affecting root biomass estimation by 1500 MHz ground-penetrating radar // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. Article 1337.
10. Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2018. Vol. 115, No. 25. P. 6506–6511.
11. Barone P. M., Ferrara C., Salvati L. Tree root system imaging using ground penetrating radar // *Annals of Silvicultural Research*. 2017. Vol. 41. P. 67–70.
12. Barton C. V. M., Montagu K. D. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions // *Tree Physiology*. 2004. Vol. 24. P. 1323–1331.
13. Bassuk N., Grabosky J., Mucciardi A., Raffel G. Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement // *Arboriculture & Urban Forestry*. 2011. Vol. 37. P. 160–166.
14. Bi L., Xing L., Liang H., Lin J. Estimation of coarse root system diameter based on ground-penetrating radar forward modeling // *Forests*. 2023. Vol. 14. Article 1370.
15. Borden K. A., Thomas S. C., Isaac M. E. Inter-specific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar // *Plant and Soil*. 2017. Vol. 410. P. 323–334.
16. Borden K. A., Isaac M. E., Thevathasan N. V. et al. Estimating coarse root biomass with ground penetrating radar in a tree-based intercropping system // *Agroforestry Systems*. 2014. Vol. 88. P. 657–669.
17. Brassard B. W., Chen H. Y. H., Bergeron Y., Pare D. Coarse root biomass allometric for *Abies balsamea*, *Picea mariana*, *Pinus banksiana*, and *Populus tremuloides* in the boreal forest of Ontario, Canada // *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. P. 4189–4196.
18. Brunner I., Godbold D. L. Tree roots in a changing world // *Journal of Forest Research*. 2007. Vol. 12. P. 78–82.
19. Butnor J. R., Doolittle J. A., Johnsen K. H. et al. Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems // *Soil Science Society of America Journal*. 2003. Vol. 67. P. 1607–1615.
20. Butnor J. R., Doolittle J. A., Kress L. et al. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // *Tree Physiology*. 2001. Vol. 21. P. 1269–1278.
21. Butnor J. R., Stover D. B., Roth B. et al. Using ground penetrating radar to estimate tree root mass: Comparing results from two Florida surveys // *Handbook of Agricultural Geophysics*. Allred B., Daniels J. J., Ehsani M. R. (Eds.). CRC Press: London, UK, 2008. P. 375–382.
22. Cabal C., De Deurwaerder H. P. T., Matesanz S. Field methods to study the spatial root density distribution of individual plants // *Plant and Soil*. 2021. Vol. 462. P. 25–43.
23. Carvalho J. L. N., Avanzi J. C., Silva M. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil // *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2010. Vol. 34. P. 277–290.
24. Čermák J., Hruška J., Martinková M., Prax A. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques // *Plant and Soil*. 2000. Vol. 219. P. 103–116.
25. Čermák J., Nadezhdina N., Meiresonne L., Ceulemans R. Scots pine root distribution derived from radial sap flow patterns in stems of large leaning trees // *Plant and Soil*. 2008. Vol. 305. P. 61–75.
26. Conyers L. B. Ground-penetrating radar for archaeology. Altamira Press, Walnut Creek, 2004. 203 p.
27. Conyers L. B., Goodman D. Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologist. Altamira Press, Walnut Creek, CA, 1997. 232 p.
28. Cox K. D., Scherm H., Serman N. Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing // *HortTechnology*. 2005. Vol. 15. P. 600–607.
29. Cui X. H., Chen J., Shen J. S. et al. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar // *Science China Earth Sciences*. 2011. Vol. 54, No. 5. P. 711–719.
30. Cui X., Liu X., Cao X. et al. Pairing dual-frequency GPR in summer and winter enhances the detection and mapping of coarse roots in the semi-arid shrubland in China // *European Journal of Soil Science*. 2020. Vol. 71. P. 236–251.
31. Cui X., Quan Z., Chen X. et al. GPR-based automatic identification of root zones of influence using HDBSCAN // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article 1227.

32. Cui X. H., Chen J., Shen J. S. et al. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar // *Science China Earth Sciences*. 2011. Vol. 54. P. 711–719.
33. Daniels D. J. *Ground penetrating radar*, 2nd edn. Institution of Electrical Engineers, London, 2004. 718 c.
34. Daniels D. J. *Surface-penetrating radar*. The Institute of Electrical Engineers, London, 1996. 300p.
35. Danjon F., Reubens B. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation // *Plant and Soil*. 2008. Vol. 303. P. 1–34.
36. Dannoura M., Hirano Y., Igarashi T. et al. Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar // *Plant Biosystems*. 2008. Vol. 142. P. 375–380.
37. Day F. P., Schroeder R. E., Stover D. B. et al. The effects of 11 yr of CO₂ enrichment on roots in a Florida scrub-oak ecosystem // *New Phytologist*. 2013. Vol. 200. P. 778–787.
38. De Y., An H., Guo Q. et al. Study on the characteristics of roots distributions area in the caragana-grass compound system // *Environmental Engineering & Management Journal*. 2011. Vol. 10, No. 6. P. 793–796.
39. Delgado A., Hays D. B., Bruton R. K. et al. Ground penetrating radar: A case study for estimating root bulking rate in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) // *Plant Methods*. 2017. Vol. 13. Article 65.
40. Fan G., Liang H., Zhao Y., Li Y. Automatic reconstruction of three-dimensional root system architecture based on ground penetrating radar // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 197. Article 106969.
41. Fan G., Li Y., Zheng Y. et al. 3D reconstruction of root system architecture in urban forest parks based on ground penetrating radar instantaneous amplitude analysis // *Plant Phenomics*. 2025. Vol. 7. Article 100147.
42. Fantozzi D., Montagnoli A., Trupiano D. et al. A systematic review of studies on fine and coarse root traits measurement: towards the enhancement of urban forests monitoring and management // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2024. Vol. 7. Article 1322087.
43. Freschet G. T., Pages L., Iversen C. M. et al. A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements // *New Phytologist*. 2021. Vol. 232. P. 973–1122.
44. Gao Q., Wang S., Peng T. et al. Evaluating the structure characteristics of epikarst at a typical peak cluster depression in Guizhou plateau area using ground penetrating radar attributes // *Geomorphology*. 2020. Vol. 364. Article 107015.
45. Grace J., San Jose J., Meir P. et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas // *The Journal of Biogeography*. 2006. Vol. 33. P. 387–400.
46. Grasmueck M., Weger R., Horstmeyer H. Full-resolution 3D GPR imaging // *Geophysics*. 2005. Vol. 70, No. 1. P. 12–19.
47. Guo L., Chen J., Cui X. et al. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review // *Plant and Soil*. 2013. Vol. 362. P. 1–23.
48. Guo L., Wu Y., Chen J. et al. Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar // *Plant and Soil*. 2015. Vol. 395. P. 289–305.
49. Hirano Y., Dannoura M., Aono K. et al. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar // *Plant and Soil*. 2009. Vol. 319. P. 15–24.
50. Hou F., Rui X., Fan X., Zhang H. Review of GPR activities in civil infrastructures: data analysis and applications // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 5972.
51. Hruska J., Čermák J., Sustek S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar // *Tree Physiology*. 1999. Vol. 19. P. 125–130.
52. Hugenschmidt J., Kay S. Unmasking adaption of tree root structure in agroforestry systems in Switzerland using GPR // *Geoderma Regional*. 2023. Vol. 34. Article e00659.
53. Jol H. M. *Ground penetrating radar: Theory and application*. Elsevier Science, Oxford, 2009. 524 p.
54. Kalliokoski T., Nygren P., Sievanen R. Coarse root architecture of boreal tree species growing in mixed stands // *Silva Fennica*. 2008. Vol. 42. P. 189–210.
55. Koala J., Sawadogo L., Savadogo P. et al. Allometric equations for belowground biomass of four key woody species in West African savanna-woodlands // *Silva Fennica*. 2017. Vol. 51, No. 3. Article id 1631.
56. Kuyah S., Sileshi G. W., Rosenstock T. S. Allometric models based on Bayesian frameworks give better estimates of aboveground biomass in the Miombo Woodlands // *Forests*. 2016. Vol. 7. Article 13.
57. Lantini L., Tosti F., Giannakis I. et al. An enhanced data processing framework for mapping tree root systems using ground penetrating radar // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article 3417.
58. Lantini L., Tosti F., Giannakis I. et al. Health assessment of trees using GPR-derived root density maps // *IEEE Radar Conference (RadarConf20)*, Florence, Italy, 2020. P. 1–5.
59. Leucci G. The use of three geophysical methods for 3D images of total root volume of soil in urban environments // *Exploration Geophysics*. 2010. Vol. 41. P. 268–278.
60. Li H., Zhang X., Li Z. et al. A review of research on tree risk assessment methods // *Forests*. 2022. Vol. 13. Article 1556.
61. Li M., Zhu J., Zhang T. et al. The optimum stand density of plantation forests in semi-arid sandy areas determined by the spatial distribution of tree root systems // *Forest Ecology and Management*. 2025. Vol. 583. Article 122581.
62. Li S., Cui X., Guo L. et al. Enhanced automatic root recognition and localization in GPR images through a YOLOV4-based deep learning approach // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. P. 1–14.
63. Liu H., Fu X. D. Phytohormonal networks facilitate plant root developmental adaptations to environmental changes // *Science Bulletin*. 2024. Vol. 69. P. 709–713.
64. Liu Q., Cui X., Liu X. et al. Detection of root orientation using ground-penetrating radar // *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56. P. 93–104.

65. Liu S. J., Zhang H., Jin X. T. et al. PeFUS3 drives lateral root growth via auxin and ABA signalling under drought stress in populus // *Plant Cell and Environment*. 2024. Vol. 48. P. 664–681.

66. Liu X., Guo L., Cui X. et al. An automatic processing framework for in situ determination of ecohydrological root water content by ground-penetrating radar // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. P. 1–15.

67. Liu Y., Zhang L., Cui X. et al. A clustering–connection algorithm for coarse root system architecture reconstruction based on ground-penetrating radar // *Forests*. 2025. Vol. 16. Article 475.

68. Loiseau B., Carriere S. D., Jougnot D. et al. The geophysical toolbox applied to forest ecosystems – a review // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 899. Article 165503.

69. Lorenzo H., Perez-Gracia V., Novo A., Armesto J. Forestry applications of ground-penetrating radar // *Forest Systems*. 2010. Vol. 19. P. 5–17.

70. Luo W., Lee Y. H., Sun H. H. et al. Tree roots reconstruction framework for accurate positioning in heterogeneous soil // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022. Vol. 15. P. 1912–1925.

71. Luo W., Lee Y. H., Yusof M. L. M. et al. A depth-adaptive filtering method for effective GPR tree roots detection in tropical area // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. P. 1–10.

72. Lynch J. P. Harnessing root architecture to address global challenges // *The Plant Journal*. 2022. Vol. 109. P. 415–431.

73. Miller A. T., Allen H. L., Maier C. A. Quantifying the coarse root biomass of intensively managed loblolly pine plantations // *Canadian Journal of Forest Research*. 2006. Vol. 36. P. 12–22.

74. Neto P. X., de Medeiros W. E. A practical approach to correct attenuation effects in GPR data // *Journal of Applied Geophysics*. 2006. Vol. 59. P. 140–151.

75. Ohashi M., Ikeno H., Sekihara K. et al. Reconstruction of root systems in *Cryptomeria japonica* using root point coordinates and diameters // *Planta*. 2019. Vol. 249. P. 445–455.

76. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Digital signal processing. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1975. 585 p.

77. Persson H. A. Root systems of arboreal plants // Weisel Y., Eshel A., Kafkafi U. (eds.). *Plant roots: the hidden half*, 3rd edn. Marcel Dekker, New York, 2002. P. 187–204.

78. Qureshi A., Dobriyal P., Badola R., Hussain S. A. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes // *Environmental Science & Policy*. 2012. Vol. 16, No. 1. P. 81–89.

79. Resh S. C., Battaglia M., Worledge D., Ladiges S. Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia: Sources of variation and methods for assessment // *Trees*. 2003. Vol. 17. P. 389–399.

80. Reubens B., Poesen J., Danjon F. et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil

erosion control with a focus on root system architecture: a review // *Trees – Structure and Function*. 2007a. Vol. 21. P. 385–402.

81. Reubens B., Windey J., Danjon F. et al. Root system architecture of woody species important for erosion control in Tigray, Northern Ethiopia // *Proceedings of the 4 International Symposium on Dynamics of Physiological Processes in Roots of Woody Plants*. 16th–19th September 2007, Bangor, U.K., 2007b. P. 87.

82. Rocha A. A., Borges W. R., Huelsen M. G. et al. Imaging tree root systems using ground penetrating radar (GPR) data in Brazil // *Frontiers of Earth Science*. 2024. Vol. 12. Article 1353572.

83. Ruiz-Vera U. M., Balikian R., Larson T. H., Ort D. R. Evaluation of the effects of elevated CO₂ concentrations on the growth of cassava storage roots by destructive harvests and ground penetrating radar scanning approaches // *Plant Cell and Environment*. 2023. Vol. 46. P. 93–105.

84. Rummyana K., Damian B., Scott H., Christa T. Root plasticity under abiotic stress // *Plant Physiology*. 2021. Vol. 187. P. 1057–1070.

85. Samet R., Çelik E., Tural S. et al. Using interpolation techniques to determine the optimal profile interval in ground-penetrating radar applications // *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 140. P. 154–167.

86. Samuelson L. J., Butnor J., Maier C. et al. Growth and physiology of loblolly pine in response to long-term resource management: defining growth potential in the southern United States // *Canadian Journal of Forest Research*. 2008. Vol. 38. P. 721–732.

87. Samuelson L. J., Stokes T. A., Butnor J. R. et al. Ecosystem carbon stocks in *Pinus palustris* forests // *Canadian Journal of Forest Research*. 2014. Vol. 44. P. 476–486.

88. Samuelson L. J., Stokes T. A., Butnor J. R. et al. Ecosystem carbon density and allocation across a chronosequence of longleaf pine forests // *Ecological Applications*. 2017. Vol. 27. P. 244–259.

89. Sandmeier K. J. REFLEXW. Version 6.0. WindowsTM 9x/NT/2000/XP/7 – a program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction, and transmission data. Manual, 2015. 516 p.

90. Schafer W. M., Nielsen G. A. Root biomass calculation using a modified counting technique // *Journal of Range Management*. 1981. Vol. 34. P. 245–247.

91. Schenk H. J., Jackson R. B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems // *Journal of Ecology*. 2002. Vol. 90, No. 3. P. 480–494.

92. Shen H., Li X., Duan R. et al. Quality evaluation of ground improvement by deep cement mixing piles via ground-penetrating radar // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Article 3448.

93. Stokes A., Fourcaud T., Hruška J. et al. An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: 1. Ground-penetrating radar // *Journal of Arboriculture*. 2002. Vol. 28. P. 2–10.

94. Stover D. B., Day F. P., Butnor J. R., Drake B. G. Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar // *Ecology*. 2007. Vol. 88. P. 1328–1334.

95. Sun D., Jian F., Wu H. et al. Root location and root diameter estimation of trees based on deep learning and ground-penetrating radar // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. Article 344.
96. Taflove A., Hagness S. C., Piket-May M. Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method. The Electrical Engineering Handbook. Academic Press, 2005. P. 629–670.
97. Tanikawa T., Hirano Y., Dannoura M. et al. Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar // *Plant and Soil*. 2013. Vol. 373. P. 317–327.
98. Tariq A., Graciano C., Sardans J. et al. Plant root mechanisms and their effects on carbon and nutrient accumulation in desert ecosystems under changes in land use and climate // *New Phytologist*. 2024. Vol. 242. P. 916–934.
99. Tian K., Chen S., Ye R. et al. Initial microbiome and tree root status structured the soil microbial community discrepancy of the subtropical pine-oak forest in a large urban forest park // *Frontiers in Microbiology*. 2024. Vol. 15. Article 1391863.
100. Tyminska-Czabanska L., Polak M., Miszczyszyn J. et al. First application of multichannel GPR for root system variability analysis in Scots pine forests // *Ecological Indicators*. 2025. Vol. 179. Article 114282.
101. Wang M., Wen J., Li W. Qualitative research: the impact of root orientation on coarse roots detection using ground-penetrating radar (GPR) // *BioResources*. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 2237–2257.
102. Wang X., Ma C., Wang Y. et al. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite // *Landslides*. 2020. Vol. 17. P. 1965–1977.
103. Wang X., Wang P., Zhang X. et al. Target electromagnetic detection method in underground environment: a review // *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. P. 13835–13852.
104. Wielopolski L., Hendrey G., Daniels J., McGuigan M. Imaging tree root systems in situ. In: Noon D. A., Stickley G. F., Longstaff D. (eds.). *GPR 2000: Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Vol. 4084. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2000. P. 642–646.
105. Wu Z., Cui F., Nie J. Relationship between soil water content and vegetation distribution in a small area before and after coal seam mining: a case study of coal mining subsidence area in Northwest China, *Environ // Earth Science*. 2023. Vol. 82. Article 105.
106. Wu Y., Guo L., Li W. et al. Comment on: Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar // *Plant and Soil*. 2014. Vol. 380. P. 441–444.
107. Xiao L., Li C., Cai Y. et al. Preliminary application of ground-penetrating radar for reconstruction of root system architecture in moso bamboo // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article 2816.
108. Xie C., Cai S., Yu B. et al. The effects of tree root density on water infiltration in urban soil based on a ground penetrating radar in shanghai, China // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020. Vol. 50. Article 126648.
109. Yamase K., Tanikawa T., Dannoura M. et al. Ground-penetrating radar estimates of tree root diameter and distribution under field conditions // *Trees (Berl.)*. 2018. Vol. 32. P. 1657–1668.
110. Zenone T., Morelli G., Teobaldelli M. et al. Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations // *Functional Plant Biology*. 2008. Vol. 35. P. 1047–1058.
111. Zhang C., Zhao Q., Tang H. et al. How well do three tree species adapt to the urban environment in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay area of China regarding their growth patterns and ecosystem services? // *Forests*. 2020. Vol. 11. Article 420.
112. Zhang L., Cui X. A simple method for estimating root spatial distribution and root biomass of shrubs based on ground-penetrating radar // *IGARSS 2024 – 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece, 2024b. P. 6488–6491.
113. Zhang L., Zhang Z., Guo L. et al. A simple method for estimating the coarse lateral root biomass of shrubs using ground-penetrating radar: validation by *Cara-gana microphylla* Lam. in Inner Mongolia // *Science of the Total Environment*. 2024a. Vol. 919. Article 170897.
114. Zhang T., Song L., Zhu J. et al. Spatial distribution of root systems of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees with different ages in a semi-arid sandy region of Northeast China // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 483. Article 118776.
115. Zhou L., Wang Y., Giannakis I. et al. Mapping and assessment of tree roots using ground penetrating radar with low-cost GPS // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article 1300.
116. Zhu S., Huang C., Su Y. et al. 3D-ground penetrating radar to detect tree roots and estimate root biomass in the field // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. P. 5754–5773.

© Усольцев В. А., Плюха Н. И., 2026

Поступила в редакцию 06.04.2026

Принята к печати 26.06.2026

ИНИЦИАЦИЯ СОМАТИЧЕСКОГО ЭМБРИОГЕНЕЗА ЛИСТВЕННИЦЫ ЧЕКАНОВСКОГО

Н. С. Помыткин, М. Э. Пак, А. М. Шемберг, И. Н. Третьякова

Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –
 обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/28

Аннотация. Размножение хвойных с помощью технологии соматического эмбриогенеза является в настоящий момент перспективной технологией и уже применяется для ряда видов. Однако, для лиственницы Чекановского (*Larix czekanowskii*), которая является гибридом лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) и лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*), эта технология до сих пор не применялась. Учитывая, что виды рода *Larix* характеризуются неравномерностью урожаев и низким качеством семян, технология размножения лиственницы Чекановского через соматический эмбриогенез является актуальной. Целью данной работы является инициация эмбрионально-суспензорной массы (ЭСМ) лиственницы Чекановского. Шишки лиственницы Чекановского собирали в третьей декаде июля недалеко от г. Северобайкальск. Для инициации эмбрионально-суспензорной массы зародыши семян лиственницы Чекановского помещали на питательные среды DCR, MSGm и АИ. Образование каллуса при культивировании, наблюдалось у 13,1 % эксплантов, что меньше, чем у лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина. Из числа образовавших каллус, 42,9 % эксплантов образовали удлинённые клетки, 14,3 % образовали эмбрионально-суспензорную массу. Лиственница Чекановского уступает по проценту образования ЭСМ другим видам лиственницы: сибирской, Гмелина, западной (*Larix decidua*) и её гибридов с лиственницей Кемпфера (*Larix leptolepis*), лиственнице принца Рупрехта (*Larix principis-rupprechtii*).

Ключевые слова: соматический эмбриогенез, лиственница Чекановского, культура *in vitro*.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 71–74

INITIATION OF SOMATIC EMBRYOGENESIS IN CZEKANOWSKI'S LARCH

N. S. Pomytkin, M. E. Park, A. M. Shemberg, I. N. Tretyakova

Sukachev Forest Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences –
 a separate division of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS»
 50/28, Akademgorodok str., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract. Reproduction of conifers using somatic embryogenesis is currently a promising approach and is already applied for a number of species. However, for Czekanowski's larch (*Larix czekanowskii*), which is a natural hybrid between Siberian larch (*Larix sibirica*) and Dahurian larch (*Larix gmelinii*), this biotechnology has not yet been applied. Considering that species of the genus *Larix* are characterized by irregular yields and low seed quality, the development of a propagation method for Czekanowski's larch via somatic embryogenesis is highly relevant. The aim of this study was to initiate embryonal-suspensor mass (ESM) in Czekanowski's larch. Cones were collected in the third decade of July near the city of Severobaikalsk. To initiate ESM, immature zygotic embryos of Czekanowski's larch were placed on DCR, MSGm, and AI nutrient media. Callus formation during culturing was observed in 13.1 % of explants, which is lower than in Siberian larch and Dahurian larch. Of the explants that formed callus, 42.9 % developed elongated cells and 14.3 % produced ESM. Czekanowski's larch shows a lower percentage of ESM formation compared to other larch species: Siberian larch, Dahurian larch, European larch (*Larix decidua*), its hybrids with Japanese larch (*Larix leptolepis*), and Prince Rupprecht's larch (*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*).

Keywords: somatic embryogenesis, Czekanowski's larch, *in vitro* culture.

ВВЕДЕНИЕ

Биотехнология соматического эмбриогенеза имеет большое значение для лесовыращивания, так как позволяет массово размножать хозяйственно ценные генетически тестированные генотипы, в том числе устойчивые к патогенам. С помощью этой технологии можно сохранять генетические ресурсы видов хвой-

ных на долгие годы. В России биотехнология клонирования хвойных через соматический эмбриогенез была разработана и применена для видов лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина – основных лесообразователей Сибири [1; 2]. Лиственница сибирская и лиственница Гмелина, занимают обширный ареал и обладают чрезвычайно высокой пластично-

стью, отличающей их от других представителей семейства *Pinaceae*. Этот признак связан с периодическим сбрасыванием хвои, переключением брахибластов на генеративный путь развития и, наоборот, генеративных структур на спорофитный путь развития, наличием толстой оболочки, окружающей пыльцевое зерно, не позволяющей пыльце прорасти при неблагоприятных условиях, отсутствием органического покоя у генеративных и вегетативных органов в зимний период, и, в целом, большим морфогенетическим потенциалом, позволяющим видам лиственницы адаптироваться к неблагоприятным экологическим факторам [3].

Вместе с тем, виды лиственницы характеризуются неравномерностью урожаев в многолетнем цикле и низким качеством семян, и даже полным отсутствием их в отдельные неурожайные годы [4; 5; 6].

Между лиственницей сибирской (*Larix sibirica*) и лиственницей Гмелина (*Larix gmelinii*) был описан гибрид – лиственница Чекановского (*Larix chekanowskii*) [7]. Этот гибрид характеризуется промежуточными значениями большинства признаков лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина [6]. Выявлено, что в степных условиях деревья лиственницы Чекановского растут быстрее, чем лиственница Гмелина [8].

Биотехнология соматического эмбриогенеза позволит размножить гибридную лиственницу Чекановского без сложных программ контролируемого опыления. Как правило, введение в культуру лиственницы с наибольшей эффективностью производится с использованием в качестве экспланта незрелых соматических зародышей [1; 9]. Экспланты лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина были введены в культуру *in vitro* с использованием сред 1/2 MS MSG/MSGm, АИ [1; 10]. При этом образование эмбриогенных культур у лиственницы Гмелина значительно уступало лиственнице сибирской [1]. Исследования по изучению способности к соматическому эмбриогенезу лиственницы Чекановского отсутствуют.

Целью данной работы является введение лиственницы Чекановского в культуру *in vitro* для инициации соматического эмбриогенеза (эмбрионально-суспензорной массы).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Деревья лиственницы Чекановского произрастают в республике Бурятия, в окрестностях г. Северобайкальск, на мысе Лударь и у Большого Слюдяного озе-

ра (Республика Бурятия). В третьей декаде июля (24.07.2025) с деревьев лиственницы Чекановского были собраны шишки. Шишки хранили в условиях холодильной камеры при температуре +4 °С. Зародыши находились на предсемядольной стадии развития.

Введение в культуру *in vitro* происходило с 31 июля по 13 августа. Семена извлекали из шишек, стерилизацию проводили коммерческим средством Domestos в течение 10 минут, затем троекратно промывали в стерильной дистиллированной воде. Семена освобождали от семенных чешуй в условиях ламинар бокса и помещали на питательную среду. Инициацию проводили в течение 40–50 дней, затем полученный каллус помещали на питательные среды для пролиферации.

Для инициации соматического эмбриогенеза использовали среды АИ [10], DCR [11] и модифицированную среду MSG – MSGm [1]. В среду вводились регуляторы роста (2,4 D 2 мг/л и 6-БАП, 1 мг/л), 500 мг/л глутамина и 30 г/л сахарозы. Для пролиферации концентрацию БАП снижали вдвое, концентрацию сахарозы снижали до 20 г/л.

Цитологический анализ проводили через 2 месяца культивирования методом давленных препаратов, окрашивание проводили сафранином в течение 5 минут, затем добавляли глицерин и накрывали предметным стеклом.

Частотный анализ проводили с использованием анализа произвольных таблиц сопряженности с использованием критерия хи-квадрат с поправкой Бонферрони-Холма на множественные сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В культуру *in vitro* (см. таблицу) было введено 107 эксплантов, из них 13,1 % образовали каллус (рис. 1), из половины образцов которого формировались культуры с эмбрионально-суспензорной массой (рис. 2). Низкая частота образования, удлинённых клеток и ЭСМ не позволяет установить достоверных различий между питательными средами. При этом многие экспланты образовавшие удлинённые клетки и ЭСМ не обладали светло белой окраской и рыхлой структурой, которая является типичной для ЭСМ.

Таким образом, в результате исследования впервые была получена эмбрионально-суспензорная масса из эксплантов лиственницы Чекановского, что потенциально расширяет возможности применения технологии соматического эмбриогенеза для различных видов и гибридов хвойных деревьев.

Результаты введения в культуру *in vitro* лиственницы Чекановского. В скобках указан процент от количества эксплантов (для каллуса) и от количества каллусов (для культур с удлинёнными клетками и ЭСМ). Статистически значимо различающиеся значения для разных питательных сред при $p < 0,05$ отмечены разными буквами

Среда	Количество эксплантов	Каллус	Культуры с удлинёнными клетками	ЭСМ
DCR	31	4 (12,9) ^a	3 (75) ^a	2 (50) ^a
MSGm	43	7 (16,3) ^a	2 (28,6) ^a	0 (0) ^a
АИ	33	3 (9,1) ^a	1 (33,3) ^a	0 (0) ^a
Итого	107	14 (13,1)	6 (42,9)	2 (14,3)

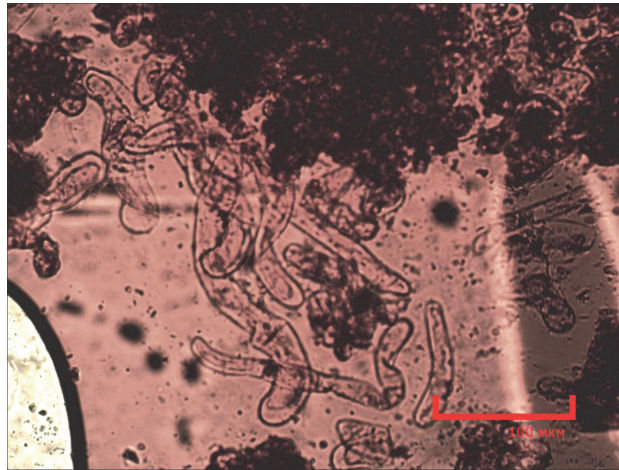


Рис. 1. Удлиненные клетки полученные из каллуса лиственницы Чекановского

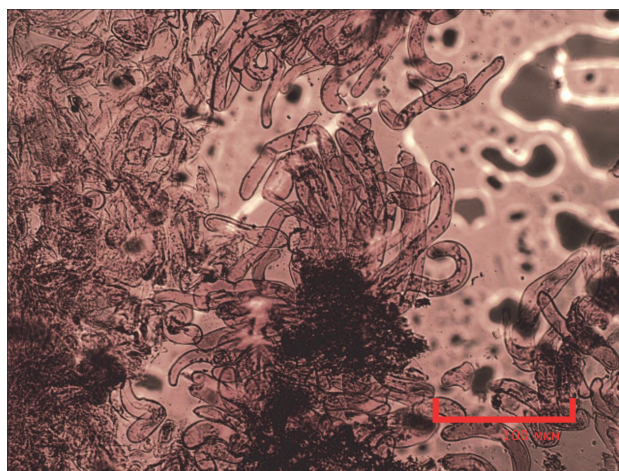


Рис. 2. Эмбрионально-суспензорная масса лиственницы Чекановского

Однако лиственница Чекановского имеет низкий процент каллусообразования из эксплантов (13 %). В исследовании [1] процент каллусообразования составил 53–93 % для лиственницы сибирской и 50–81 % для лиственницы Гмелина.

В исследовании *Larix decidua* и её гибридов с *Larix leptolepis* частота образования ЭСМ составила от 2 % до 62 % [12], В исследовании *Larix decidua* процент образования эмбрионного каллуса из незрелых зародышей составил 0–8,6 %, а из незрелых зародышей с мегаспорофитом 0–35,7 % [13]. У *Larix principis-rupprechtii* Mayr. частота образования эмбрионной ткани составила 0–30 %. Индукция эмбрионного каллуса у *Larix kaempferi* 3х *Larix gmelinii* 9 [14] составила 0–5,83 %. Лиственница Чекановского имеет низкий процент каллусообразования, из-за чего (13,1 %) получается низкий выход линий с удлинёнными клетками (4,7 %) и ЭСМ (1,9 %) от общего числа эксплантов. Однако, более высокий процент образования удлинённых клеток (35,7) и ЭСМ (14,3) от количества эксплантов образовавших каллус (Таблица).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процент каллусообразования у лиственницы Чекановского является низким, однако у эксплантов образовавших каллус процент образования удлинённых

клеток и ЭСМ значительно выше. Необходимы дополнительные исследования по индукции эмбрионного каллуса у лиственницы Чекановского, расширение выборки, числа деревьев, расширение периода и географии сбора материала для введения в культуру *in vitro*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Третьякова И. Н., Барсукова А. В. Соматический эмбриогенез в культуре *in vitro* трех видов лиственницы // Онтогенез. 2012. Т. 43, № 6. С. 425–425.
2. Tretyakova I. N., Park M. E. Collectible cell lines of *Larix sibirica* obtained by somatic embryogenesis and their ability to regenerate // Forests. 2023. Т. 14, № 9. С. 1920.
3. Третьякова И. Н. и др. Особенности формирования генеративных органов лиственницы сибирской и их морфогенетический потенциал // Успехи современной биологии. 2006. Т. 126, № 5. С. 472–481.
4. Тренин В. В. Цитоэмбриология лиственницы. 1986.
5. Милютин Л. И. Биоразнообразие лиственниц России // Хвойные бореальной зоны. 2003. Т. 21, № 1. С. 6–9.
6. Ирошников А. и др. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. 2004.

7. Круклис М. В., Милютин Л. И. Лиственница Чекановского. 1977.

8. Пак Л. Н., Бобринев В. П., Банщикова Е. А. Особенности выращивания культур лиственницы Чекановского в Забайкальском крае // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 2-1. С. 91–95.

9. Третьякова И. Н., Пак М. Э. Размножение лиственницы сибирской с использованием биотехнологии соматического эмбриогенеза // Лесоведение. 2023. № 5. С. 526–536.

10. Третьякова И. Н. Способ микроклонального размножения лиственницы сибирской в культуре *in vitro* через соматический эмбриогенез на среде АИ для плантационного лесовыращивания. 2012.

11. Gupta P. K., Durzan D. J. Shoot multiplication from mature trees of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and sugar pine (*Pinus lambertiana*) // Plant Cell Reports. 1985. Т. 4, № 4. С. 177–179.

12. Lelu M. A., Klimaszewska K., Charest P. J. Somatic embryogenesis from immature and mature zygotic embryos and from cotyledons and needles of somatic plantlets of *Larix* // Canadian Journal of Forest Research. 1994. Т. 24, № 1. С. 100–106.

13. Szczygiel K., Hazubska-Przybyl T., Bojarczuk K. Somatic embryogenesis of selected coniferous tree species of the genera *Picea*, *Abies* and *Larix* // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 2007. Т. 76, № 1.

14. Zhang S. et al. Embryogenic callus induction from immature zygotic embryos and genetic transformation of *Larix kaempferi* 3x *Larix gmelinii* 9 // PloS one. 2021. Т. 16, № 10. С. e0258654.

REFERENCES

1. Tret'yakova I. N., Barsukova A. V. Somaticheskii embriogenez v kul'ture in vitro trekh vidov listvennitsy // Ontogenez. 2012. Т. 43, № 6. С. 425–425.

2. Tret'yakova I. N., Park M. E. Collectible cell lines of *Larix sibirica* obtained by somatic embryogenesis and their ability to regenerate // Forests. 2023. Т. 14, № 9. С. 1920.

3. Tret'yakova I. N. i dr. Osobennosti formirovaniya generativnykh organov listvennitsy sibirskoi i ikh morfo-

geneticheskii potentsial // Uspekhi sovremennoi biologii. 2006. Т. 126, № 5. С. 472–481.

4. Trenin V. V. Tsitoembriologiya listvennitsy. 1986.

5. Milyutin L. I. Bioraznoobrazie listvennitsy Rossii // Khvoynye boreal'noi zony. 2003. Т. 21, № 1. С. 6–9.

6. Iroshnikov A. i dr. Listvennitsy Rossii. Bioraznoobrazie i selektsiya. 2004.

7. Krukliis M. V., Milyutin L. I. Listvennitsa Chekanovskogo. 1977.

8. Pak L. N., Bobrinev V. P., Banshchikova E. A. Osobennosti vyrashchivaniya kul'tur listvennitsy Chekanovskogo v Zabaikal'skom krae // Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2015. № 2-1. С. 91–95.

9. Tret'yakova I. N., Pak M. E. Razmnzhenie listvennitsy sibirskoi s ispol'zovaniem biotekhnologii somaticheskogo embriogeneza // Lesovedenie. 2023. № 5. С. 526–536.

10. Tret'yakova I. N. Sposob mikroklonal'nogo razmnzheiya listvennitsy sibirskoi v kul'ture in vitro cherez somaticheskii embriogenez na srede AI dlya plantatsionnogo lesovyrashchivaniya. 2012.

11. Gupta P. K., Durzan D. J. Shoot multiplication from mature trees of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and sugar pine (*Pinus lambertiana*) // Plant Cell Reports. 1985. Т. 4, № 4. С. 177–179.

12. Lelu M. A., Klimaszewska K., Charest P. J. Somatic embryogenesis from immature and mature zygotic embryos and from cotyledons and needles of somatic plantlets of *Larix* // Canadian Journal of Forest Research. 1994. Т. 24, № 1. С. 100–106.

13. Szczygiel K., Hazubska-Przybyl T., Bojarczuk K. Somatic embryogenesis of selected coniferous tree species of the genera *Picea*, *Abies* and *Larix* // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 2007. Т. 76, № 1.

14. Zhang S. et al. Embryogenic callus induction from immature zygotic embryos and genetic transformation of *Larix kaempferi* 3x *Larix gmelinii* 9 // PloS one. 2021. Т. 16, № 10. С. e0258654.

© Помыткин Н. С., Пак М. Э., Шемберг А. М., Третьякова И. Н., 2026

Поступила в редакцию 09.12.2025
Принята к печати 26.06.2026

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ КУСТОВЫХ ПЛОЩАДОК НА САНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ НАСАЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ЛЕСОТУНДРЫ

А. А. Сентемов, О. Н. Тюкавина

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

Аннотация. Экосистемы лесотундры испытывают растущую техногенную нагрузку при освоении нефтегазовых месторождений. Цель исследования – оценка воздействия кустовых площадок разного технологического статуса (долговременная эксплуатация и активное бурение) на санитарное состояние древостоев в лесотундре Ненецкого АО. На Харьягинском месторождении на 11 кустах заложены пробные площади на разном удалении от объектов. Сплошным перечетом определены категории состояния деревьев, классы повреждения по степени дефолиации и степени дехромации. Выявлен достоверный пространственный градиент ухудшения всех показателей при приближении к источникам воздействия. Наиболее сильное негативное влияние зафиксировано у активно разбуриваемой площадки, что указывает на пиковую нагрузку в период бурения. На расстоянии 15 м от активно разбуриваемых площадок состояние лесного насаждения характеризуется как сильно ослабленное; на расстоянии 45 м и 65 м – ослабленное. Средний класс повреждения деревьев по степени дефолиации сокращается с удалением на 45 м от активно разбуриваемой площадки на 50 %; на 65 м – на 77,8 %; средний класс повреждения деревьев по степени дехромации сокращается с удалением на 45 и 65 м – на 77,8 % по сравнению с насаждением вблизи от нее. Результаты подтверждают долгосрочный и кумулятивный характер воздействия даже для давно эксплуатируемых объектов. На расстоянии 65 м от кустовых площадок разного технологического статуса состояние насаждения в большинстве случаев значительно не отличается от контрольных пробных площадей, расположенных на разном расстоянии от хозяйственных построек в фоновой зоне вне кустовых площадок. Полученные данные могут применяться при разработке систем экологического мониторинга и планировании рекультивации в арктической зоне.

Ключевые слова: лесотундра, нефтегазовое месторождение, кустовая площадка, техногенное воздействие, санитарное состояние древостоя, пространственный градиент.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 75–82

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WELL PAD OPERATIONAL MODE ON THE SANITARY CONDITION OF FOREST-TUNDRA STANDS

A. A. Sentemov, O. N. Tyukavina

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation
E-mail: a.sentemov@narfu.ru

Annotation. Arctic forest-tundra ecosystems are under increasing technogenic pressure due to hydrocarbon field development. This study assessed the impact of well pads of different operational status (long-term and actively drilling) on the sanitary condition of adjacent tree stands in the Nenets Autonomous Okrug. Research at the Kharyaga field included 11 well pads with sample plots established at varying distances. A complete tree census determined condition, defoliation, and decoloration categories. Statistical analysis confirmed a significant spatial gradient of deterioration closer to infrastructure. The strongest impact was found near a recently active drilling site, indicating peak load during this phase. At a distance of 15 m from the actively drilled sites, the condition of the forest plantation is characterized as severely weakened; at a distance of 45 m and 65 m – weakened. The average damage class of trees by the degree of defoliation is reduced from 45 m away from the actively drilled site by 50 %; by 65 m – by 77.8 %; the average damage class of trees by the degree of dechromation is reduced from 45 m and 65 m – by 77.8 % compared to planting near it. Results demonstrate the long-term and cumulative nature of impact even from older pads. At a distance of 65 m from bush sites of different technological status, the condition of the plantation in most cases does not significantly differ from the control test areas located at different distances from outbuildings in the background area outside the bush sites. This data is crucial for developing environmental monitoring and reclamation strategies in the Arctic.

Keywords: Keywords: forest-tundra, oil and gas field, well pad, technogenic impact, sanitary condition of the stand, spatial gradient.

ВВЕДЕНИЕ

Арктические и субарктические регионы России, обладающие значительными запасами углеводородов, являются зоной интенсивного промышленного освоения. Экосистема лесотундры, представляющая собой узкую переходную полосу между северной тайгой и тундрой, играет критически важную экологическую роль. Она выступает стабилизатором многолетнемерзлых грунтов, депонируют значительные объемы углерода в биомассе и торфяных почвах, поддерживают уникальное биоразнообразие и регулирует гидрологический режим обширных территорий [1]. Однако лесотундра характеризуется крайне низкой продуктивностью, замедленными процессами роста и восстановления, что обуславливает её высокую уязвимость к любым внешним воздействиям [2].

Основным фактором антропогенной трансформации ландшафтов Крайнего Севера является развитие нефтегазодобывающей инфраструктуры [3]. В России ключевыми нефтегазоносными регионами, где активная добыча ведется в лесной зоне, являются Западно-Сибирская (Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа), Восточно-Сибирская (Иркутская область) и Тимано-Печорская (Республика Коми, Ненецкий АО) провинции. Вопросам влияния объектов нефтегазовой инфраструктуры на таежные леса посвящено значительное количество исследований [4–7]. В то же время, воздействие на лесотундровые редколесья, изучено недостаточно.

В условиях лесотундры техногенное воздействие приобретает специфические черты из-за наличия многолетнемерзлых пород. Нарушение растительно-мохового покрова ведет к изменению теплообмена, протаиванию мерзлоты, развитию термокарста и термоэрозии, что многократно усиливает и делает зачастую необратимыми последствия даже для локальных объектов, таких как кустовые площадки – производственные участки, на которых размещается группа скважин при кустовом бурении [8].

Целью данного исследования является оценка и сравнение воздействия кустовых площадок различного технологического статуса (давно эксплуатируемые и находящиеся в стадии активного разбурирования) на состояние древостоев в условиях лесотундры. В задачи входило: выявление пространственных закономер-

ностей изменения санитарного состояния древостоя (категории состояния, дефолиации, дехромации) в зависимости от расстояния до источника воздействия; сравнительный анализ уровня воздействия кустовых площадок разного возраста и типа скважин; оценка дополнительной нагрузки, создаваемой активными буровыми работами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходные данные получены в августе 2025 г. на Харьягинском месторождении (лесотундра Ненецкого АО). Климат умеренно-континентальный: средняя температура января -19°C , июля $+12^{\circ}\text{C}$. Рельеф равнинный, заболоченный, с преобладанием торфяных и глееподзолистых почв. Растительность – елово-березовые редколесья (сомкнутость крон 0,2–0,4) с кустарниковым, травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусами [9].

В качестве объектов влияния на состояние древостоя были выбраны 11 кустовых площадок, принадлежащих двум компаниям-операторам ООО «Лукойл-Пермь» и ООО «ЗАРУБЕЖНЕФТЬ-добыча Харьяга» [10]. Площадки различались по сроку эксплуатации (от 18 до 37 лет), количеству и типу скважин (добывающие, нагнетательные). Особый интерес представляла кустовая площадка ЕР-2 (№ 9), где на момент проведения полевых работ в течение последних трех лет велось активное бурение новых скважин. Для контроля фонового состояния заложена пробная площадь (№ 8) вблизи хозяйственных построек, не связанных с основным технологическим циклом добычи углеводородов (рис. 1).

Кустовая площадка представляет собой участок территории на месторождении предназначенный эксплуатации группы скважин. На кустовой площадке могут размещаться как добывающие и так нагнетательные скважины. Добывающие скважины используются для подъема нефти или газа из продуктивного пласта на поверхность. Нагнетательные скважины используются для поддержания пластового давления. В них закачивают воду или другие агенты, чтобы искусственно поддерживать давление в пласте и «вытеснять» нефть к добывающим скважинам [11; 12].

Информация по количеству и типу скважин на выбранных кустах Харьягинского месторождения приведена в табл. 1.

Таблица 1
Характеристика кустовых площадок на Харьягинском месторождении

№ п/п	№ куста скважин	Количество скважин		Площадь кустовой площадки, м ²	Срок эксплуатации, лет (на 2025 год)
		добывающие	нагнетательные		
1	4026	–	6	6580	34
2	59	6	2	8164	35
3	62	5	1	4320	35
4	NP-2	6	–	7952	22
5	65	7	2	5029	34
6	WP-1	12	5	13920	26
7	86	6	1	5670	34
8	Хоз. постройки	–	–	4620	35
9	ЕР-2 (активное бурение)	10	4	24964	18
10	31А	9	4	5895	36
11	9А	8	2	4278	37
12	130	10	4	8700	32

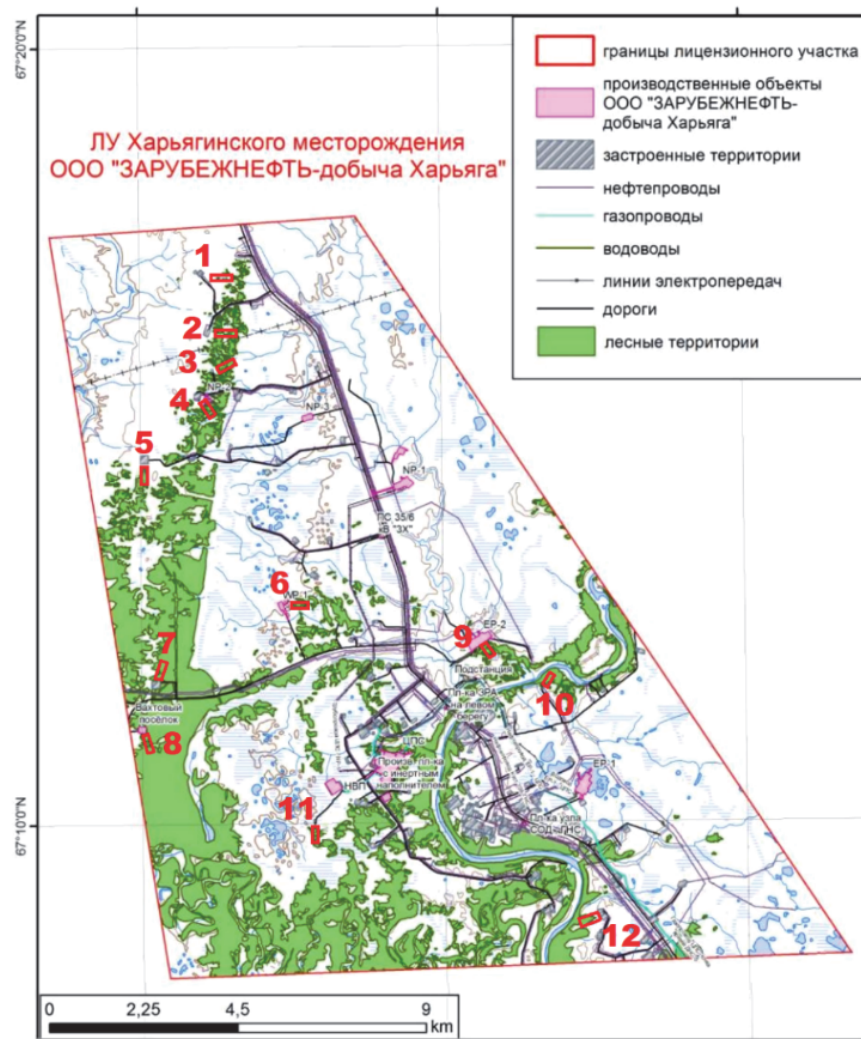


Рис. 1. Карта Харьягинского месторождения

Для каждой кустовой площадки было заложено по три пробные площади (ПП) на расстояниях от ее обваловки: 15, 45 и 65 м. Закладывали ленточные пробные площади шириной 20 м. Длина пробной площади определялась количеством деревьев (до 150 шт.). На каждой ПП проводился сплошной пересчет деревьев по ступеням толщины и по категориям состояния. В процессе исследований для каждого дерева определяли: категорию состояния, классы повреждения по степени дефолиации и степени дехромации. Статистическая обработка данных проведена в программном продукте Statistica 12. Для каждой ПП рассчитаны средние арифметические значения показателей и их ошибки. Достоверность различий между выборками (парами ПП на разных расстояниях от одного и того же объекта) оценивалась с помощью t -критерия Стьюдента. Критическое значение $t_{\text{кр}}$ принималось равным 2,0 (при уровне значимости $p=0,95$). Различия считались статистически значимыми при $t > 2,0$.

Проведённые полевые исследования показали, что лесотундровые редколесья на территории Харьягинского месторождения представляют собой разреженные (сомкнутость крон 0,1–0,4, полнота 0,3–0,5), низкопродуктивные насаждения (класс бонитета V–Va) естественного происхождения. Древостой одноярус-

ный, простой по структуре, с преобладанием ели сибирской (*Picea obovata*) в возрасте до 200 лет, высотой 6–8 (до 17) м и диаметром 12–15 (до 30) см, с примесью берёзы (табл. 1). Состав древостоя варьирует от чистых ельников (10Е) до смешанных березово-еловых насаждений с долей берёзы до 30 % (7ЕЗБ). Подрост ели присутствует, но угнетён; подлесок образован ерником (*Betula pumila*), ивами (*Salix* spp.) и кустарничками. Тип леса соответствует ельникам зеленомошно-лишайниковым на дренированных участках и березово-еловым редколесьям сфагновым в условиях избыточного увлажнения. Таксационные параметры согласуются с литературными данными для лесотундры Европейского Северо-Востока [13; 14].

Таксационные показатели отражают экстремальные условия произрастания на северном пределе леса: короткий вегетационный период, распространение многолетней мерзлоты, бедные суглинистые или заболоченные почвы. Древостои характеризуются низкой товарностью (IV класс) ввиду сильной сбежистости, искривлённости и малых размеров стволов, что исключает их промышленную ценность. Основная роль этих редколесий – средообразующая и стабилизирующая в условиях интенсивного техногенного воздействия нефтегазового комплекса [15; 16].

Таблица 2

Таксационная характеристика лесных насаждений в зонах влияния кустовых площадок различного технологического статуса

№ п/п	Куст скважин	Расстояние от объекта, м	Тип леса	Состав древостоя	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Класс бонитета	Относительная полнота
1	4026	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	8Е2Б	7,6	14,2	V	0,32
		45		9Е1Б	7,8	14,6	V	0,34
		65		10Е	7,9	16,2	V	0,40
2	59	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	7Е3Б	7,4	13,7	Va	0,30
		45		8Е2Б	7,5	14,0	V	0,32
		65		9Е1Б	7,7	15,8	V	0,35
3	62	15	Березово-еловое редколесье сфагновое	7Е3Б	7,5	13,9	Va	0,31
		45		8Е2Б	7,6	14,3	V	0,33
		65		9Е1Б	7,8	15,7	V	0,36
4	NP-2	15	Березово-еловое редколесье сфагновое	8Е2Б	7,6	14,0	V	0,32
		45		9Е1Б	7,8	14,5	V	0,34
		65		9Е1Б	8,0	16,0	V	0,38
5	65	15	Березово-еловое редколесье сфагновое	7Е3Б	7,4	13,8	Va	0,30
		45		8Е2Б	7,6	14,2	V	0,33
		65		9Е1Б	7,8	15,6	V	0,36
6	WP-1	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	7Е3Б	7,3	13,5	Va	0,29
		45		8Е2Б	7,5	14,0	Va	0,31
		65		8Е2Б	7,6	15,2	V	0,34
7	86	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	7Е3Б	7,5	14,1	Va	0,31
		45		8Е2Б	7,7	14,4	V	0,33
		65		9Е1Б	7,9	15,9	V	0,37
8	Хоз. постройки (фон)	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	8Е2Б	7,7	14,7	V	0,32
		45		9Е1Б	7,9	15,3	V	0,36
		65		10Е	8,2	16,5	V	0,44
9	ЕР-2 (активное бурение)	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	7Е3Б	7,5	13,8	Va	0,31
		45		8Е2Б	7,8	14,6	Va	0,34
		65		9Е1Б	7,8	15,5	V	0,38
10	31А	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	7Е3Б	7,4	13,8	Va	0,30
		45		8Е2Б	7,6	14,3	V	0,33
		65		9Е1Б	7,8	15,8	V	0,36
11	9А	15	Березово-еловое редколесье сфагновое	7Е3Б	7,3	13,6	Va	0,29
		45		7Е3Б	7,5	14,1	Va	0,32
		65		8Е2Б	7,7	15,4	V	0,35
12	130	15	Ельник зелено-мошно-лишайниковый	7Е3Б	7,4	13,7	Va	0,30
		45		8Е2Б	7,6	14,2	V	0,33
		65		9Е1Б	7,8	15,7	V	0,36

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При удалении от кустовых площадок средние значения категорий состояния, дефолиации и дехромации уменьшаются, состояние древостоя улучшается (табл. 3). Эта тенденция наблюдалась для подавляющего большинства объектов. Наибольшее негативное воздействие на древостои оказывают активно разбуриваемые площадки и долговременно эксплуатируемые добывающие кусты. На расстоянии 15 м от активно разбуриваемых площадок и от состояния лесного насаждения характеризуется как сильно ослабленное; на расстоянии 45 м и 65 м – ослабленное. На расстоянии 15 м от долговременно эксплуатируемых добывающих площадок состояние лесного насаждения пограничное между сильно ослабленным и ослабленным; на расстоянии 45 м и 65 м – ослабленное. На расстоянии 15 м и 45 м от куста с нагнетательными скважинами состояние лесного насаждения характеризуется как ослабленное; на расстоянии 65 м – состояние лесного насаждения пограничное между ослабленным и без признаков ослабления.

Индекс категории состояния насаждения значительно сокращается при удалении на 65 м от активно разбуриваемой площадки по сравнению с насаждением на расстоянии 15 м на 35,7 % ($t = 6,3$ при $t_{st} = 2,0$). Средний класс повреждения деревьев по степени дефолиации сокращается с удаление на 45 м от активно разбуриваемой площадки на 50 % ($t = 2,5$ при $t_{st} = 2,0$); на 65 м – на 77,8 % ($t = 4,74$ при $t_{st} = 2,0$); средний класс повреждения деревьев по степени дехромации сокращается с удаление на 45 и 65 м – на 77,8 % ($t = 3,0$ при $t_{st} = 2,0$).

При удалении уже на 45 м от долговременно эксплуатируемых добывающих кустов отмечается значимое улучшение состояния древостоя. Так по сравнению с насаждением на расстоянии 15 м от обсуждаемого объекта категория состояния насаждения сокращается на 24,0 % ($t = 2,7$ при $t_{st} = 2,0$); средний класс повреждения деревьев по степени дефолиации – на 40,0 % ($t = 2,7$ при $t_{st} = 2,0$); средний класс повреждения деревьев по степени дехромации – на 85,7 % ($t = 2,7$ при $t_{st} = 2,0$).

Таблица 3

Санитарное состояние древостоев в зонах влияния кустовых площадок различного технологического статуса

Объект	Расстояние, м	Категория состояния	Средний класс повреждения деревьев по степени	
			дефолиации	дехромации
Активно разбуриваемая площадка	15	2,8±0,2	1,8±0,3	0,9±0,3
	45	2,4±0,2	0,9±0,2	0,2±0,1
	65	1,8±0,1	0,4±0,1	0,2±0,0
Долговременно эксплуатируемые добы- вающие кусты	15	2,5±0,2	1,5±0,2	0,7±0,2
	45	1,9±0,1	0,9±0,1	0,1±0,1
	65	1,6±0,1	0,4±0,1	0,1±0,0
Куст с нагнетательными скважинами	15	2,3±0,3	1,3±0,3	1,0±0,3
	45	2,2±0,1	1,2±0,2	0,5±0,2
	65	1,5±0,2	0,4±0,2	0,1±0,1
Фоновый участок (хоз, постройки)	15	1,8±0,2	0,6±0,1	0,2±0,1
	45	1,7±0,2	0,7±0,1	0,1±0,1
	65	1,4±0,1	0,5±0,1	0,1±0,0

Для куста с нагнетательными скважинами значимое улучшение состояния древостоя отмечается только на расстоянии от него 65 м. Так категория состояния насаждения сократилась на 34,8 % ($t = 2,2$ при $t_{st} = 2,0$); средний класс повреждения деревьев по степени дефолиации – на 69,2 % ($t = 2,5$ при $t_{st} = 2,0$); средний класс повреждения деревьев по степени дехромации – на 90,0 % ($t = 2,8$ при $t_{st} = 2,0$).

На расстоянии 65 м от кустовых площадок разного технологического статуса состояние насаждения в большинстве случаев значимо не отличается от контрольных пробных площадей, расположенных на разном расстоянии от хозяйственных построек в фоновой зоне вне кустовых площадок. Удаленность от хозяйственных построек значимо не влияет на состояние насаждения, хотя насаждение без признаков ослабления отмечается лишь на расстоянии 65 м.

Анализ значимости различий в показателях состояния древостоя между выборками подтвердил реальность выявленного пространственного градиента.

Значимые различия наблюдались при сравнении данных показателей насаждений на расстоянии 15 м и 65 м от кустовых площадок независимо от их технологических режимов (рис. 2). Реже значимые различия фиксировались между насаждениями на расстоянии 15–45 м и 45–65 м, что может указывать на плавный, а не резко очерченный характер переходной зоны воздействия в условиях разреженных лесотундровых насаждений.

Влияние куста скважин, где к моменту исследований в течение трёх лет велось бурение, на показатели состояния насаждения значимо на любых сравниваемых расстояниях (рис. 3). Полученный результат может быть обусловлен интенсивным уровнем воздействия в процессе бурения скважин: испарение и утечки химических реагентов в составе буровых технологических жидкостей, работа дизельных генераторов, пыль при обустройстве площадки под бурение, изменение рельефа, вибрация, загрязнение водоносных горизонтов и др.

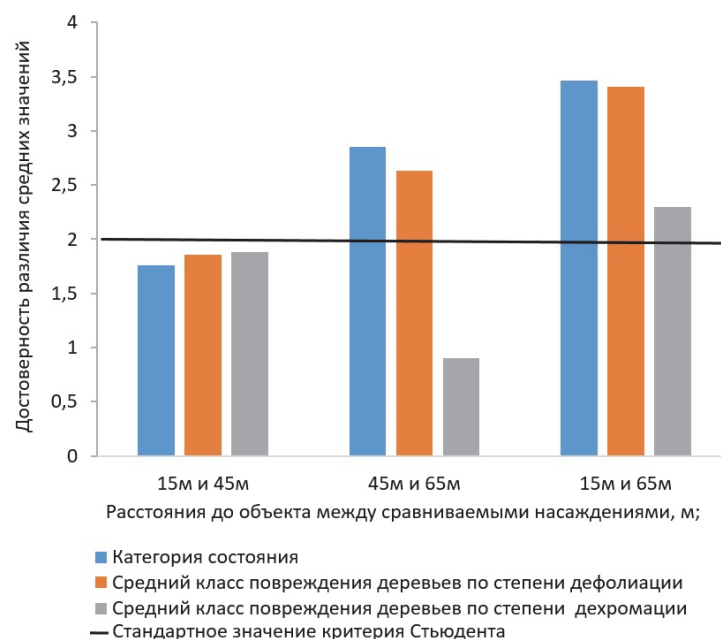


Рис. 2. Уровень значимости различий показателей состояния насаждения в зависимости от расстояния до кустовых площадок

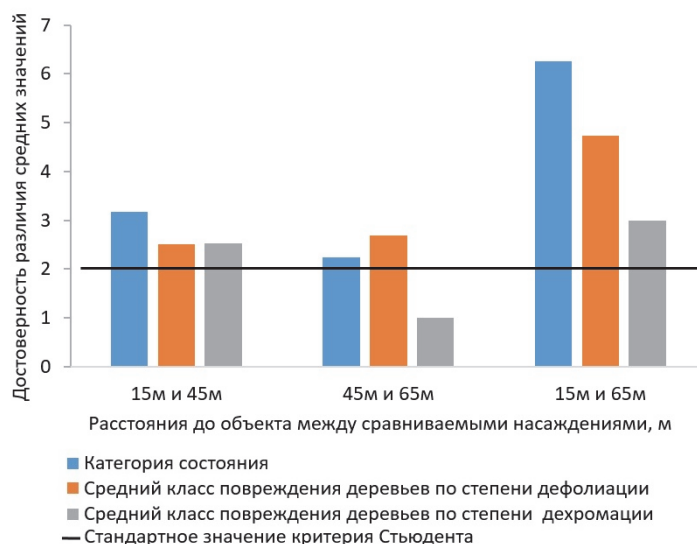


Рис. 3. Уровень значимости различий показателей состояния насаждения в зависимости от расстояния до кустовых площадок с активными буровыми работами

Полученные результаты согласуются с данными многочисленных исследований, проведенных в таежной зоне Западной Сибири и других нефтедобывающих регионов, где также фиксируется формирование концентрических зон угнетения растительности вокруг точечных техногенных объектов. Однако в условиях лесотундры выявленные эффекты имеют важные особенности [17–19].

Основными факторами негативного воздействия кустовых площадок на древостой лесотундры являются химическое загрязнение, механическое нарушение почв и изменение криогенного режима. Химическое воздействие связано с диффузными выбросами углеводородов и продуктов сгорания, которые даже в низких концентрациях оказывают хроническое стрессовое влияние на растения в условиях замедленного метаболизма. Механический фактор проявляется в уплотнении почвы и повреждении корневых систем при движении тяжелой техники. Совокупное действие этих факторов приводит к значительному снижению устойчивости прилегающих лесных экосистем [20–22].

Сохранившаяся негативная динамика состояния древостоев вблизи кустовых площадок, эксплуатируемых более 30 лет, свидетельствует о крайне низком восстановительном потенциале экосистемы лесотундры. Долговременный характер воздействия обусловлен двумя группами факторов. Во-первых, это первичные нарушения, нанесенные на этапе строительства (сплошная расчистка территории, планировка грунта, формирование шламовых амбаров), последствия которых не нивелируются в суровых климатических условиях. Во-вторых, в период добычи сохраняется постоянное техногенное воздействие, связанное с работой оборудования, движением транспорта, риском аварийных утечек и диффузным химическим загрязнением. Совокупное влияние этих факторов приводит к необратимой трансформации почвенно-растительного покрова и устойчивому угнетению древостоев на прилегающей территории.

Результаты, полученные для площадки ЕР-2, однозначно указывают на то, что этап активного бурения

характеризуется наиболее значительной техногенной нагрузкой. Это обусловлено комплексом сопутствующих факторов: максимальной интенсивностью движения тяжелой техники, непрерывной работой мощных дизель-генераторов, складированием химических реагентов и буровых шламов, а также повышенным риском локальных аварийных разливов. Именно в этот период формируется первичный ущерб, последствия которого оказывают влияние на экосистему в последующие десятилетия.

Сравнительно слабое воздействие куста с нагнетательными скважинами является важным практическим наблюдением. Оно подтверждает, что ключевыми источниками негативного влияния являются технологические процессы, связанные с извлечением углеводородов, а не просто факт присутствия скважин и инфраструктуры.

Выявленная пространственная закономерность в целом характерна и для таежных экосистем. Однако в лесотундре радиус значимого воздействия может быть меньше из-за изначальной разреженности древостоя и более интенсивного рассеивания загрязнителей на открытых пространствах. С другой стороны, последствия здесь могут быть более долговременными и катастрофичными из-за вовлечения криогенных процессов.

Полученные данные согласуются с международным опытом изучения воздействия нефтегазовой инфраструктуры в высоких широтах. Исследования на Аляске (месторождения Прадхо-Бей) и в канадской Арктике также показывают, что стадия бурения и начального обустройства месторождений является наиболее разрушительной, а восстановление растительного покрова в арктических условиях занимает десятилетия, часто приводя к смене доминирующих видов [23–25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование на Харьягинском месторождении достоверно показывает, что кустовые площадки оказывают статистически значимое негативное влияние на состояние прилегающих древостоев лесотундры. Сила и характер этого влияния зависят

от технологического статуса объекта: наиболее сильное воздействие зафиксировано вблизи площадки с активным бурением, долговременно эксплуатируемые добывающие кусты также формируют устойчивую зону угнетения, тогда как площадка с нагнетательными скважинами демонстрирует минимальное влияние.

Установлено, что с увеличением расстояния от источника воздействия наблюдается последовательное улучшение санитарного состояния древостоя. Наибольшие значимые различия фиксируются между ближней (15 м) и дальней (65 м) зонами. Данный градиент служит индикатором техногенного воздействия. Даже для кустовых площадок, эксплуатируемых более 30 лет, не наблюдается выравнивания состояния древостоя на разных расстояниях. Это свидетельствует о том, что нарушения, полученные на этапе строительства и начальной эксплуатации, не компенсируются в суровых условиях лесотундры, а воздействие носит хронический характер.

Особое внимание при экологическом мониторинге должно уделяться площадкам на стадии активного бурения и новым кустам в первые годы эксплуатации. Проведенная работа вносит вклад в понимание механизмов антропогенной трансформации лесотундры и предоставляет научно обоснованные критерии для оценки и минимизации экологического ущерба при освоении арктических нефтегазовых месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Акулышина Н. П., Новаковская Т. В. Оценка антропогенной трансформации растительности по шкале гемеробности в лесотундре и тундре Европейского Северо-Востока (Ненецкий автономный округ) // Освоение Севера и проблемы рекультивации : докл. 2-й Междунар. конф. Сыктывкар, 1994. С. 53–64.
- Акулышина Н. П. Значение сукцессии и структуры растительности для оценки устойчивости экосистем и регулирования динамических процессов // Биологическая рекультивация на Севере (вопросы теории и практики). Сыктывкар, 1992. С. 28–42.
- Антропогенная динамика растительного покрова Арктики и Субарктики: принципы и методы изучения / под ред. Б. А. Юрцева. СПб., 1995. 185 с.
- Балданова Л. П., Балданова В. А. Влияние нефтегазодобычи на состояние лесных систем в Иркутской области // *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2022. Т. 9. № 2. С. 06ECOR222. DOI: 10.15862/06ECOR222
- Гашев С. Н., Гашева М. Н., Филиппова Л. В. Экологические последствия нефтегазодобычи на землях лесного фонда Западной Сибири // *Лесоведение*. 1991. № 5. С. 51–59.
- Балданова Л. П., Балданова В. А. Влияние нефтегазодобычи на состояние лесных экосистем в Иркутской области // *Отходы и ресурсы*. 2022. Т. 9. № 2.
- Зонирование подфакельных территорий на нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа с целью их последующей рекультивации / А. Е. Морозов, В. Г. Решетников, Н. А. Луганский, А. Г. Чемякин // *Известия СПбГЛТУ*. 2007. № 180. С. 114–125.
- Гладков В. П. Влияние гусеничного транспорта на протаивание многолетней мерзлоты // Влияние геологоразведочных работ на природную среду Большеземельской тундры : тр. Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 1988. № 90. С. 36–48.
- Новаковская Т. В., Акулышина Н. П. Использование геоботанических показателей экологической шкалы для картографирования нарушенных земель на Харьягинском нефтегазовом месторождении // *Экология*. 1997. № 4. С. 256–262.
- Отчет о локальном экологическом мониторинге окружающей среды Харьягинского месторождения за 2019 г. ООО «Зарубежнефть-добыча Харьяга». 2020. URL: <https://www.nestro.ru/upload/iblock/140/42ecqaxdvfounxhefhgh5j9swvj17436.pdf> (дата обращения: 20.02.2026).
- Алгоритм корректировки положения кустовых площадок при решении задачи разработки нефтяных месторождений / Е. Д. Кулаков, А. С. Михалев, А. В. Саренков [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2023. Т. 22, № 2. С. 447–481. DOI: 10.15622/ia.22.2.8
- Определение влияния жидкости глушения на снижение фильтрационных характеристик карбонатных горных пород при освоении скважин / А. А. Сентемов, М. Б. Дорфман // *Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334, № 6. С. 35–46. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4067
- Василевич В. И., Бибилова Т. В. Сфагновые ельники Европейской России // *Бот. журн.* 2004. № 89(5). С. 734–748.
- Медведева В. М., Корнилова Л. И., Вайнблат В. З. Основные типы заболоченных ельников Карелии // *Болотно-лесные системы Карелии и их динамика*. Л., 1980. С. 78–99.
- Лебедев А. В., Кузмичев В. В. Таксационные показатели древостоев сосны по данным длительных наблюдений // *Сибирский лесной журнал*. 2023. № 2. С. 3–16.
- Рогозина Е. А., Шиманский В. К. Некоторые теоретические аспекты восстановления нефтезагрязненных почвенных экосистем // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2007. Т. 2. С. 1–16.
- Губанов А. Г. Экологические проблемы при освоении углеводородного сырья на территории крайнего севера тюменской области // *Успехи современного естествознания*. 2009. № 7. С. 147–149.
- Русецкая Г. Д. Недропользование в нефтегазовом комплексе: закономерности использования и сохранения экологических систем // *Известия Байкальского гос. ун-та*. 2019. Т. 29, № 4. С. 523–532.
- Воздействие нефти и нефтепродуктов на окружающую среду / Н. М. Привалова, М. В. Двадненко, А. А. Некрасова и др. // *Научный журнал КубГАУ*. 2017. № 125(01).
- Розинкина Е. П. Лесная рекультивация нарушенных земель в условиях подзоны северной тайги ЯНАО : дис. ... канд. с.-х. наук: 4.1.6. Екатеринбург, 2025.
- Захарова Е. А. Влияние нефтедобычи на состояние окружающей среды // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. Т. 9, № 2 (96). С. 13–16.
- Балданова Л. П., Балданова В. А. Влияние нефтегазодобычи на состояние лесных экосистем в Иркутской области // *Отходы и ресурсы*. 2022. Т. 9, № 2. DOI: 10.15862/06ECOR222. EDN GQOJNH.

23. Ebersole J. J. Short-term vegetation recovery at an Alaskan Arctic Coastal Plain site // *Arct. Alp. Res.* 1987. Vol. 19, № 4. P. 442–450.

24. McKendric J. D. Plant succession on disturbed sites, North Slope, Alaska, USA // *Arctic and Alpine Research*, 1987. Vol. 19, № 4. P. 554–565.

25. Jill F. Johnstone, Steven V. Kokelj. Environmental Conditions and Vegetation Recovery at Abandoned Drilling Mud Sumps in the Mackenzie Delta Region, Northwest Territories, Canada // *Arctic*. 2008. Vol. 61, № 2. P. 199–211. DOI: 10.14430/arctic35

REFERENCES

1. Akul'shina N. P., Novakovskaya T. V. Ocenka antropogennoj transformacii rastitel'nosti po shkale gemerobnosti v lesotundre i tundre Evropejskogo Severo-Vostoka (Neneckij avtonomnyj okrug) // *Osvoenie Severa i problemy rekul'tivacii* : dokl. 2-j Mezhdunar. konf. Syktyvkar, 1994. S. 53–64.

2. Akul'shina N. P. Znachenie sukcesii i struktury rastitel'nosti dlya ocenki ustojchivosti ehkosisistem i regulirovaniya dinamicheskikh processov // *Biologicheskaya rekul'tivaciya na Severe (voprosy teorii i praktiki)*. Syktyvkar, 1992. S. 28–42.

3. Antropogennaya dinamika rastitel'nogo pokrova Arktiki i Subarktiki: principy i metody izucheniya / pod red. B. A. Yurceva. SPb., 1995. 185 s.

4. Baldanova L. P., Baldanova V. A. Vliyanie neftegazodobychi na sostoyanie lesnykh sistem v Irkutskoj oblasti // *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2022. T. 9, № 2. S. 06ECOR222. DOI: 10.15862/06ECOR222.

5. Gashev S. N., Gasheva M. N., Filippova L. V. Ehkologicheskie posledstviya neftegazodobychi na zemlyakh lesnogo fonda Zapadnoj Sibiri // *Lesovedenie*. 1991. № 5. S. 51–59.

6. Baldanova L. P., Baldanova V. A. Vliyanie neftegazodobychi na sostoyanie lesnykh ehkosisistem v Irkutskoj oblasti // *Otkhody i resursy*. 2022. T. 9, № 2.

7. Zonirovanie podfakel'nykh territorij na neftyanykh mestorozhdeniyakh Khanty-Mansijskogo avtonomnogo okruga s cel'yu ikh posleduyushchej rekul'tivacii / A. E. Morozov, V. G. Reshetnikov, N. A. Luganskij, A. G. Chernyakin // *Izvestiya SPBGLTU*. 2007. № 180. S. 114–125.

8. Gladkov V. P. Vliyanie gusenichnogo transporta na protaivanie mnogoletnej merzloty // *Vliyanie geologorazvedochnykh rabot na prirodnyuyu sredy Bol'shezemel'skoj tundry* : tr. Komi NC URO RAN. Syktyvkar, 1988. № 90. S. 36–48.

9. Novakovskaya T. V., Akul'shina N. P. Ispol'zovanie geobotanicheskikh pokazatelej ehkologicheskoy shkaly dlya kartografirovaniya narushennykh zemel' na Khar'yaginskom neftegazovom mestorozhdenii // *Ehkologiya*. 1997. № 4. S. 256–262.

10. Otchet o lokal'nom ehkologicheskom monitoringe okruzhayushchej sredy Khar'yaginskogo mestorozhdeniya za 2019 g. OOO «Zarubezhneft'-dobycha Khar'yagA». 2020. URL: <https://www.nestro.ru/upload/iblock/140/42>

ecqaxdvfounxhefgh5j9swwj17436.pdf (data obrashcheniya: 20.02.2026).

11. Algoritm korrekcirovki polozheniya kustovykh ploshchadok pri reshenii zadachi razrabotki neftyanykh mestorozhdenij / E. D. Kulakov, A. S. Mikhalev, A. V. Sarenkov [i dr.] // *Informatika i avtomatizaciya*. 2023. T. 22, № 2. S. 447–481. DOI: 10.15622/ia.22.2.8.

12. Sentemov A. A., Dorfman M. B. Opredelenie vliyaniya zhidkosti glusheniya na snizhenie fil'tracionnykh kharakteristik karbonatnykh gornyx porod pri osvoenii skvazhin // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2023. T. 334, № 6. S. 35–46. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4067

13. Vasilevich V. I., Bibikova T. V. Sfagnovyje el'niki Evropejskoj Rossii. Bot. zhurn. 2004. № 89(5). S. 734–748.

14. Medvedeva V. M., Kornilova L. I., Vajnblat V. Z. Osnovnye tipy zabolochennykh el'nikov Karelii // *Bolotnolesnye sistemy Karelii i ikh dinamika*. L., 1980. S. 78–99.

15. Lebedev A. V., Kuzmichev V. V. Taksacionnye pokazateli drevostoev sosny po dannym dlitel'nykh nablyudenij // *Sibirskij lesnoj zhurnal*. 2023. № 2. S. 3–16.

16. Rogozina E. A., Shimanskij V. K. Nekotoryje teoreticheskie aspekty vosstanovleniya neftezagryaznennykh pochvennykh ehkosisistem // *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2007. T. 2. S. 1–16.

17. Gubanov A. G. Ehkologicheskie problemy pri osvoenii uglevodorodnogo syr'ya na territorii krajnego severa tyumenskoj oblasti // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2009. № 7. S. 147–149.

18. Ruseckaya G. D. Nedropol'zovanie v neftegazovom komplekse: zakonomernosti ispol'zovaniya i sokhraneniya ehkologicheskikh sistem // *Izvestiya Bajkal'skogo gos. un-ta*. 2019. T. 29. № 4. S. 523–532.

19. Privalova N. M., Dvadenko M. V., Nekrasova A. A. i dr. Vozdejstvie nefi i nefteproduktov na okruzhayushchuyu sredy // *Nauchnyj zhurnal KuBGU*. 2017. № 125(01).

20. Rozinkina E. P. Lesnaya rekul'tivaciya narushennykh zemel' v usloviyakh podzony severnoj tajgi YANAO : dis. ... kand. s.-kh. nauk: 4.1.6. Ekaterinburg, 2025.

21. Zakharova E. A. Vliyanie neftedobychi na sostoyanie okruzhayushchej sredy // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. T. 9. № 2 (96). S. 13–16.

22. Baldanova L. P., Baldanova V. A. Vliyanie neftegazodobychi na sostoyanie lesnykh ehkosisistem v Irkutskoj oblasti // *Otkhody i resursy*. 2022. T. 9, № 2. DOI: 10.15862/06ECOR222. EDN GQOJNH.

23. Ebersole J. J. Short-term vegetation recovery at an Alaskan Arctic Coastal Plain site // *Arct. Alp. Res.* 1987. Vol. 19, № 4. P. 442–450.

24. McKendric J. D. Plant succession on disturbed sites, North Slope, Alaska, USA // *Arctic and Alpine Research*, 1987. Vol. 19, № 4. P. 554–565.

25. Jill F. Johnstone, Steven V. Kokelj. Environmental Conditions and Vegetation Recovery at Abandoned Drilling Mud Sumps in the Mackenzie Delta Region, Northwest Territories, Canada // *Arctic*. 2008. Vol. 61, № 2. P. 199–211. DOI: 10.14430/arctic35

ОЦЕНКА ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ

Д. Д. Карпухов, В. А. Савченкова

Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана (МФ МГТУ)
Российская Федерация, 141005, Московская область, г. Мытищи, 1-я Институтская улица, 1
E-mail: infamousparzival@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу организационной структуры лесного хозяйства России, установленной тремя последовательно принятыми Лесными кодексами, а именно, Российской Советской Федеративной Социалистической Республикой в 1978 году, далее в Российской Федерации, как правопреемника, в 1997 и 2006 годы. Методологической основой исследования является последовательное сопоставление моделей управления лесным фондом в период 1978–2006 годы, позволяющее проследить эволюцию системы от централизованной пятиуровневой иерархии советского периода через сбалансированную модель переходного периода к радикально децентрализованной структуре, действующей с 2007 года. Показан эволюционный характер перехода от модели 1978 года к модели 1997 года при сохранении институциональной основ (лесхозы, профессиональная лесная служба, единая вертикаль управления). Реформа 2006 года привела к ликвидации лесхозов, разрушению кадрового потенциала (сокращение численности работников с 80–100 до 32 тысяч человек), деградации лесоустройства (сокращение объемов более чем в 10 раз), многократному увеличению площади лесных пожаров (с 1–2 до 18 млн гектаров в 2021 году). На основе систематизации экспертных оценок ведущих отечественных и зарубежных ученых, а также статистических данных Счетной палаты Российской Федерации и Рослесхоза, выявлено, что ключевым институциональным дефектом действующей модели является размывание ответственности: федерация выступает собственником лесов, но передала управление регионам; регионы управляют, но не несут имущественной ответственности; арендаторы пользуются, но их интерес ограничен сроком договора. Выполнена классификация сохранившихся и утраченных элементов организационной структуры. В статье приведено обоснование вывода о необходимости институциональной реформы, направленной на восстановление целостности системы управления лесами.

Ключевые слова: организационная структура лесного хозяйства, Лесной кодекс, лесоуправление, лесхозы, реформа 2006 года, децентрализация, лесная охрана, лесоустройство.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 83–92

ASSESSMENT OF THE ORGANIZATIONAL STRUCTURE OF FORESTRY IN RUSSIA

D. D. Karpukhov, V. A. Savchenkova

Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University (MB MSTU)
1, 1st Institutskaya str., Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation
E-mail: infamousparzival@gmail.com

Abstract. The article presents a comparative analysis of the organizational structure of forestry in Russia as established by three consecutively adopted Forest Codes: by the Russian Soviet Federative Socialist Republic in 1978, and subsequently by the Russian Federation, as its legal successor, in 1997 and 2006. The methodological basis of the study is the sequential comparison of forest fund management models over the period 1978–2006, which allows tracing the evolution of the system from the centralized five-tier hierarchy of the Soviet period through the balanced transitional model to the radically decentralized structure in effect since 2007. The evolutionary nature of the transition from the 1978 model to the 1997 model is demonstrated, with the preservation of the institutional foundations (leskhoz, professional forest service, unified management hierarchy). The 2006 reform led to the elimination of leskhoz, the destruction of human resource capacity (a reduction in the number of employees from 80–100 to 32 thousand), the degradation of forest inventory (a more than tenfold reduction in volume), and a manifold increase in forest fire area (from 1–2 to 18 million hectares in 2021). Based on a systematic review of expert assessments from leading Russian and international scientists, as well as statistical data from the Accounts Chamber of the Russian Federation and the Federal Forestry Agency (Rosleskhoz), it was established that the key institutional defect of the current model is the diffusion of responsibility: the federation acts as the owner of forests but has delegated management to the regions; the regions manage forests but bear no proprietary liability; lessees utilize forests but their interest is limited to the term of the lease agreement. A classification of the preserved and lost elements of the organizational structure has been carried

out. The article provides a substantiated conclusion on the necessity of institutional reform aimed at restoring the integrity of the forest management system.

Keywords: forest management organizational structure, Forest Code, forest governance, leskhoz, 2006 reform, decentralization, forest protection, forest inventory.

ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация располагает крупнейшим лесным фондом в мире – 809 млн гектаров, что составляет 20,1 % глобальных запасов леса. По общим запасам древесины (82 млрд м³) Россия также занимает первое место, существенно опережая Бразилию (58 млрд м³) и Канаду (47 млрд м³). Вместе с тем вклад лесного сектора в валовой внутренний продукт страны составляет лишь 1,4 %, тогда как в Финляндии – около 5 %, в Швеции – 3,5 %, в Канаде – 2,5 % [5]. Столь значительный разрыв между ресурсным потенциалом и экономической отдачей обусловлен прежде всего несовершенством организационной структуры управления отраслью.

По данным Счетной палаты Российской Федерации (2024), достоверная информация о состоянии лесов отсутствует на площади 974 млн гектаров – территории, превышающей Китай или Соединенные Штаты Америки [40]. Расчетная лесосека используется лишь на 28 %, тогда как в Финляндии аналогичный показатель достигает 96 %, в Швеции – 88 %. Площадь лесных пожаров достигла рекордных 18 млн гектаров в 2021 году – более чем в 18 раз выше уровня, характерного для советского периода. Эти данные свидетельствуют о глубоком системном кризисе лесного хозяйства, корни которого лежат в институциональных решениях, принятых на протяжении последних десятилетий.

Организационная структура лесного хозяйства России претерпела радикальные трансформации на протяжении последних пятидесяти лет. Три последовательно принятых Лесных кодекса:

- Российской Советской Федеративной Социалистической Республикой (далее – РСФСР) 1978 года;
- Российской Федерации 1997 года;
- Действующий кодекс 2006 года.

Сформировали принципиально различные модели управления лесным фондом страны [17; 30].

Каждая из этих моделей отражала не только управленческую философию соответствующего исторического периода, но и определенный баланс между централизацией и децентрализацией, между государственным контролем и рыночными механизмами, между долгосрочным устойчивым лесопользованием и текущими экономическими интересами.

Проблема организационного устройства лесного хозяйства имеет фундаментальное значение по ряду причин. Во-первых, лесное хозяйство отличается уникальной длительностью производственного цикла: оборот рубки хвойных пород составляет 80–120 лет, что многократно превышает горизонт планирования любого частного инвестора или политического цикла. Как подчеркивает профессор А. И. Писаренко, государство является единственным субъектом, способным планировать на столетие вперед [30]. Во-вторых, леса выполняют незаменимые экологические функции – регулирование водного баланса, депонирование

углерода, сохранение биоразнообразия, – которые не получают адекватной рыночной оценки. В-третьих, Россия несет особую международную ответственность за состояние своих лесов: бореальные леса страны являются крупнейшим наземным резервуаром углерода на планете [42].

Актуальность настоящего исследования определяется тем, что действующая модель управления, основанная на радикальной децентрализации и передаче ответственности арендаторам, демонстрирует системные дисфункции:

- Объемы лесоустройства сократились более чем в 10 раз, что негативно отразилось на качестве проектных показателей (таксационной характеристике и картографических материалах);

- Численность работников отрасли уменьшилась с 200 тысяч до 32 тысяч человек за рассматриваемый период, оказав также негативное влияние на качество сохранения биологического разнообразия лесов и повышение их потенциала [7].

Несмотря на неоднократные попытки точечных законодательных корректировок – в частности, возвращение государственной инвентаризации лесов на федеральный уровень в 2022 году – комплексный анализ организационных структур, позволяющий выявить системные причины кризиса, остается недостаточно разработанным в научной литературе.

Теоретическую базу исследования составляют работы ведущих отечественных ученых в области лесопользования: академика Н. А. Моисеева, профессоров А. И. Писаренко, В. В. Страхова, В. Н. Петрова, А. П. Петрова, В. А. Соколова, а также зарубежных исследователей – Т. Торнийнен, Б. Х. Линдстада, Дж. Хичкока. Информационную основу составляют данные Росстата, Федерального агентства лесного хозяйства (далее – Рослесхоз), материалы проверок Счетной палаты Российской Федерации, международные доклады ФАО.

Цель работы – дать оценку современной организационной структуре лесного хозяйства в сравнении с более ранними версиями, закрепленными Лесными кодексами разных периодов развития лесного хозяйства, с выявлением динамики изменений, а также систематизацией преимуществ и недостатков каждой модели, определением сохранившихся и утраченных институциональных элементов. Методологической основой исследования выступает последовательное сопоставление моделей 1978, 1997 и 2006 годов, дополненное элементами институционального анализа и международных сравнений, что позволяет проследить эволюцию системы и выявить закономерности ее трансформации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выступает устойчивое управление лесами Российской Федерации как комплексная система взаимодействия государственных,

экономических и экологических институтов, обеспечивающих сохранение и воспроизводство лесных ресурсов в долгосрочной перспективе. Предметом исследования является организационная структура лесного хозяйства – совокупность органов управления, хозяйствующих субъектов, механизмов координации и контроля, определяющих эффективность реализации целей устойчивого лесопользования.

Теоретико-методологическую основу исследования составляет институциональный подход к анализу организационных структур. Институциональная теория, разработанная Д. Нортон [48], рассматривает организационные структуры как совокупность формальных правил (законодательные нормы, регламенты, должностные инструкции) и неформальных ограничений (профессиональные традиции, управленческая культура, устоявшиеся практики), формирующих рамки поведения участников системы лесопользования. Применение данного подхода позволяет оценить не только формальные изменения организационных структур, зафиксированные в законодательных актах, но и глубинные институциональные трансформации, затрагивающие профессиональные компетенции, управленческие традиции и механизмы ответственности. Дополнительно используется концепция управления общими ресурсами Э. Остром [49], позволяющая проанализировать эффективность различных моделей управления лесами как ресурсом общего пользования.

Исследование основано на комплексе взаимодополняющих методов. Базовым методом является сравнительный институциональный анализ, предполагающий последовательное сопоставление трех моделей организационной структуры лесного хозяйства, закрепленных Лесными кодексами 1978 [17], 1997 [18] и 2006 [19] годов. Сопоставление проводится по следующим параметрам: количество уровней управления; численность и профессиональный состав кадров; объемы лесопользования; площадь лесных пожаров; наличие и правовой статус хозяйствующих субъектов; механизмы лесопользования; принципы распределения полномочий и ответственности.

Историко-правовой метод применяется для анализа эволюции законодательной базы лесного хозяйства, включая нормы Конституции Российской Федерации [13], устанавливающей основы государственной собственности на природные ресурсы, Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов на период до 2030 года [26], а также критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации [14], определяющие целевые ориентиры отрасли. Данный метод позволяет проследить преемственность и разрывы в нормативном регулировании, а также выявить противоречия между декларируемыми целями и реальными институциональными механизмами.

Статистический метод используется для количественной оценки динамики ключевых показателей отрасли за период с 1978 по 2024 год. Информационную базу составляют данные Федеральной службы государственной статистики [5; 6; 7; 8], государственные доклады о состоянии лесных ресурсов [4], материалы проверок Счетной палаты Российской Федерации [37; 38; 40],

а также данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [43; 44]. Совокупность статистических данных позволяет провести количественную верификацию экспертных оценок и обеспечить доказательную базу сделанных выводов.

Метод экспертных оценок основан на систематизации и критическом анализе позиций ведущих отечественных и зарубежных ученых. Отечественная экспертная база включает работы академика Н. А. Моисеева [20; 21; 22], профессоров А. И. Писаренко и В. В. Страхова [30; 31; 36], профессоров А. П. Петрова [27; 28] и В. Н. Петрова [29], В. А. Соколова [34; 35]. Зарубежная экспертная база представлена исследованиями Т. Торнийнен [50], Б. Х. Линдстада [47], Дж. Хичкока [46]. Сопоставление экспертных позиций позволяет выявить как консенсусные оценки, так и дискуссионные аспекты проблемы.

Метод классификации применяется для систематизации сохранившихся и утраченных элементов организационной структуры. Для каждого структурного элемента определяется текущий статус по трехуровневой шкале: «сохранен», «трансформирован», «ликвидирован», – что позволяет количественно оценить масштаб институциональных потерь в результате реформ.

Элементы международного сравнительного анализа используются для сопоставления российской модели лесопользования с зарубежными аналогами. Анализируется опыт стран, имеющих сопоставимые лесные ресурсы и климатические условия (Финляндия, Швеция, Канада), а также стран с различными моделями государственного участия в управлении лесами (США, Германия). Международные сопоставления проводятся на основе данных глобальной оценки лесных ресурсов ФАО [44] и специализированных страновых исследований [47; 50]. Такой подход позволяет оценить российскую модель в контексте мирового опыта и выявить потенциально применимые организационные решения.

Хронологические рамки исследования охватывают период с 1978 по 2026 год. Нижняя граница обусловлена принятием Лесного кодекса РСФСР 1978 года [17], верхняя – актуальностью использованных статистических данных. Основное внимание сосредоточено на трех ключевых периодах: 1978–1996 годы (действие Лесного кодекса РСФСР), 1997–2006 годы (действие Лесного кодекса Российской Федерации 1997 года), 2007 – настоящее время (действие Лесного кодекса Российской Федерации 2006 года).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Организационная структура по Лесному кодексу РСФСР 1978 года представляла собой строго централизованную пятиуровневую иерархию, характерную для плановой экономики советского периода. На вершине пирамиды находился Совет Министров Союза Советских Социалистических Республик (далее – СССР) как высший орган государственного управления. Центральным отраслевым органом выступал Государственный комитет СССР по лесному хозяйству (Гослесхоз СССР), созданный в 1966 году и наделенный широкими полномочиями по руководству отраслью в масштабах всего Советского Союза [25].

Республиканский уровень был представлен Министерством лесного хозяйства РСФСР, осуществлявшим непосредственное руководство лесным хозяйством крупнейшей союзной республики. Региональный уровень составляли управления лесного хозяйства областей, краев и автономных республик – около 150 территориальных органов, обеспечивавших координацию лесохозяйственной деятельности на местах [16].

Базовым звеном системы являлись лесхозы – государственные предприятия, количество которых достигало 2600 единиц со штатом от 80 до 150 человек каждый. Лесхоз представлял собой многофункциональное предприятие, располагавшее собственной материально-технической базой: питомниками для выращивания посадочного материала, цехами переработки, пожарной техникой, транспортом. На первичном уровне функционировали лесничества и обходы: около 12 500 лесничеств с 85 000 лесников, осуществлявших непосредственную охрану лесов с периодичностью обхода участка 2–3 дня [16]. Академик Н. А. Моисеев подчеркивает, что лесхоз был «не просто административной единицей, а живым организмом, несущим комплексную ответственность за состояние леса на вверенной территории» [20].

Ежегодно лесоустроительные работы проводились на площади до 45 млн гектаров, что обеспечивало актуальную информационную базу для принятия управленческих решений [3]. Общая численность работников отрасли достигала 200 тысяч человек, что позволяло поддерживать площадь лесных пожаров в пределах 0,5–1 млн гектаров в год – показатель, остающийся недостижимым для современной системы.

Лесной кодекс 1997 года установил четырехуровневую организационную структуру, отражавшую переход к рыночной экономике при сохранении значительной роли государства. Высшим уровнем являлось Правительство Российской Федерации, осуществлявшее общее руководство в области лесных отношений. Рослесхоз выступал центральным специализированным органом, обеспечивавшим проведение единой государственной политики в сфере использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов [18].

Территориальные органы Рослесхоза – управления лесами в субъектах Российской Федерации – координировали деятельность лесхозов на региональном уровне, обеспечивая единство федеральной лесной политики на местах. Лесхозы сохранили статус основных хозяйствующих единиц, однако их организационно-правовая форма изменилась: вместо государственных предприятий они стали федеральными государственными учреждениями (далее – ФГУ). На 1 января 2005 года в России насчитывалось 1759 лесхозов [4]. Лесничества функционировали как структурные подразделения лесхозов, сохраняя функции низового звена управления.

Академик Н. А. Моисеев характеризует период 1997–2006 годов как «золотое время российского лесоводства», когда был достигнут оптимальный баланс между государственным контролем и рыночными механизмами [20]. Система лесорубочных билетов (статья 42 ЛК 1997) обеспечивала контроль за лесопользованием при относительной простоте админист-

рирования: каждая партия заготовленной древесины имела документальное подтверждение законности. Лесная охрана насчитывала около 83 000 человек – практически на уровне советского периода [8]. Принципиальным новшеством стала система смешанного финансирования, сочетавшая бюджетные средства с доходами от использования лесов, что создавало основу для развития рыночных отношений в лесопользовании.

Профессор В. Н. Петров указывает на важное достоинство транзитной модели: Кодекс 1997 года сохранил понятие «ведение лесного хозяйства» как комплекс взаимосвязанных мероприятий, что создавало системную мотивацию лесхозов к рациональному лесопользованию [29]. Вместе с тем острое недофинансирование (по данным Т. Торнийнен, лишь 9,3 % от необходимого бюджета в 1997 году) существенно ограничивало возможности системы [50].

Лесной кодекс 2006 года провел радикальную реформу организационной структуры, сократив число уровней управления до трех и принципиально изменив распределение полномочий. Правительство Российской Федерации формально сохранило статус собственника лесного фонда, однако основной объем полномочий по управлению был передан субъектам Российской Федерации в соответствии со статьей 83 Кодекса. Органы исполнительной власти субъектов получили полномочия по владению, пользованию и распоряжению лесными участками, охране, защите и воспроизводству лесов, тушению лесных пожаров [19].

Рослесхоз был существенно ограничен в полномочиях, а именно, за ним сохранились преимущественно функции нормативного регулирования, ведения государственного лесного реестра и государственной инвентаризации лесов. Хронология институциональной нестабильности Рослесхоза за период 2000–2024 годов беспрецедентна: за 12 лет произошло 6 смен подведомственности – от самостоятельной Федеральной службы через подчинение Минприроды, Минсельхозу, прямое подчинение Правительству РФ и обратно к Минприроды [39].

Ключевым структурным изменением стала ликвидация системы лесхозов. Все 1759 лесхозов были ликвидированы в 2007–2008 годах. Лесничества стали основными территориальными единицами управления, однако утратили статус юридических лиц и хозяйственные функции. Функции по ведению лесного хозяйства были возложены на арендаторов лесных участков и подрядные организации [19].

Профессор А. И. Писаренко назвал Лесной кодекс 2006 года «худшим лесным законом в истории России», а профессор В. В. Страхов констатировал, что новый кодекс «не содержит фундаментальных понятий о ведении лесного хозяйства» [36]. Институт лесников был ликвидирован, а понятие «государственная лесная охрана» заменено «государственным лесным надзором» – принципиальное различие, поскольку охрана предполагает предотвращение нарушений, а надзор – выявление уже совершенных. Численность региональных лесных инспекторов составляет около 24 000 человек при нормативной потребности более 40 000 – укомплектованность около 59 % [38].

Для комплексного сопоставления трех моделей управления лесным хозяйством ключевые параметры представлены в сводной таблице, позволяющей наглядно проследить динамику изменений (табл. 1).

Данные табл. 1 демонстрируют последовательную деградацию количественных показателей организационной структуры. Численность кадров сократилась в 6,25 раза, объем лесоустройства – более чем в 10 раз, тогда как площадь лесных пожаров выросла в 18–36 раз [6]. Особенно показательна динамика изменения хозяйствующего субъекта: от государственного лесхоза, несущего комплексную ответственность за состояние лесов, к арендатору, заинтересованному преимущественно в извлечении дохода от заготовки древесины.

Переход от советской модели к модели 1997 года представлял собой эволюционную трансформацию. Число уровней управления сократилось с пяти до четырех за счет ликвидации союзного уровня после распада СССР. Лесхозы были сохранены, лесная охрана практически не изменилась (83 000 человек против 85 000 в советский период) [8]. Принципиальным изменением стал переход к смешанной модели финансирования, однако, по данным профессора А. П. Петрова, острое недофинансирование (лишь 9,3 %

от необходимого объема) ограничивало возможности системы [27].

Трансформация организационной структуры лесного хозяйства в период с 1997 по 2006 носила революционный характер. Ликвидация лесхозов стала наиболее драматичным изменением: по образному выражению профессора В. В. Кузнецова, «ликвидация лесхозов стала смертельным ударом по отрасли – были потеряны не просто организационные структуры, но носители профессиональных знаний, традиций, опыта» [15]. Общее сокращение численности лесной охраны составило примерно 3,5 раза [38].

Институциональная преемственность в системе государственного управления лесами представляет собой сложный феномен, включающий не только формальное сохранение организационных структур, но и передачу профессиональных компетенций и управленческих традиций. Как отмечает В. А. Соколов, «организационная структура лесного хозяйства – это не просто схема подчинения, а живой организм, впитавший многовековой опыт российского лесоводства» [34]. Для оценки степени сохранности институциональных элементов использована трехуровневая классификация: «сохранен», «трансформирован» и «ликвидирован» (табл. 2).

Таблица 1
Сводное сравнение организационных структур трех Лесных кодексов

Параметр	ЛК РСФСР 1978	ЛК РФ 1997	ЛК РФ 2006
Уровни управления	5	4	3
Кадры, тыс. чел.	200	80–100	32
Лесоустройство, млн га/год	45	20–5	4,2
Пожары, млн га/год	0,5–1	1–2	до 18
Лесная охрана, тыс. чел.	85	83	ориентировочно 24
Количество лесхозов	2600	1759	Ликвидированы
Хозяйствующий субъект	Лесхоз (госпред.)	Лесхоз (ФГУ)	Арендатор
Механизм лесопользования	Госзаказы, попенная плата	Лесорубочные билеты + аренда	Аренда через аукционы
Принцип управления	Централизация	Баланс	Децентрализация

Таблица 2
Сохранившиеся и утраченные элементы организационной структуры

Элемент структуры	Статус	Характер трансформации
Федеральная собственность на леса	Сохранен	Государство – собственник 96,4 % лесов, однако не располагает адекватными инструментами управления
Лесничества	Трансформирован	Утратили статус юрлица, хозяйственные функции; штат сокращен с 80–150 до 5–15 чел.
Рослесхоз	Ослаблен	Статус понижен: Госкомитет – ФС – ФА. За 12 лет – 6 смен подведомственности
Лесхозы	Ликвидирован	Все 1759 лесхозов ликвидированы в 2007–2008 гг. Функции фрагментированы
Лесная охрана	Разрушен	Институт лесников ликвидирован. Численность: ориентировочно 24 000 чел. при нормативе 40 000
Единая вертикаль управления	Ликвидирован	Создан институциональный вакуум ответственности
Лесоустройство	Частично сохранен	Объемы сокращены в 10+ раз. С 2022 г. ГИЛ возвращается на федеральный уровень

Единственным элементом, полностью сохранившимся на протяжении более чем столетия, является федеральная собственность на леса (96,4 % лесного фонда). Однако, как констатируют Н. Г. Жаворонкова и Г. В. Выпханова, Российская Федерация как собственник оказалась лишена реальных инструментов контроля: федеральный центр формально является собственником, но передал полномочия регионам, которые управляют, но не несут имущественной ответственности [9]. Г. Н. Полянская в фундаментальном труде обосновывала, что признание лесов государственной собственностью создает предпосылки для долгосрочного планирования, однако современная модель разрушила эту логику [33].

Лесничества формально сохранились, однако претерпели кардинальную трансформацию. По данным А. В. Колесниковой, штат типичного лесничества сократился с 80–150 человек до 5–15, при этом значительная их часть – административный персонал [12]. Профессор В. Н. Петров характеризует это как превращение хозяйствующих субъектов в «административные придатки региональных органов власти» без техники, людей и полномочий [29].

Признанием провала децентрализации лесоустройства стало принятие Федерального закона от 02.07.2021 № 304-ФЗ, вернувшего государственную инвентаризацию лесов на федеральный уровень с 1 января 2022 года. По данным Счетной палаты, материалы лесоустройства с давностью более 10 лет охватывают 84,4 % площади лесного фонда (967 млн гектаров), что делает планирование лесопользования фикцией [37].

Объективная оценка каждой из трех моделей требует систематизации их преимуществ и недостатков относительно целей лесного хозяйства: охраны, защиты, воспроизводства и рационального использования лесов (табл. 3).

Советская модель обеспечивала системную целостность при недостаточной гибкости. Профессор В. А. Соколов отмечает, что централизованная система позволяла оперативно мобилизовать ресурсы для ликвидации крупных лесных пожаров и проведения мас-

совых лесовосстановительных работ [34]. Стабильное финансирование обеспечивало долгосрочное планирование, критически важное при обороте рубки хвойных пород 80–120 лет. Вместе с тем В. Я. Колданов указывает, что нормативы, разработанные для средней полосы, механически применялись к совершенно иным условиям Сибири и Дальнего Востока [11].

Структура 1997 года достигла относительного баланса при сохранении проблемы недофинансирования. Профессор А. П. Петров подчеркивает, что Кодекс создал правовую основу для постепенного перехода к рыночным отношениям без разрушения институциональной базы [27]. Двойственность положения лесхозов (одновременно контролер и хозяйствующий субъект) создавала конфликт интересов, однако И. А. Кислухина справедливо указывает, что эта проблема требовала разделения функций, а не ликвидации лесхозов [10].

Модель 2006 года, провозглашая рыночную эффективность, на практике привела к институциональному разрушению отрасли. Фундаментальным дефектом является несовпадение временных горизонтов: оборот рубки – 80–120 лет, максимальный срок аренды – 49 лет. Ю. Н. Гагарин формулирует противоречие: арендатор, инвестирующий в лесовосстановление, не доживет до момента эксплуатационной спелости посаженного леса, а экономическая логика подсказывает минимизировать затраты на лесохозяйственные мероприятия [1].

Экспертные оценки ведущих специалистов демонстрируют консенсус научного сообщества относительно несостоятельности реформы 2006 года. Академик Н. А. Моисеев утверждает, что «не частная собственность спасет наши леса, а разумное государственное управление при условии его должной постановки» [20]. Профессор А. И. Писаренко и профессор В. В. Страхов констатируют, что с вступлением в силу Лесного кодекса 2006 года началась завершающая фаза ликвидации системы классического русского лесного хозяйства, которая эволюционно развивалась на протяжении нескольких столетий [36].

Таблица 3
Преимущества и недостатки организационных структур

Кодекс	Преимущества	Недостатки
ЛК 1978	1. Единая вертикаль управления. 2. Стабильное финансирование. 3. 200 тыс. профессиональных кадров. 4. Лесоустройство 45 млн га/год. 5. Эффективная лесная охрана (85 тыс.). 6. Долгосрочное планирование	1. Чрезмерная централизация. 2. Игнорирование региональной специфики. 3. Приоритет валовых показателей. 4. Партийное вмешательство. 5. Недостаточное внимание экологии
ЛК 1997	1. Баланс государства и рынка. 2. Сохранение профессиональной службы. 3. Лесхозы как хозяйствующие субъекты. 4. Система лесорубочных билетов. 5. Относительная стабильность	1. Двойственность положения лесхозов. 2. Острое недофинансирование (9,3 % от потребности). 3. Начало сокращения кадров. 4. Противоречия федерального и регионального уровней
ЛК 2006	1. Привлечение частных инвестиций (декларируемое). 2. Четкое разграничение собственности. 3. Рыночные механизмы. 4. Долгосрочная аренда до 49 лет	1. Ликвидация лесхозов. 2. Сокращение кадров до 32 тыс. 3. Разрушение лесоустройства. 4. Рост пожаров в 18–36 раз. 5. Несовпадение сроков аренды и оборота рубки. 6. Размывание ответственности

Размывание ответственности создает институциональный вакуум, который характеризуется следующим: федерация – собственник, но передала полномочия регионам; регионы управляют, но не несут имущественной ответственности; арендаторы пользуются, но их интерес ограничен сроком договора. Законодательство возлагает на государство обязанность по охране, защите и воспроизводству лесов, но не предоставляет адекватных инструментов для ее выполнения [9].

Международные эксперты подтверждают обоснованность критики. Исследователь Дж. Хичкок отмечает, что утрата федеральным правительством контроля может иметь только негативный эффект на защиту лесных ресурсов России [46]. Профессор Т. Торнийнен указывает на парадокс реформы, Россия выбрала путь децентрализации именно тогда, когда мировой опыт свидетельствовал об эффективности смешанных моделей. Финляндия, имеющая сопоставимые климатические условия, пошла по пути укрепления государственной координации при развитии частного сектора и достигла рекордных показателей [50]. Профессор Б. Х. Линдстад подтверждает, что успешные модели в развитых лесных странах сочетают сильную государственную роль с эффективным привлечением частного сектора [47].

Критически важным является разрыв вертикали подчинения в системе лесной охраны. После реформы региональные инспекторы подчиняются губернаторам, что создает системный конфликт интересов: губернатор заинтересован в привлечении инвестиций и пополнении бюджета, а не в жестком контроле. Сроки полномочий губернаторов (5 лет) несопоставимы со сроками лесовосстановления (80–120 лет), что формирует мотивацию к недоинвестированию в охрану и воспроизводство лесов [31].

Проведенный сравнительный анализ позволяет сформулировать ряд ключевых результатов, имеющих как теоретическое, так и практическое значение для обоснования дальнейших реформ системы управления лесами России.

Первый результат связан с выявлением закономерности институциональной трансформации. Установлено, что организационная структура лесного хозяйства России прошла путь от централизованной пятиуровневой иерархии к радикально децентрализованной трехуровневой модели, при этом каждый шаг сопровождался ухудшением ключевых количественных показателей (табл. 1). Однако характер трансформации принципиально различался, если переход в 1997 году представлял собой эволюционную адаптацию к рыночным условиям при сохранении институциональной основы, то реформа 2006 года была институциональным разрывом, уничтожившим накопленный за десятилетия организационный капитал [36]. Данный вывод согласуется с теорией институциональной зависимости от траектории, согласно которой радикальный отказ от сложившихся институтов, как правило, приводит к худшим результатам по сравнению с постепенной трансформацией [48].

Второй результат касается идентификации фундаментального институционального дефекта действующей модели – разрыва между собственностью, управ-

лением и ответственностью. В советской модели все три функции были интегрированы в единой вертикали: государство одновременно являлось собственником, управляющим и ответственным лицом. Модель 1997 года сохранила этот принцип через систему лесхозов как федеральных государственных учреждений. Реформа 2006 года разделила эти функции между тремя субъектами – федеральным собственником, региональным управляющим и частным арендатором, – ни один из которых не обладает ни полнотой полномочий, ни полнотой ответственности. Данная конструкция создает классическую «трагедию общин» в терминологии Г. Хардина – ресурс, находящийся в общем пользовании при отсутствии ответственного субъекта, неизбежно деградирует [45].

Третий результат связан с количественной оценкой масштаба институциональных потерь. Из семи ключевых элементов организационной структуры, выявленных в ходе анализа (табл. 2), полностью сохранен лишь один (федеральная собственность на леса), два ликвидированы полностью (лесхозы и единая вертикаль управления), один разрушен (лесная охрана), три существенно ослаблены или трансформированы (Рослесхоз, лесничества, лесоустройство). Таким образом, степень институциональной деструкции составляет порядка 85 %, что объективно объясняет масштаб наблюдаемой деградации отрасли.

Четвертый результат связан с анализом временного несоответствия между биологическими циклами леса и управленческими горизонтами. Оборот рубки хвойных пород составляет 80–120 лет, максимальный срок аренды – 49 лет, политический цикл губернатора – 5 лет. Ни один из действующих субъектов управления не имеет мотивации к инвестициям в лесовосстановление, отдача от которых наступит через несколько поколений. Эта проблема не является уникально российской: она успешно решена в Финляндии (система *Metsähallitus*), Швеции (*Sveaskog*), Канаде (провинциальные системы), однако во всех этих странах ключевую роль в обеспечении долгосрочной перспективы играет государство как субъект, чей горизонт планирования не ограничен сроком аренды или политического цикла [47; 50].

Пятый результат касается эмпирического подтверждения «золотого периода» 1997–2006 годов, охарактеризованного академиком Н. А. Моисеевым [20]. Количественные данные свидетельствуют, что именно в этот период была достигнута оптимальная конфигурация: государство сохраняло контроль через систему лесхозов и территориальные органы Рослесхоза, одновременно допуская участие частного сектора. Лесная охрана насчитывала 83 000 человек – практически на уровне советского периода, а механизм лесорубочных билетов обеспечивал прозрачный контроль за лесопользованием [8; 18]. Проблемы данной модели (прежде всего недофинансирование и двойственность положения лесхозов) носили устранимый характер и не требовали радикального слома институциональной системы.

Обсуждение полученных результатов позволяет сформулировать ключевой вывод: действующая модель организационной структуры лесного хозяйства

России содержит неустранимые системные дефекты, которые не могут быть исправлены точечными законодательными корректировками. Возвращение государственной инвентаризации лесов на федеральный уровень в 2022 году, хотя и является шагом в правильном направлении, не решает проблемы отсутствия единого субъекта ответственности за состояние лесов. Необходима комплексная институциональная реформа, основными направлениями которой, по мнению автора, должны стать: восстановление федеральной вертикали управления; воссоздание хозяйствующих субъектов, несущих комплексную ответственность за состояние лесов; восстановление профессиональной лесной службы до численности не менее 80–100 тысяч человек; кратное увеличение объемов лесоустройства. Эти направления согласуются с рекомендациями ведущих ученых [20; 30; 36] и международным опытом [46; 47; 50].

Вместе с тем необходимо учитывать, что прямое воспроизводство советской модели невозможно и нецелесообразно: чрезмерная централизация, игнорирование региональной специфики и приоритет валовых показателей были обоснованно раскритикованы уже в 1990-е годы. Оптимальная модель должна сочетать сильную федеральную вертикаль ответственности (как в моделях 1978 и 1997 годов) с элементами гибкости и учета региональных условий (как декларировалось в модели 2006 года). Конкретная проработка такой модели является предметом самостоятельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ организационных структур лесного хозяйства России, закрепленных тремя последовательно принятыми Лесными кодексами, позволяет сформулировать следующие основные выводы.

Во-первых, эволюция организационной структуры представляет собой последовательный переход от централизованной пятиуровневой иерархии (1978) через сбалансированную четырехуровневую модель (1997) к радикально децентрализованной трехуровневой структуре (2006). Первый переход (1978–1997) носил эволюционный характер и сохранил институциональную основу, тогда как второй (1997–2006) привел к системному разрушению отрасли.

Во-вторых, количественные показатели однозначно свидетельствуют о деградации системы: численность работников сократилась в 6,25 раза, объем лесоустройства – более чем в 10 раз, площадь лесных пожаров выросла в 18–36 раз. Из семи ключевых институциональных элементов полностью сохранен лишь один (федеральная собственность), два ликвидированы, один разрушен, остальные существенно ослаблены.

В-третьих, фундаментальным дефектом действующей модели является размывание ответственности между федеральным собственником, региональным управляющим и частным арендатором. Данный вывод подтверждается консенсусом ведущих отечественных и зарубежных экспертов, включая академика Н. А. Моисеева, профессоров А. И. Писаренко, В. В. Страхова, Дж. Хичкока и Т. Торнийнен.

Полученные результаты обосновывают необходимость комплексной институциональной реформы, направленной на восстановление целостности системы управления лесами при сохранении элементов рыночной гибкости. Мировой опыт – прежде всего Финляндии, Швеции и Канады – свидетельствует о том, что эффективные модели лесопользования сочетают сильную государственную роль с привлечением частного сектора при условии сохранения единой вертикали ответственности [47; 50]. Разработка конкретных механизмов такой реформы является предметом дальнейших исследований.

Проведенная оценка организационной структуры лесного хозяйства является основанием для дальнейшей оптимизации ее модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гагарин Ю. Н. Аренда как тупик развития лесного хозяйства // Труды ЦЭПЛ РАН. 2019. Вып. 5. С. 23–31.
2. Гагарин Ю. Н. О концепции проекта федерального закона «Лесной кодекс Российской Федерации» // Труды ЦЭПЛ РАН. 2020. Вып. 7. С. 15–24.
3. Гиряев М. Д. Лесостроительство: проблемы, решения // Лесной вестник. 2013. № 2. С. 42–48.
4. Государственный доклад о состоянии и использовании лесных ресурсов РФ в 2005 году. М. : МПР России, 2006. 194 с.
5. Данные Росстата о вкладе лесного сектора в ВВП Российской Федерации за 2023 г.
6. Данные Росстата и Рослесхоза о динамике показателей лесного хозяйства за 1978–2023 гг.
7. Данные Росстата и Рослесхоза о состоянии лесного хозяйства за 1978–2023 гг.
8. Данные Росстата о численности работников лесного хозяйства за 1997–2005 гг.
9. Жаворонкова Н. Г., Выпханова Г. В. Правовые проблемы государственного управления в области лесных отношений // Экологическое право. 2018. № 4. С. 21–28.
10. Кислухина И. А. Исследование государственной политики в сфере лесных отношений // Региональная экономика. 2012. № 6. С. 35–44.
11. Колданов В. Я. Очерки истории советского лесного хозяйства. М. : Экология, 1992. 256 с.
12. Колесникова А. В. Основные проблемы и вызовы в развитии отечественного лесного комплекса // ЭКО. 2013. № 9. С. 42–58.
13. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) // Собрание законодательства РФ. 2014. № 31. Ст. 4398.
14. Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации: утв. приказом Рослесхоза от 05.02.1998 № 21.
15. Кузнецов В. В. Ликвидация лесхозов: последствия и пути выхода из кризиса // Лесное хозяйство. 2015. № 3. С. 6–10.
16. Лесное хозяйство СССР : стат. сб. М. : Статистика, 1985. 286 с.
17. Лесной кодекс РСФСР 1978 года // Ведомости ВС РСФСР. 1978. № 10. Ст. 308.
18. Лесной кодекс Российской Федерации от 29.01.1997 № 22-ФЗ // СЗ РФ. 1997. № 5. Ст. 610.

19. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ // СЗ РФ. 2006. № 50. Ст. 5278.

20. Моисеев Н. А. Леса России: проблемы, решения // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2008. № 5. С. 154–198.

21. Моисеев Н. А. Леса России: проблемы, решения. М. ; Н. Новгород, 2010. 604 с.

22. Моисеев Н. А. Концепция современного лесоустройства в России. Пушкино : ВНИИЛМ, 2017. 88 с.

23. Назаренко Е. Б., Гамсахурдия О. В. Организация лесного хозяйства арендатором на участках, переданных в аренду. М., 2008.

24. Научные дебаты «Институциональная организация лесопользования: федерализм или централизация?» // ЦЭПЛ РАН. 29.03.2019.

25. О создании Государственного комитета СССР по лесному хозяйству: Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 18.02.1966.

26. Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 26.09.2013 № 1724-р.

27. Петров А. П. Система государственного управления лесами: федерализм или централизация : доклад на научных дебатах Научного совета РАН по лесу. М., 2019.

28. Петров А. П. Экономика лесного хозяйства. М. : ВПКСИ, 2018. 312 с.

29. Петров В. Н. Практика управления государственными лесами в странах с федеративным устройством : доклад на научных дебатах Научного совета РАН по лесу. М., 2019.

30. Писаренко А. И., Страхов В. В. Лесное хозяйство России: от пользования к управлению. М. : Юриспруденция, 2004. 552 с.

31. Писаренко А. И., Страхов В. В. О лесной политике России. М. : Юриспруденция, 2004. 198 с.

32. Положение о Государственной лесной охране СССР: Постановление Совмина СССР от 22.03.1950 № 1181.

33. Полянская Г. Н. Право государственной собственности на леса в СССР. М.: Гос. изд-во юрид. лит., 1959. 407 с.

34. Соколов В. А., Горяева Е. В., Соколова Н. В. О совершенствовании лесопользования в России // Сибирский лесной журнал. 2018. № 5. С. 7–16.

35. Соколов В.А. Организация управления лесами в России: исторический аспект // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. 34. № 3-4. С. 153–158.

36. Страхов В. В., Писаренко А. И. О завершении эпохи классического лесного хозяйства // Использование и охрана природных ресурсов России. 2008. № 3-4. С. 15–22.

37. Счетная палата РФ. Анализ состояния государственной инвентаризации лесов. М., 2024.

38. Счетная палата РФ. Отчет о проверке эффективности использования средств бюджета при учете лесных ресурсов. М., 2019; Данные Рослесхоза о численности инспекторов. 2024.

39. Счетная палата РФ. Отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия «Анализ систе-

мы мониторинга и учета лесных ресурсов, а также охраны лесов от пожаров». М., 2023.

40. Счетная палата РФ. Проверка эффективности использования средств бюджета при выполнении мероприятий по оценке состояния и учета лесных ресурсов РФ. М., 2024.

41. Швиденко А. З. Леса и лесное хозяйство России: современное состояние и перспективы развития // Сибирский лесной журнал. 2021. № 4. С. 3–18.

42. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–84.

43. FAO. Forestry in the Soviet Union // Unasylva. 1958. Vol. 12, no. 2. P. 58–69.

44. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. Rome: FAO, 2020. 184 p.

45. Hardin G. The Tragedy of the Commons // Science. 1968. Vol. 162, no. 3859. P. 1243–1248.

46. Hitchcock J. The 2006 Forest Code of the Russian Federation // Australian Slavonic and East European Studies. 2010. Vol. 24. P. 19–39.

47. Lindstad B. H. A Comparative Study of Forestry in Finland, Norway, Sweden, and the United States // US Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-538. 2002.

48. North D. C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 152 p.

49. Ostrom E. Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 280 p.

50. Tormainen T. et al. Russian forest policy in the turmoil of changing balance of power // Forest Policy and Economics. 2006. Vol. 9, no. 4. P. 403–416.

REFERENCES

1. Gagarin Yu. N. Lease as a dead end for forestry development. Proceedings of CEPF RAS, 2019, iss. 5, pp. 23–31.

2. Gagarin Yu. N. On the concept of the draft federal law 'Forest Code of the Russian Federation'. Proceedings of CEPF RAS, 2020, iss. 7, pp. 15–24.

3. Giryayev M. D. Forest inventory: problems and solutions. Lesnoy Vestnik, 2013, no. 2, pp. 42–48.

4. State report on the condition and use of forest resources of the Russian Federation in 2005. Moscow : MNR Russia, 2006. 194 p.

5. Rosstat data on forestry sector contribution to GDP of the Russian Federation for 2023.

6. Rosstat and Rosleskhoz data on forestry indicators dynamics for 1978–2023.

7. Rosstat and Rosleskhoz data on the state of forestry for 1978–2023.

8. Rosstat data on the number of forestry workers for 1997–2005.

9. Zhavoronkova N. G., Vypkhanova G. V. Legal problems of state management in forest relations. Ecological Law, 2018, no. 4, pp. 21–28.

10. Kislukhina I. A. Study of state policy in forest relations. Regional Economics, 2012, no. 6, pp. 35–44.

11. Koldanov V. Ya. Essays on the history of Soviet forestry. Moscow : Ecology, 1992. 256 p.

12. Kolesnikova A. V. Main problems and challenges in the development of the domestic forest complex. *ECO*, 2013, no. 9, pp. 42–58.
13. Constitution of the Russian Federation (adopted by national vote on 12.12.1993). Collection of Legislation of the Russian Federation, 2014, no. 31, art. 4398.
14. Criteria and indicators of sustainable forest management of the Russian Federation : approved by Order of Rosleskhoz No. 21 of 05.02.1998.
15. Kuznetsov V. V. Liquidation of leskhozes: consequences and ways out of the crisis. *Lesnoe Khozyaystvo*, 2015, no. 3, pp. 6–10.
16. Forestry of the USSR: statistical compendium. Moscow : Statistika, 1985. 286 p.
17. Forest Code of the RSFSR, 1978.
18. Forest Code of the Russian Federation No. 22-FZ of 29.01.1997.
19. Forest Code of the Russian Federation No. 200-FZ of 04.12.2006.
20. Moiseev N. A. Forests of Russia: problems, solutions. Use and Protection of Natural Resources of Russia, 2008, no. 5, pp. 154–198.
21. Moiseev N. A. Forests of Russia: problems, solutions. Moscow – Nizhny Novgorod, 2010. 604 p.
22. Moiseev N. A. The concept of modern forest inventory in Russia. Pushkino : VNIILM, 2017. 88 p.
23. Nazarenko E. B., Gamsakhurdia O. V. Organization of forest management by tenants on leased areas. Moscow, 2008.
24. Scientific debates: Institutional organization of forest governance: federalism or centralization? CEPF RAS, 29.03.2019.
25. Resolution of the Central Committee of the CPSU and Council of Ministers of the USSR on the establishment of the State Committee for Forestry, 18.02.1966.
26. Fundamentals of the state policy on the use, protection, and reproduction of forests in the Russian Federation for the period up to 2030 : approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 1724-r of 26.09.2013.
27. Petrov A. P. State forest management system: federalism or centralization. Report at scientific debates of the RAS Scientific Council on Forests. Moscow, 2019.
28. Petrov A. P. Economics of forestry. Moscow : VIPKLKH, 2018. 312 p.
29. Petrov V. N. Practice of state forest management in federal states. Report at scientific debates of the RAS Scientific Council on Forests. Moscow, 2019.
30. Pisarenko A. I., Strakhov V. V. Forest management of Russia: from use to management. Moscow : Jurisprudence, 2004. 552 p.
31. Pisarenko A. I., Strakhov V. V. On the forest policy of Russia. Moscow : Jurisprudence, 2004. 198 p.
32. Regulation on the State Forest Guard of the USSR: Resolution of the Council of Ministers of the USSR No. 1181 of 22.03.1950.
33. Polyanskaya G. N. The right of state ownership of forests in the USSR. Moscow, 1959. 407 p.
34. Sokolov V. A., Goryaeva E. V., Sokolova N. V. On improving forest governance in Russia. *Siberian Journal of Forest Science*, 2018, no. 5, pp. 7–16.
35. Sokolov V. A. Organization of forest management in Russia: historical aspect. *Conifers of the Boreal Zone*, 2016, vol. 34, no. 3-4, pp. 153–158.
36. Strakhov V. V., Pisarenko A. I. On the completion of the era of classical forestry. *Use and Protection of Natural Resources of Russia*, 2008, no. 3-4, pp. 15–22.
37. Accounts Chamber of the Russian Federation. Analysis of the state forest inventory. Moscow, 2024.
38. Accounts Chamber of the Russian Federation. Audit report on budget efficiency in forest resource accounting. Moscow, 2019; Rosleskhoz data on the number of inspectors, 2024.
39. Accounts Chamber of the Russian Federation. Report on the results of the expert-analytical activity «Analysis of the forest resources monitoring and accounting system, as well as forest fire protection». Moscow : Accounts Chamber of the RF, 2023.
40. Accounts Chamber of the Russian Federation. Audit of budget expenditure efficiency for forest resources assessment. Moscow, 2024.
41. Shvidenko A. Z. Forests and forestry of Russia: current state and development prospects. *Siberian Journal of Forest Science*, 2021, no. 4, pp. 3–18.
42. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G. Carbon budget of Russian forests. *Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 1, pp. 69–84.
43. FAO. Forestry in the Soviet Union. *Unasylva*, 1958, vol. 12, no. 2, pp. 58–69.
44. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. Rome : FAO, 2020. 184 p.
45. Hardin G. The Tragedy of the Commons. *Science*, 1968, vol. 162, no. 3859, pp. 1243–1248.
46. Hitchcock J. The 2006 Forest Code of the Russian Federation. *Australian Slavonic and East European Studies*, 2010, vol. 24, pp. 19–39.
47. Lindstad B. H. A Comparative Study of Forestry in Finland, Norway, Sweden, and the United States. US Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-538, 2002.
48. North D. C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 152 p.
49. Ostrom E. Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 280 p.
50. Tornaiainen T. et al. Russian forest policy in the turmoil of changing balance of power. *Forest Policy and Economics*, 2006, vol. 9, no. 4, pp. 403–416.

© Карпухов Д. Д., Савченкова В. А., 2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ СОСТАВ ЖИВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПОД ПОЛОГОМ СОСНЯКОВ И НА ГАРИ

О. И. Гаврилова¹, А. В. Грязькин², И. А. Казин²

¹Петрозаводский государственный университет

Российская Федерация, 185000, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Российская Федерация, 194018, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У

E-mail: ¹ogavril@mail.ru, ²lesovod@bk.ru

Аннотация. Состав травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов имеет ярко выраженные различия в зависимости от условий места произрастания. Учёт видового состава, установление встречаемости и определение величины проективного покрытия осуществляли методом круговых площадок по 10 м². Учётные работы проведены на гари и под пологом древостоев в типе леса сосняк брусничный. В составе древостоя единичная примесь берёзы и ели. На гари доля берёзы повислой в составе сформировавшихся молодняков составляет 24 %. Подрост на объектах исследования представлен 4–5 видами. Доля сосны – 62–91 %. Общая численность подроста под пологом древостоя составляет 780, а на гари – 4310 экз./га. Численность подлеска на опытных участках не превышает 860 экз./га. Преобладает рябина обыкновенная. Средний возраст подроста под пологом древостоев несколько выше и составляет 9,5 лет, а на гари – 8,2 года. Видовой состав живого напочвенного покрова на опытных участках различается. У совпадающих видов различаются встречаемость и величина проективного покрытия. На гари состав живого напочвенного покрова на 62 % представлен гелиофильными растениями, в числе которых встречается несколько видов рудеральных растений. Установлено, что под пологом древостоев состав травяно-кустарничкового яруса беднее по сравнению с видовым составом растений на гари. Количество видов сосудистых растений под пологом составляет 16, а на гари практически в 2 раза выше – 23 вида. Мохово-лишайниковый ярус – наоборот, под пологом сосняка брусничного содержит больше видов – 8, чем на гари – 5. Полученные результаты могут быть использованы при сравнительном анализе состава растительности на разных категориях земель. Цель исследования – выявление различий в видовом составе и в проективном покрытии растений, произрастающих под пологом древостоя и на гари в условиях одного типа леса.

Ключевые слова. Фитоценоз, древостой, гарь, живой напочвенный покров

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 93–98

COMPARATIVE COMPOSITION OF THE LIVING SUBSOIL COVER UNDER THE CANOPY OF PINE FORESTS AND ON THE FIRE-RAISED LAND

O. I. Gavrilova¹, A. V. Gryazkin², I. A. Kazi²

¹Petrozavodsk State University

33, Lenina str., Petrozavodsk, 185000, Russian Federation

²S. M. Kirov St. Petersburg State Forestry University

5, Institutsky lane, build. U, Saint Petersburg, 194018, Russian Federation

E-mail: ¹ogavril@mail.ru, ²lesovod@bk.ru

Abstract. The composition of the herbaceous-shrubby and moss-lichen layers has pronounced differences depending on the growing conditions. The species composition, occurrence, and cover were determined using circular plots of 10 m². The surveys were conducted in a burned area and under the canopy of a pine-brusnik forest. The forest consists of a single species of birch and spruce. In the burned areas, the proportion of downy birch in the formed young forests is 24 %. The undergrowth in the study areas is represented by 4–5 species. The proportion of pine is 62–91 %. The total number of undergrowth under the canopy of the forest stand is 780, and in the burned areas it is 4310 individuals per hectare. The number of understory species in the experimental areas does not exceed 860 individuals per hectare. The common rowan tree prevails. The average age of undergrowth under the canopy of tree stands is slightly higher and is 9.5 years, and on the burn – 8.2 years. The species composition of the living ground cover on the experimental sites varies. The occurrence of the same species varies. In the burnt area, 62% of the living ground cover consists of heliophilous plants, including several species of ruderal plants. It has been established that the composition of the herbaceous and shrubby layer under the canopy of tree stands is poorer compared to the species composition of

plants in the burnt area. The number of vascular plant species under the canopy is 16, while it is almost twice as high in the burnt area, with 23 species. The moss-lichen layer, on the contrary, contains more species under the canopy vaccinium type of pine – 8 than on the burning – 5. The results obtained can be used in a comparative analysis of the vegetation composition in different categories of lands. The aim of the study is to identify differences in the species composition and in the projective cover of plants growing under the canopy of a stand and on the burning under the conditions of the same type of forest.

Keywords. *Phytocenosis, forest stand, the forest area after the fire, living ground cover.*

ВВЕДЕНИЕ

Pinus sylvestris L. – одна из самых ценных лесообразующих пород [1–4]. Поскольку сосна является светолюбивой породой, в первые годы, на ювенильной стадии развития, она подвержена негативному воздействию со стороны травостоя и всходов листовых пород [5–8].

Если на открытых местах (вырубки, гари, прогалины, поляны) естественное возобновление сосны, как правило, протекает успешно [2; 4; 9; 10], то под пологом древостоев чаще всего естественное возобновление сосны затруднено [11–15]. Здесь сказывается недостаток светового довольствия и конкуренция со стороны древостоя за элементы питания. Эти факторы оказывают ингибирующее влияние также и на видовой состав и обилие живого напочвенного покрова [1; 5; 6; 16].

Размещение подроста под пологом древостоев на вырубках и гарях различается. Если на открытых территориях (вырубки, гари) размещение подроста близко к равномерному, то под пологом чаще всего отмечается групповое размещение подроста, привязанное к прогалинам, окнам, межкрупному пространству [1; 5; 13].

Под пологом древостоев доля сухого и нежизнеспособного подроста в несколько раз выше, чем на вырубке или гари [2; 8; 10]. Различия по средней высоте и среднему возрасту подроста на вырубке и под пологом весьма существенные [5; 11; 16].

В научных публикациях отмечается, что лучшее всего возобновление сосняков происходит на гарях [1; 5; 7; 8]. На такой категории лесных земель доля жизнеспособного подроста сосны достигает максимальных значений на всех этапах роста и развития молодых. Главные причины хорошего роста сосняков на гари состоят в том, что растение получает максимум светового довольствия и питательных веществ после сгорания органического вещества – происходит залповый выброс зольных элементов в лесную экосистему [1; 5; 17].

Растительность нижних ярусов в лесных фитоценозах обычно представлена растениями из разных экологических групп – светолюбивые и теневыносливые, гигрофиты и ксерофиты, олиготрофы и мегатрофы, автохтонные и инвазивные [1; 7; 9; 12]. В зависимости от почвенно-грунтовых условий состав растительности и количество видов варьируют в широких пределах [1; 11; 14; 16–20].

В зависимости от условий места произрастания видовой состав и состояние компонентов лесного фитоценоза различается существенным образом. Если на открытом месте (гари, вырубки) в составе живого напочвенного покрова, подрост и подлесок доминируют светолюбивые виды, то под пологом, наоборот,

преобладают теневыносливые виды, причем во всех компонентах лесного фитоценоза [5; 8; 12; 17].

Гари отличаются от лесных земель любой категории, что связано с двумя факторами. Первый – полное или частичное уничтожение органического вещества на лесном участке. Второй фактор, влияющий на структуру и состояние лесного фитоценоза на гари – большая доза зольных элементов после сгорания органического вещества [1; 8; 11]. Под влиянием указанных факторов и особым режимом освещенности (полное световое довольствие) на гарях формируется растительный покров, отличающийся по видовому составу от растительности нижних ярусов, произрастающих под пологом древостоев [11; 19].

В большей степени эффект залпового выброса проявляется на бедных сухих почвах. В этой связи представляет определенный интерес сравнение видовой состава растительности на гарях и под пологом древостоев в одном и том же типе леса. На гарях, как правило, видовой состав растительности, богаче, что связано с влиянием указанных выше факторов [1; 11; 19].

В зависимости от типа леса, различия в видовом составе проявляются в максимальной степени, что связано не только с характеристиками всех компонентов фитоценозов, но и с факторами внешней среды. Определяющим фактором является режим освещенности. В этой связи состав растений под пологом значительно отличается от состава растительности на открытом месте. В первую очередь это относится к живому напочвенному покрову, причем виды в составе травяно-кустарничкового яруса на световой режим реагируют сильнее, чем растительность мохово-лишайникового яруса [1; 8; 11; 19].

В горизонтальной структуре живого напочвенного покрова наблюдается мозаичность, связанная с окнами, прогалинами и с разной степенью сомкнутости кроны древостоя. В этих элементах горизонтальной структуры фитоценозов преобладают светолюбивые виды, а под пологом древостоев с сомкнутыми кронами большинство видов в составе живого напочвенного покрова относится к теневыносливым [1; 5; 19; 21].

Полученные результаты можно использовать как в учебном процессе, так и в научных целях при изучении региональной флоры.

Цель исследования – выявление различий в составе, встречаемости и проективном покрытии видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объекты исследований представлены сосновыми молодняками на гари и сосняком брусничным. Гео-

графически опытные участки расположены на территории Прионежского лесничества республики Карелия. Средний возраст древостоя – 95 лет. Относительная полнота 0,7. Густота древостоя 682 экз./га.

Гарь образовалась после сгоревшего сосняка брусничного 16 лет назад. На гари сохранились единичные экземпляры подроста сосны предварительного возобновления. После пожара появилось большое количество подроста, представленного сосной и березой. Из подлесочных пород в небольшом количестве произрастают рябина обыкновенная, можжевельник и шиповник иглолистный.

Характеристики нижних ярусов растительности устанавливали на круговых площадках по 10 м² [22; 23]. На каждом объекте исследования было заложено по 36 учётных площадок. Для подроста устанавливали численность, видовой состав, высоту, возраст (подрост сосны) и виталитет. Для подлеска – численность, видовой состав и высоту.

Учёт растительности травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов проводили на тех же учётных площадках, на которых учитывались подрост и подлесок. В ходе учётных работ устанавливали видовой состав, встречаемость и проективное покрытие по видам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общим для опытных участков являются лесорастительные условия. Сосняки сформировались в условиях брусничного типа леса на сухих песчаных почвах. Таксационная характеристика древостоев по объектам исследования представлена в табл. 1.

Подрост и подлесок на опытных участках характеризуются небольшой численностью (табл. 2). Состав

характеризуются небольшим количеством видов. В составе подроста преобладает сосна обыкновенная, а подлесок состоит в основном из рябины обыкновенной (на гари) и можжевельника обыкновенного (под пологом древостоев).

Характерной особенностью распределения подроста и подлеска является то, что в большинстве случаев подрост сосны под пологом древостоев появляется в прогалинах и в окнах. При этом состояние и численность подроста зависят от размеров этих прогалин и окон.

Установлено, что на гари состав травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов представлен более широким набором растений по сравнению с древостоем. Величина встречаемости у большей части видов как под пологом, так и на гари составляет более 50 %. По проективному покрытию доминирует несколько видов: брусника обыкновенная, лишайники лесной и альпийский, вереск обыкновенный (табл. 3).

Видовой состав растительности живого напочвенного покрова на гари включает преимущественно светолюбивые виды. При этом в составе травостоя встречаются и рудеральные виды: вейник наземный, иван-чай узколистный, луговик дернистый и извилистый, мятлик луговой, осот полевой.

Установлено, что общее проективное покрытие живым напочвенным покрытием под пологом древостоев существенно меньше, чем на гари – соответственно 69 и 90 % (табл. 4). Заметная доля минерализованной поверхности (5 %) на гари связана с тем, что на выходах скальных пород большого размера растительный покров ежегодно повреждается полностью или частично толстым слоем снега.

Таблица 1
Таксационная характеристика древостоев по объектам исследования

Характеристики	Древостой	Гарь
Состав, %	97С2Б1Е	62С24Б9Ос3Е2Ол
Средний возраст, лет	95	8,2
Средний диаметр стволов, см	24,1	–
Средняя высота, м	23,0	1,4
Относительная полнота	0,7	–
Густота древостоя, экз./га.	482	4310
Класс бонитета	4	–
Запас древостоя, м ³ /га	218	–

Таблица 2
Основные характеристики подроста и подлеска на опытных участках

Характеристики	Древостой		Гарь	
	подрост	подлесок	подрост	подлесок
Состав, %	91С6Б2Е1Ос	61Р26М13Ш	62С24Б9Ос3Е2Ол	41Ря624Мож14Шип 11Ив6Кл4Крш
Средний возраст, лет	9,5	–	8,2	–
Средняя высота, см	63	70	143	128
Численность, экз./га	780	320	4310	860
Численность сухостоя, экз./га	212	21	259	28

Таблица 3

Перечень видов и проективное покрытие растений в составе живого напочвенного покрова на объектах исследования

Русское и латинское название вида	Проективное покрытие, %	
	древостой	гарь
Брусника обыкновенная – <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	32,2	11,7
Вейник наземный – <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth	2,2	2
Вереск обыкновенный – <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull.	11,4	14,1
Дикранум гладкий – <i>Dicranum scoparium</i> Hedw	1,1	0,1
Ритидиладельфус квадратный – <i>Rhytidiadelphus squarrosus</i> (Hedw.) Варш.	0,8	0,1
Гилокомиум блестящий – <i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Schimp	1,0	0,1
Плевроциум Шребера – <i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.	0,2	0,1
Земляника лесная – <i>Fragaria vesca</i> L.	0,2	0,6
Золотарник обыкновенный – <i>Solidago virgaurea</i> L.	0,1	1,9
Иван-чай узколистный – <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	0,1	3,2
Клевер ползучий – <i>Trifolium repens</i> L.	–	0,6
Кукушкин лен обыкновенный – <i>Polytrichum commune</i> Hedw.	–	0,6
Кульбаба скальная – <i>Leontodon saxatilis</i> Lam.	–	0,6
Линнея северная – <i>Linnaea borealis</i> f. <i>arctica</i> Wittr.	–	0,6
Кладония оленья – <i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F.H.Wigg.	4,8	6,4
Кладония лесная – <i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.	9,1	3,4
Пельтигера собачья – <i>Peltigera canina</i> (L.) Willd.	2,4	7,2
Луговик дернистый – <i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P. Beauv.	0,8	1,4
Луговик извилистый – <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	1,1	1,4
Марьяник лесной – <i>Melampyrum sylvaticum</i> L.	0,1	2,5
Мятлик луговой – <i>Poa pratensis</i> L.	0,2	2,6
Ожика волосистая – <i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	0,1	3,1
Осот полевой – <i>Sonchus arvensis</i> L.	0,1	0,6
Политрихум можжевельный – <i>Polytrichum juniperinum</i> (Hedw.)	–	21,3
Ситник развесистый – <i>Polytrichum juniperinum</i> (Hedw.)	–	0,6
Сфагнум узколистный – <i>Sphagnum angustifolium</i> (Warnst.) C.E.O.Jensen	–	0,6
Тимьян ползучий – <i>Thymus serpyllum</i> L.	0,1	–
Тростник обыкновенный – <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin.	–	1,3
Черника обыкновенная – <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	0,7	1,3
Итого видов сосудистых растений	14	18
Итого видов зеленых мхов	4	6
Итого видов лишайников	3	3
Общее количество видов	21	28
Общее проективное покрытие, %	68,8	89,8

Таблица 4

Структура площади опытных участков и количество видов по ярусам растительности

Характеристики	Древостой	Гарь
Количество видов в травяно-кустарничковом ярусе	14	18
Количество видов в мохово-лишайниковом ярусе	7	10
Итого видов	21	28
Доля минерализованной почвы, %	2,3	4,9
Доля площади без живого напочвенного покрова, %	31,2	5,3
Общее проективное покрытие, %	66,5	89,8

Живой напочвенный покров под пологом древостоя в отдельных случаях может отсутствовать полностью, то есть формируются мертвопокровные парцеллы. Это связано с формированием мощного слоя слаборазложившейся лесной подстилки, включающей хвою, кору, шишки и мелкие ветки. Доля такой площади в сосняке брусничном составляет более 31 % (см. табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительные характеристики подроста сосны, произрастающего под пологом древостоев и на гари, свидетельствует о том, что средний возраст, средняя высота, а также структура по виталитету существенным образом различаются. Средний возраст подроста под пологом древостоя больше, чем на гари при одинаковой высоте. При этом численность подроста на гари в несколько раз больше, чем под пологом. Подрост на опытных участках различается и по составу. Под пологом древостоев подрост сосны составляет 91 % от общей численности, а на гари – 61 %.

Под пологом сосняка брусничного подросток представлен 3 видами, а на гари – 6 видами. На обоих объектах исследования преобладает в составе подлеска рябина обыкновенная. Общая численность подлеска не превышает 320 и 860 экз./га соответственно под пологом и на гари.

В составе травяно-кустарничкового яруса под пологом древостоя выявлено 14 видов, а на гари – 18 вида. Мохово-лишайниковый ярус включает 8 видов под пологом древостоя и 10 видов на гари. Под пологом древостоев преобладает брусника обыкновенная, на ее долю приходится 24 % общего проективного покрытия. На гари максимальную долю от общего проективного покрытия занимают лишайники – 17 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Климов Б. Б., Грязькин А. В., Гаврилова О. И. Особенности естественного возобновления сосны под пологом сухих сосняков Бурятии // Известия Санкт-Петербург. лесотехнич. акад. 2024. № 248. С. 123–137.
2. Оценка естественного возобновления хвойных пород на сплошных вырубках в условиях Рощинского лесничества / А. А. Фетисова, А. В. Грязькин, Н. В. Ковалев [и др.] // Лесной журн. 2013. № 6. С. 15–17.
3. McCarthy N., Scott Bentsen Niclas, Willoughby Ian Philippe. The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century // Eur J Forest Res. 2011. 130. P. 7–16.
4. Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests // Scandinavian Journal of forest re-search. 2021; 37. 1. 14–22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133

5. Тихомирова А. А., Грязькин А. В., Гаврилова О. И. Возобновительный потенциал сосняков. СПб. : Лань, 2025. 128 с.

6. Видовой состав и запасы фитомассы живого напочвенного покрова в сосняках лишайниковых ХМАО – Югры / З. Я. Нагимов, И. Н. Артемьева, И. В. Шевелина, В. З. Нагимов // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1 (80). С. 48–56.

7. Санников С. Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной / отв. ред. С. А. Мамаев. М. : Наука, 1992. 263 с.

8. Фуряев В. В., Киреев Д. М., Злобина Л. П. Смена хвойных лесов мелколиственными под воздействием пожаров в Средней Сибири // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 100–105.

9. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests / Russia. Forests, 2020. Vol. 13, Iss. 6, pp. 531–540. DOI: 10.3832/for3371-013

10. Influence of herbaceous ground cover on forest establishment and growth on eastern US coal surface mines / J. A. Franklin, C. E. Zipper, J. A. Burger (et al.) // New Forests. 2012; 43: 905–924. Doi: 10.1007 / s11056-012-9342-2

11. Особенности роста подроста сосны под пологом древостоев на сухих бедных почвах / А. В. Грязькин, Н. В. Беляева, И. А. Кази, А. В. Ефимов, И. А. Сырников // Научный журнал «Research Science» (Banská Bystrica, Словакия). 2019. № 8. С. 3–6. URL: <http://researchscience.info/payment/>.

12. Влияние типа леса и полноты древостоев на обеспеченность подростом спелых и перестойных сосняков подзоны северной тайги / Е. С. Залесова, Л. А. Белов, С. В. Залесов, Ф. Т. Тимербулатов, А. И. Чермных // Междунар. науч.-исслед. журн. 2019. № 11(89), ч. 2. С. 37–41.

13. Ипатов В. С., Тархова Т. Н. Количественный анализ ценотических эффектов в размещении деревьев по территориям // Ботан. журн. 1975. № 9. С. 1237–1249.

14. Beckage B., Clark J. S. (2003) Seedling survival and growth of three forest tree species: the role of spatial heterogeneity. Ecol 84(7): 1849–1861.

15. Frelich L. E. (2020) Boreal and Taiga Biome // Encyclopedia of the World's Biomes. pp. 103–115. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.11926-8

16. Повреждаемость молодняков сосны в связи с условиями произрастания / С. Г. Парамонов, А. В. Грязькин, А. П. Смирнов [и др.] // Известия Санкт-Петербург. лесотехнич. акад. 2023. Вып. 245. С. 126–139. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.126-139

17. Алексеев, В. А. Многолетняя динамика прихода ФАР и прирост древесины в южно-таежных древостоях // Лесоведение. 1979. № 6. С. 24–31.

18. Gauthier, S. Bernier P., Kuuluvainen T. [et al.] Boreal forest health and global change // Science. 2015. Vol. 349, No 6250, pp. 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092.

19. Естественное возобновление сосны на гарях в лесостепи Западной Сибири / Н. С. Санникова, С. Н., Санников А. А. Кочубей, И. В. Петрова // Сибирский лесной журнал. 2019. № 5. С. 22–29. DOI: 10.15372/SJFS20190503

20. Lilja S., Kuuluvainen T. Structure of old *Pinus sylvestris* dominated forest stands along f Geographik and human impact gradient in mid-boreal Fennoscandia // Silva fennica. – 2005. № 39 (3). P. 407–428.

21. Сохранность и рост культур сосны, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой в условиях Карелии / А. И. Соколов, В. А. Харитонов, А. Н. Пеккоев, Т. И. Кривенко // Известия вузов. Лесной журнал. 2015. № 6 (348). С. 46–56. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.46

22. Грязькин А. В. Пат. 2084129 РФ, МКИ С 6 А 01 G 23/00. Способ учета подроста. № 94022328/13; Заяв. 10.06.94; Оpub. 20.07.97. Бюл. № 20.

REFERENCES

1. Klimov B. B., Gryaz'kin A. V., Gavrilova O. I. Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya sosny' pod pologom suxix sosnyakov Buryatii // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoy akademii. 2024. № 248. S. 123–137.

2. Ocenka estestvennogo vozobnovleniya xvojny'x porod na sploshny'x vy'rubkax v usloviyax Roshhinskogo lesnichestva / A. A. Fetisova, A. V. Gryaz'kin, N. V. Kovalev [i dr.] // Lesnoj zhurn. 2013. № 6. S. 15–17.

3. McCarthy N., Scott Bentsen Niclas, Willoughby Ian Philippe. The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century // Eur J Forest Res. 2011. 130. P. 7–16.

4. Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests. Scandinavian Journal of forest research. 2021; 37. 1. 14–22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133

5. Tixomirova A. A., Gryaz'kin A. V., Gavrilova O. I. Vozobnovitel'ny'j potencial sosnyakov. SPb. : Lan', 2025. 128 s.

6. Vidovoj sostav i zapasy' fitomassy' zhivogo napochvennogo pokrova v sosnyakax lishajnikov'x XMAO – Yugry' / Z. Ya. Nagimov, I. N. Artem'eva, I. V. Shevelina, V. Z. Nagimov // Lesa Rossii i xozyajstvo v nix. 2022. № 1 (80). S. 48–56.

7. Sannikov S. N. E'kologiya i geografiya estestvennogo vozobnovleniya sosny' oby'knovennoj / otv. red. S. A. Mamaev. M. : Nauka, 1992. 263 s.

8. Furyaev V. V., Kireev D. M., Zlobina L. P. Cmena xvojny'x lesov melkolistvenny'mi pod vozdeystviem pozharov v Srednej Sibiri // Geografiya i prirodny'e resursy'. 2015. № 2. S. 100–105.

9. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-

cutting in the Boreal Forests // Russia. Forests, 2020. Vol., 13, Iss. 6, pp. 531–540. DOI: 10.3832/for3371-013

10. Franklin J. A., Zipper C. E., Burger J. A. (et al.) Influence of herbaceous ground cover on forest establishment and growth on eastern US coal surface mines. New Forests. 2012; 43: 905–924. Doi: 10.1007/s11056-012-9342-2

11. Osobennosti rosta подроства сосны' pod pologom drevostoev na suxix bedny'x pochvax / A. V. Gryaz'kin, N. V. Belyaeva, I. A. Kazi, A. V. Efimov, I. A. Sy'mnikov // Nauchny'j zhurnal Research Science (Banská Bystrica, Slovakia). 2019. № 8. S. 3–6. URL: <http://researchscience.info/payment/>.

12. Vliyanie tipa lesa i polnoty' drevostoev na obespechennost' подроством spely'x i perestojny'x sosnyakov podzony' severnoj tajgi / E. S. Zalesova, L. A. Belov, S. V. Zalesov, F. T. Timerbulatov, A. I. Chernny'x // Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn. 2019. № 11(89). Ch. 2. S. 37–41.

13. Ipatov V. S., Tarxova T. N. Kolichestvenny'j analiz cenoticheskix e'ffektov v razmeshhenii derev'ev po territoriyam // Botan. zhurn. 1975. № 9. S. 1237–1249.

14. Beckage B., Clark J. S. (2003) Seedling survival and growth of three forest tree species: the role of spatial heterogeneity. Ecol 84(7): 1849–1861.

15. Frelich L. E. (2020) Boreal and Taiga Biome // Encyclopedia of the Worlds Biomes. pp. 103–115. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.11926-8

16. Povrezhdaemost' molodnyakov sosny' v svyazi s usloviyami proizrastaniya / S. G. Paramonov, A. V. Gryaz'kin, A. P. Smirnov [i dr.] // Izvestiya Sankt-Peterburg. Lesotexnich. akad. 2023. Vy'p. 245. S. 126–139. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.126-139

17. Alekseev V. A. Mnogoletnyaya dinamika priroda FAR i prirost drevesiny' v yuzhno-taehzny'x drevostoyax // Lesovedenie. 1979. № 6. S. 24–31.

18. Gauthier, S. Bernier P., Kuuluvainen T. [et al.] (2015) Boreal forest health and global change. Science, Vol. 349, No 6250, pp. 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092

19. Estestvennoe vozobnovlenie sosny' na garyax v lesostepi Zapadnoj Sibiri / N. S. Sannikova, S. N. Sannikov, A. A. Kochubej, I. V. Petrova // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2019. № 5. S. 22–29. DOI: 10.15372/SJFS20190503

20. Lilja S., Kuuluvainen T. Structure of old *Pinus sylvestris* dominated forest stands along f Geographik and human impact gradient in mid-boreal Fennoscandia // Silva fennica. 2005. № 39 (3). P. 407–428.

21. Sokolov A. I., Xaritonov V. A., Pekкоеv A. N., Krivenko T. I. Soxrannost' i rost kul'tur sosny', sozdan-ny'x posadochny'm materialom s zakry'toj kornevoj sistemoy v usloviyax Karelii // Izvestiya VUZov. Lesnoj zhurnal. 2015. № 6 (348). S. 46–56. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2015.6.46

22. Gryaz'kin A. V. Pat. 2084129 RF, МКИ S 6 A 01 G 23/00. Sposob ucheta подроства. № 94022328/13; Zayav. 10.06.94; Opub. 20.07.97. Byul. № 20.

© Гаврилова О. И., Грязькин А. В., Кази И. А., 2026

ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО ЛЕСОВОЗОБНОВЛЕНИЯ НА ВЫРУБКАХ В ТРАВЯНЫХ ТИПАХ ЛЕСА ГОРНОГО УРАЛА*

Н. В. Танцырев

Ботанический Сад УрО РАН
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 марта, 202

Аннотация. Рассмотрена динамика условий среды и начального этапа формирования древостоев на вырубках в горных темнохвойных травяно-папоротниковых лесах на границе Среднего и Северного Урала. Работа выполнена в молодняках, формирующихся на вырубках 4-х и 11-летней давности в ельнике высокотравно-папоротниковом (Евтр-п) и на вырубках 4-х, 9-и, и 20-летней давности в ельнике мишисто-травяно-папоротниковом (Еми-тр-п) и на вырубке в этом типе леса с проведенной минерализацией поверхности почвы через 3, 6 и 25 лет после рубки. В течение длительного времени на вырубках господствует высокотравье и кустарники, что затрудняет естественное возобновление. Численность темнохвойного подроста, появившегося после рубки, не превышает 1,5 тыс. экз./га, а в Евтр-п – не более 0,5 тыс. экз./га. Успешное последующее возобновление темнохвойных (до 3,3 тыс. экз./га), березы (3,2 тыс. экз./га) и обильное ивы козьей (5,5 тыс. экз./га) происходит лишь на площадках с обнаженным минеральным горизонтом почвы. На вырубках в Еми-тр-п предполагается формирование низкополотных древостоев не естественной полосной структуры. В них полосы древостоя шириной 10–20 м из сохраненного темнохвойного подроста предварительного возобновления (1,4–3,0 тыс. экз./га), чередуются с длительно-производными травяно-кустарниково-мелколиственными полосами шириной 5–15 м в бывших технологических коридорах. При недостаточном количестве темнохвойного подроста (0,5–0,7 тыс. экз./га) на вырубках в Евтр-п могут формироваться длительно-производные травяно-кустарниковые редколесья и пустоши.

Ключевые слова: темнохвойные леса; динамика условий среды; подрост; содействие естественному возобновлению; формирование молодняков.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 99–106

PROBLEMS OF NATURAL REFORESTATION IN CLEARINGS IN GRASS FOREST TYPES OF THE URAL MOUNTAIN

N. V. Tantsyrev

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

Abstract. The dynamics of environmental conditions and the initial stage of tree stand formation in clearings in mountain dark coniferous grass-fern forests on the border of the Middle and Northern Urals are considered. The work was carried out in young stands formed in 4- and 11-year-old clearings in tall-grass-fern spruce forest and in 4-, 9-, and 20-year-old clearings in mossy-grass-fern spruce forest and in the clearing in this type of forest with mineralization of the soil surface 3, 6 and 25 years after logging. In the clearings tall grasses and shrubs are dominating for a long time, which hinders natural regeneration. The number of dark coniferous undergrowth that appeared in the clearings in mossy-grass-fern spruce forest does not exceed 1.5 thous. spec./ha, and in tall-grass-fern spruce forest – no more than 0.5 thous. spec./ha. Successful subsequent regeneration of dark conifers (up to 3.3 thous. spec./ha) and birch (3.2 thous. spec./ha) and abundant of goat willow (5.5 thous. spec./ha) occurs only in areas with an exposed mineral soil horizon. In the clearings in mossy-grass-fern spruce forest, it is expected that low-density stands of an unnatural strip structure will be formed. In them, strips of forest stands 10–20 m wide, made up of dark coniferous undergrowth of preliminary renewal preserved during felling (1.4–3.0 thous. spec./ha), alternate with long-term derivative grass-shrub-small-leaved strips 5–15 m wide in former technological corridors. With an insufficient amount of dark coniferous undergrowth (0.6–0.7 thous. spec./ha) in clearings in tall-grass-fern spruce forest, long-term derivative grass-shrub sparse forests and wastelands can form.

Keywords: dark coniferous forests; dynamics of environmental conditions; undergrowth; promoting natural regeneration; formation of young stands.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанический Сад УрО РАН. № гос. регистрации 123112700125-1.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное исследование сложных закономерностей динамики численности природных ценопопуляций древесных растений на этапе их возобновления и их структурно-функциональных связей с внешними экологическими факторами и всеми компонентами лесных экосистем, программирующих всю последующую структуру и динамику биогеоценоза – одна из ключевых и самых актуальных проблем в лесной экологии и лесоведении [20; 23; 24; 27]. Скорейшее восстановление лесных экосистем, нарушенных таким глобальным антропогенным воздействием, как сплошные рубки, и разработка методов содействия этому процессу, по-прежнему, остается первостепенной задачей. Неоднократно отмечалось, что определяющее значение для успешности последующего естественного лесовозобновления имеют быстроизменяющиеся условия среды вырубок – степень развития травянистой и кустарниковой растительности и минерализации почвы, которые зависят от типа леса, технологии и сезона рубок [2; 6; 8; 19; 21]. При этом количество подроста древесных растений находится в обратной зависимости от степени развития трав, их биомассы, размеров и степени проективного покрытия. [4; 9; 10; 11; 18].

В настоящее время наиболее хорошо изучены процессы лесовозобновления в связи с изменениями условий среды на равнинных и низкогорных вырубках в зеленомошной группе типов леса. Особенности естественного возобновления лесообразующих древесных растений в зависимости от изменений факторов среды и дальнейшего формирования древостоев на вырубках в травяно-папоротниковой группе типов леса, широко распространённых в горной тайге Среднего и Северного Урала [5], почти не изучались. По своим характеристикам коренные девственные абсолютно разновозрастные темнохвойные леса этой группы района основного водораздела экологически близки черневым темнохвойным лесам горных систем Южной Сибири [7; 11; 12]. Поэтому проблема естественного возобновления и формирования полноценных коренных темнохвойных древостоев на вырубках в горных травяных и близкородственных типах леса может быть актуальна для многих регионов [2; 6].

Цель настоящего исследования – изучение динамики условий среды и начального этапа формирования древостоев на вырубках в горных темнохвойных травяно-папоротниковых лесах Урала.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены на границе Среднего и Северного Урала в районе основного водораздела по его восточному макросклону в подзоне средней тайги на территории Новолялинского лесничества Свердловской области. Объектами являлись молодняки, формирующиеся на вырубках в ельнике мшисто-травяно-папоротниковом (Емш-тр-п) и ельнике высокотравно-папоротниковом (Евтр-п), расположенных на высоте 520–620 м над ур. м.

Свежие ельники мшисто-травяно-папоротниковые (Емш-тр-п) III–IV бонитета с запасом до 350 м³/га

характерны для средних и верхних частей склонов с бурыми горно-лесными каменистыми средней мощности почвами. На участках с сомкнутым древостоем развит моховой покров (преимущественно *Hylacomium splendens* (Hdw.) Schmp), с иногда, плотными зарослями папоротников (*Dryopteris* sp.). В прогалинах густо разрастается высокотравье: борец северный, какалия, василистник, Марьин корень. Устойчиво влажные редкостойные (относительная полнота не более 0,5) ельники высокотравно-папоротниковые (Евтр-п) IV бонитета с запасом до 150–200 м³/га располагаются на дренированных вершинах плоских увалов и в верхних частях пологих склонов с мелкими щебнистыми бурыми горно-лесными суглинистыми почвами с близким залеганием скальных монолитов и локальными выходами почвенно-грунтовых вод. В живом напочвенном покрове господствует высокотравье. Кроме вышеперечисленных видов, на увлажненных участках – валериана, чемерица, таволга, кочедыжник. Мхи (чаще *Pleurozium Schreberi* (Brid.) Mill.) встречаются только на скальных выходах и на лежащих полуразложившихся древесных стволах. Коренные абсолютно разновозрастные древостои в этих типах леса сформированы елью (*Picea obovata* Ledeb), кедром сибирским (сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour)) и пихтой (*Abies sibirica* Ledeb) с редким единичным участием березы (*Betula pubescens* Ehrh). В подлеске обычна рябина (*Sorbus sibirica* Hedl), ива козья (*Salix caprea* L), шиповник, жимолость, красная смородина [3; 5]. Обычны деревья кедра старше 500-летнего возраста диаметром более 1 м. Сравнительно часто встречаются деревья, носящие следы ударов молний. Но возникновения и распространения лесных пожаров под пологом девственных древостоев в этих типах леса не происходило. Промышленное освоение этих лесов началось в конце 60-х гг. XX в., по мере истощения предгорно-низкогорных лесосырьевых баз. Повторной рубке производные древостои, формирующиеся здесь на месте вырубок прежних лет, не подвергались.

Изучение динамики условий среды, численности и видового состава растительности проведено на временных пробных площадях (ВПП) размером 6–10 га, заложенных в молодняках, формирующихся на летних вырубках 4-, 9- и 20-летней давности в Емш-тр-п и на вырубках 4- и 11-летней давности в Евтр-п, представляющих собой элементы генетических рядов развития соответствующих древостоев [14]. Для сравнения в молодняке в Емш-тр-п, формирующемся на летней вырубке с проведенным содействием естественному возобновлению кедра, путем создания минерализованных площадок [15], повторно закладывались пробные площади через 3, 6 и 25 лет после рубки.

Сравнительный количественный учёт параметров напочвенной среды, растительности, всходов и подроста древесных растений проведён на 40–64 учётных площадках размером 5×5 м, заложенных несколькими параллельными рядами поперёк вырубок. Учётные площадки располагались через 20 м в ряду и расстоянием между рядами 50 м, отдельно на бывших трелевочных волоках (технологических коридорах) и

в пасаках с сохраненным при рубке подростом. На каждой учётной площадке определен видовой состав, численность и степень проективного покрытия поверхности (в процентном отношении) мхов, травянистой и кустарниковой растительности, степень сомкнутости древесного полога. Также у деревьев, развившихся из подроста, измерен диаметр на высоте 1,3 м и высота. Численность подроста кедр сибирского учитывали по двум параметрам – количеству «гнезд» (плотных групп подроста, проросших из неиспользованных тонкоклювой кедровкой (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Brehm C. L.) своих кладовок семян) и количеству экземпляров в них. Возраст подроста последующего возобновления определен с точностью до одного года по количеству годичных вертикальных приростов терминального побега.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рассматриваемых вырубках заготовка древесины производилась в летнее время по общепринятой технологии с сохранением подроста. Валка деревьев осуществлялась вершиной к трелевочным волокам с дальнейшей их трелевкой тракторами по волокам и одновременным приминанием уложенных порубочных остатков. В результате трелевки произошла фрагментарная минерализация поверхности почвы. Ширина волоков на вырубках, с учетом участков без подроста, колеблется в пределах 5–15 м, соответственно ширина пасаек с сохраненным подростом – 10–20 м. Тем самым, общая площадь волоков составляет 25–35 % от общей площади вырубок.

Под пологом коренных древостоев в Емш-тр-п количество разновозрастного темнохвойного подроста высотой до 8 м колеблется от редких единичных экземпляров до 3,0–3,5 тыс. экз./га. В видовом составе численность, также значительно варьируя, может достигать: ель – 1,2 тыс. экз./га, пихта – 2,0 тыс. экз./га, кедр – 0,5 тыс. экз./га. Подрост находится в угнетённом состоянии и размещен не равномерно, часто био-группами, преимущественно, на лежащих полуразложившихся древесных стволах (валеже) с моховым покровом, реже – на моховом покрове скальных выходов. В относительно редкостойных Евтр-п с развитым высокотравьем малочисленный подрост (ель до 0,2–0,3 тыс. экз./га, пихта до 0,2–0,4 тыс. экз./га, кедр до 0,1–0,2 тыс. экз./га и в целом не более 0,7 тыс. экз./га) встречается только на полуразложившемся древесном валеже.

Количество сохранившегося подроста в пасаках на рассматриваемых вырубках в Емш-тр-п в пересчете на всю площадь составляет 0,9–1,9 тыс. экз./га (табл. 1, 2), в том числе ели – 0,2–1,0 тыс. экз./га, пихты – 0,3–1,8 тыс. экз./га и кедр – не более 0,2 тыс. экз./га. На вырубках в Евтр-п общая численность сохраненного темнохвойного подроста и тонкомера высотой до 8 м – не более 0,5 тыс. экз./га (табл. 3), в том числе: ели – не более 0,2 тыс. экз./га, пихты – не более 0,2 тыс. экз./га и кедр – не более 0,1 тыс. экз./га. У подроста отмечается задержка в росте, за исключением самого молодого, появившегося в период за 1–5 лет до рубки. Как обычно, резкое увеличение приростов по высоте наблюдается на третий-четвертый год после рубки.

Как и почти во всех типах леса, после сплошной рубки древостоя на рассматриваемых вырубках происходит быстрое разрастание высокостебельной травянистой растительности, малины, шиповника и других кустарников. Подпологовое высокотравье, кустарники и преобладающие кипрей и вейник совместно формируют единые плотные сомкнутые заросли высотой до 1,5–2 метров. К четвертому году после рубки их общая степень проективного покрытия составляет около 90 % (табл. 1, 3). Такие условия могут полностью исключать последующее лесовозобновление, особенно на волоках с плотно уложенными на них порубочными остатками (степень покрытия 17,9–22,1 %). Пригодными для поселения древесных растений остаются лишь разрозненные участки с обнаженным минеральным горизонтом почвы (общая степень минерализации вырубок около 6 %) и с моховым покровом (7,2–10,9 %) под куртинами сохраненного подроста и на скальных выходах.

На вырубках в зеленомошной группе типов леса происходит достаточно быстрое лесовосстановление с вытеснением высокотравья. И спустя примерно 10 лет после рубки, формируются плотные хвойно-мелколиственные молодняки с относительно равномерным, в том числе на бывших волоках, размещением деревьев [1; 8–10; 18]. В отличие от них, условия кипрейно-вейниково-малинниковых вырубок [10], образующихся в рассматриваемых типах леса (табл. 1, 2, 3), к 9–11-му году меняются не значительно, особенно на волоках, где продолжает господствовать кипрей и другое высокотравье и кустарники (общим проективным покрытием около 100 %). За счет их разрастания снижается степень минерализации до 1,9–2,7 % и слабо протекает восстановление мохового покрова (до 12,7–14,3 %). В результате частичного разложения сокращается количество порубочных остатков и пней (до 8,5–10,2 %).

В Емш-тр-п с четвертого по девятый год после рубки (табл. 1) в пасаках степень сомкнутости куртин сохраненного темнохвойного подроста возрастает с 13,9 % до 24,5 %. За его счет и формируется древостой средней высотой около 5–6 м. Под пологом куртин происходит частичное увеличение степени проективного покрытия мхов с 7,9 до 23,3 %. Количество темнохвойного подроста последующего возобновления высотой до 0,7 м на вырубке 9-летней давности составляет около 0,8 тыс. экз./га, в том числе ели – 0,4 тыс. экз./га, кедр – 0,3 тыс. экз./га в 0,2 тыс. «гнезд»/га, а пихты – не более 0,1 тыс. экз./га. Расположен он преимущественно у куртин сохраненного при рубке подроста на границе с бывшими трелевочными волоками. Причем, интенсивность возобновления разная. Возобновление пихты в первые годы после рубки не отмечено, а её единичные всходы начинают появляться спустя лишь 6–7 лет на пятнах восстанавливающихся мхов. Возобновление ели в эти годы происходило относительно равномерно. В возрастной структуре подроста кедр преобладают «гнезда», появившиеся в первый год после рубки, а их появление прекращается на 5-й год. В зеленомошной группе типов леса появление отдельных всходов кедр может продолжаться в течение 7–9 лет [16].

В составе вырубленных древостоев береза встречалась единично, что может исключать ее обильное вегетативное возобновление. Тем не менее, в сочетании с семенным, при локальном размещении на некоторых участках выруб, могут образоваться её плотные заросли. Характерной чертой является обилие ивы козьей (до 2,5 тыс. экз./га) и рябины (до 2,7 тыс. экз./га), которые в какой-то мере могут принимать участие в формировании молодняка и общей сомкнутости древесного полога (21,3 %), оставаясь со временем в подлеске. При этом их побеги активно используются лосями в зимнем питании, особенно на волоках, где они более доступны. В конечном итоге это часто может приводить к полной гибели этих кустарников. На волоках к 9-му году после рубки степень сомкнутости полога высотой до 2,5 м ивы и рябины в сочетании с березой (2,2 тыс. экз./га) составляет 13,6 %, где под ними фрагментарно появляются мхи (4,2 %).

Спустя 20 лет после рубки (табл. 1) в пасаках формируется древостой составом 4Е4П1К1Б с не равномерным размещением деревьев, общей сомкнутостью полога 45,7 % (сумма площадей сечений 28,9 м²/га) из подроста предварительного возобновления высотой 8–10 м средним диаметром 14 см и участием березы (0,8 тыс. экз./га) последующего возобновления высотой до 8 м и диаметром 8 см. По-прежнему разрозненные участки мхов (23,6 %) встречаются только под их плотными куртинами. Количество разновозрастного темнохвойного подроста высотой до 3 м, появившегося за все годы после рубки, составляет: ели – 0,9 тыс. экз./га, кедр – 0,2 тыс. экз./га и единично пихта. На волоках продолжает господствовать высокотравье (79,3 %), а древостой высотой до 6–8 м об-

щей сомкнутостью полога 18,2 % и суммой площадей сечений всего 3,1 м²/га представлен редкими деревьями березы (0,7 тыс. экз./га) и кустарниками ивы козьей и рябины (0,4 тыс. экз./га). Под их куртинами на редких моховых участках (7,2 %) встречается малочисленный угнетенный подрост ели (0,2 тыс. экз./га) и кедр (0,1 тыс. экз./га).

Создание относительно равномерно размещенных по вырубке в местах без подроста площадок размером 5-10х4 м с удаленным верхним органогенным и обогащенным минеральным горизонтом почвы (общей степенью 25 %) положительным образом сказывается на последующем возобновлении [15]. На вырубке в Емш-тр-п, с проведенным таким методом содействием естественному возобновлению (табл. 2), через три года на площадках, расположенных на волоках (степень минерализации 34,7 %), численность появившегося темнохвойного подроста составила: ели – 1,0 тыс. экз./га, кедр – 1,5 тыс. экз./га в 0,8 тыс. «гнезд»/га и пихты – 0,8 тыс. экз./га. В пасаках, при меньшей степени минерализации (13,3 %), численность соответственно ниже: ели – 0,4 тыс. экз./га, кедр – 0,5 тыс. экз./га в 0,4 тыс. «гнезд»/га и пихты – 0,1 тыс. экз./га. Одновременно с темнохвойным подростом на этих площадках наблюдается обильное появление семенной березы (3,2 тыс. экз./га) и, особенно, ивы козьей (5,5 тыс. экз./га), которые в конечном итоге формируют плотные заросли и негативно влияют на дальнейшее появление, рост и развитие подроста. К шестому году в результате зарастания площадок мхами, травянистой растительностью и кустарниками общая степень минерализации снизилась до 18,5 %.

Таблица 1

Динамика условий среды на вырубке в ельнике мшисто-травяно-папоротниковом (Емш-тр-п)

Тип экотопа	А, лет	Степень проективного покрытия и сомкнутости древесного полога, %						Подр, тыс. экз./га		
		МП	М	НДр	ВТр	Кт	Пдр	Предв.	Посл.	
								Тхв.	Тхв.	Мл.
волок	4	8,2 ±2,5	2,9 ±1,7	17,9 ±7,5	83,5 ±6,2	8,1 ±1,2	–	–	Ед.	0,2±0,1
	9	3,3 ±1,1	4,2 ±2,9	9,6 ±2,9	86,0 ±3,8	18,8 ±4,1	13,6 ±7,7	–	0,8±0,4	2,2±0,7
	20	–	7,2 ±1,8	Фр.	79,3 ±2,3	Фр.	18,2 ±2,4	–	0,3±0,1	0,7±0,3
пасека	4	3,6 ±2,1	7,9 ±1,5	11,3 ±2,4	76,3 ±3,7	13,0 ±5,2	13,9 ±5,0	1,4±0,3	0,6±0,1	0,5±0,2
	9	–	23,3 ±0,5	7,6 ±2,0	62,4 ±5,2	19,7 ±2,6	24,5 ±4,0	1,8±0,6	1,0±0,3	0,9±0,3
	20	–	23,6 ±7,2	4,1 ±1,9	58,8 ±5,7	Фр.	45,7 ±5,0	2,3±0,6	1,2±0,3	0,8±0,3
в среднем, всего	4	6,0 ±1,6	7,2 ±1,8	12,6 ±1,8	79,1 ±3,2	9,3 ±1,7	8,0 ±1,5	0,9±0,3	0,4±0,1	0,3±0,1
	9	2,7 ±1,2	12,7 ±4,4	8,5 ±1,7	73,8 ±4,2	19,2 ±2,3	21,3 ±4,2	0,9±0,4	0,8±0,1	1,6±0,3
	20	–	16,7 ±3,1	2,8 ±1,2	70,5 ±6,2	Фр.	29,6 ±6,3	1,6±0,4	0,8±0,2	0,8±0,2

Примечание: А – давность рубки, лет; МП – минерализованная поверхность почвы; М – моховой покров; НДр – неразложившаяся древесина (пни, порубочные остатки, валеж); ВТр – высокотравье; Кт – кустарники; Пдр – подрост и молодые деревья лесобразующих видов; Предв. – появившийся до рубки; Посл. – появившийся после рубки; Тхв. – темнохвойный; Мл – мелколистственный; Фр. – незначительные фрагменты.

Через 25 лет площадки не сохранились, и почти не встречаются не разложившиеся древесные остатки и пни. В живом напочвенном покрове на волоках и в пасаках, как и на вырубках без минерализации, преобладает высокотравье и папоротники. Интенсивность восстановления мохового покрова здесь в целом такая же, как и на вырубках без минерализации (табл. 1), но в пасаках проективное покрытие мхов составило 49,6 %, возможно, в связи с большим количеством сохраненного темнохвойного подраста (3,0 тыс. экз./га). Общая сомкнутость его полога с третьего по шестой год возросла с 12,4 до 19,6 %.

Через 25 лет (табл. 2) в пасаках формируется двухъярусный древостой составом 3ЕЗП1К1Б2Ив общей сомкнутостью 43,1 % (сумма площадей сечений 23,9 м²/га) из подраста предварительного возобновления в сочетании с березой и ивой козьею высотой около 8–10 м и елью, кедром и пихтой высотой 4–5 м, последующего возобновления. На волоках преобладает ива козья (4,1 тыс. экз./га) высотой до 10 м, которая вместе с березой (1,6 тыс. экз./га) образует плотные куртины в местах бывших минерализованных площадок. Там, где они менее развиты, встречаются кедр (0,6 тыс. экз./га в 0,3 тыс. «гнезд»/га) и ель (0,5 тыс. экз./га) высотой 4–5 м. Тем самым, на волоках формируются полосы молодняка с неравномерным размещением деревьев составом 4Б4Ив1К1Е суммой площадей сечений 18,4 м²/га общей сомкнутостью полога 38,9 %. При этом численность темнохвойного подраста, появившегося за все эти годы, в том числе угнетенного и отставшего в росте первых поколений, на волоках (1,0 тыс. экз./га) выше, чем в пасаках (0,3 тыс. экз./га).

Условия рубок в Евтр-п с 4-го по 11-й год после рубки практически не меняются (табл. 3). Как на бывших волоках, так и в пасаках продолжает господствовать высокотравье (75 %) и кустарники (12,2 %). Мхи общим проективным покрытием 14,3 % встречаются только на скальных выходах. Численность темнохвойного подраста высотой до 0,6 м, появившегося, в основном, только за первые четыре года после рубки, к 11-му году в пасаках составляет не более 0,6 тыс. экз./га. В том числе ели – 0,3 тыс. экз./га, пихты – не более 0,1 тыс. экз./га и кедра – 0,2 тыс. «гнезд»/га. На волоках встречаются редкие береза (0,2 тыс. экз./га), ива козья и рябина (0,2 тыс. экз./га). Тем самым, лесообразовательный процесс здесь протекает неудовлетворительно. Вырубку с редким размещением куртин и единичных темнохвойных деревьев (0,5 тыс. экз./ша) и порослевой березы (0,5 тыс. экз./га) высотой до 3 м (общая степень сомкнутости полога 3,6 %) можно считать необлесившейся.

Лесовозобновление на вырубках предполагает, в конечном итоге, формирование к возрасту технической спелости коренного древостоя исходного до рубки состава, полноты, запаса и других соответствующих параметров. На вырубках в Емш-тр-п коренной древостой развивается только в пасаках, преимущественно из сохраненного подраста предварительного возобновления. При продолжающемся в течение длительного времени господстве высокотравья в местах без подраста, здесь можно предполагать формирование низкополнотных древостоев не естественной полосной структуры [1; 16].

Таблица 2

Динамика условий среды на вырубке с проведенным содействием естественному возобновлению в ельнике мшисто-травяно-папоротниковом (Емш-тр-п)

Тип экотопа	А, лет	Степень проективного покрытия и сомкнутости древесного полога, %						Подр, тыс. экз./га		
								Предв.	Посл.	
		МП	М	НДр	ВТр	Кт	Пдр	Тхв.	Тхв.	Мл.
волок	3	34,7 ±8,0	3,9 ±1,5	17,9 ±2,8	61,4 ±6,3	14,2 ±2,7	–	–	3,3±0,6	1,6±0,6
	6	32,2 ±6,4	8,9 ±2,8	17,3 ±3,2	65,8 ±6,3	15,7 ±2,2	Фр.	–	2,6±0,5	2,5±0,8
	25	–	10,3 ±4,3	–	78,8 ±2,8	7,8 ±3,3	38,9 ±5,8	–	1,5±0,4	1,3±0,5
пасека	3	13,3 ±4,8	7,8 ±2,2	14,8 ±3,2	40,3 ±7,9	19,1 ±3,6	12,6 ±5,1	3,0±0,5	1,0±0,2	0,5±0,2
	6	7,4 ±4,0	20,7 ±5,6	9,5 ±1,9	58,4 ±6,5	17,0 ±6,0	19,4 ±5,1	3,0±0,5	0,9±0,3	1,8±0,8
	25	–	49,6 ±9,2	1,2 ±0,4	50,0 ±7,6	2,5 ±1,0	43,1 ±6,5	2,2±0,4	0,8±0,3	0,2±0,1
в среднем, всего	3	23,3 ±4,8	5,7 ±1,4	16,1 ±2,2	50,8 ±5,3	18,3 ±2,7	6,9 ±2,7	1,9±0,6	1,7±0,4	0,9±0,3
	6	18,5 ±4,0	14,8 ±3,2	13,6 ±1,8	62,1 ±4,6	15,8 ±4,2	10,3 ±3,0	1,7±0,5	1,6±0,5	2,0±0,6
	25	–	26,5 ±5,6	0,3 ±0,1	70,0 ±3,3	4,4 ±2,0	40,1 ±6,3	1,5±0,5	1,1±0,4	0,8±0,4

Примечание: А – давность рубки, лет; МП – минерализованная поверхность почвы; М – моховой покров; НДр – неразложившаяся древесина (пни, порубочные остатки, валеж); ВТр – высокотравье; Кт – кустарники; Пдр – подрост и молодые деревья лесобразующих видов; Предв. – появившийся до рубки; Посл. – появившийся после рубки; Тхв. – темнохвойный; Мл – мелколистный; Фр. – незначительные фрагменты.

Таблица 3

Динамика условий среды на вырубке в ельнике высокотравно-папоротниковом (Евтр-п)

Тип экотопа	А, лет	Степень проективного покрытия и сомкнутости древесного полога, %						Подр, тыс. экз./га		
		МП	М	НДр	ВТр	Кт	Пдр	Предв. Тхв.	Посл.	
волок	4	15,2 ±3,8	6,0 ±2,7	22,1 ±4,5	87,4 ±4,0	11,5 ±2,8	–	–	Ед.	0,2±0,1
	11	3,0 ±1,5	10,5 ±3,1	11,4 ±3,0	88,1 ±4,5	12,4 ±1,5	0,7 ±0,4	–	0,2±0,1	0,3±0,1
пасека	4	–	11,9 ±5,1	12,8 ±3,2	65,0 ±7,7	17,9 ±4,2	4,7 ±1,5	0,6±0,1	0,5±0,1	0,2±0,1
	11	Фр.	21,6 ±4,7	7,8 ±3,2	63,3 ±4,8	11,2 ±2,0	6,1 ±1,7	0,7±0,1	0,6±0,1	0,7±0,2
в среднем, всего	4	6,7 ±3,7	10,9 ±2,7	16,8 ±2,9	79,2 ±4,1	13,9 ±2,4	2,3 ±0,9	0,4±0,1	0,4±0,1	0,2±0,1
	11	1,9 ±0,8	14,3 ±3,0	10,2 ±2,3	75,0 ±3,4	12,2 ±2,2	3,6 ±0,4	0,5±0,1	0,4±0,1	0,5±0,1

Примечание: А – давность рубки, лет; МП – минерализованная поверхность почвы; М – моховой покров; НДр – неразложившаяся древесина (пни, порубочные остатки, валеж); ВТр – высокотравье; Кт – кустарники; Пдр – подрост и молодые деревья лесообразующих видов; Предв. – появившийся до рубки; Посл. – появившийся после рубки; Тхв. – темнохвойный; Мл – мелколиственный; Фр. – незначительные фрагменты.

При недостаточном количестве темнохвойного подроста предварительных генераций могут формироваться длительнопроизводные травяно-кустарниковые редколесья и даже пустоши, как это наблюдается на вырубках в Евтр-п. Тем самым, последующее лесовозобновление и формирование полноценных молодняков без дополнительных лесохозяйственных мероприятий крайне слабое или не возможно. Полученные результаты в какой-то мере могут перекликаться с ранее высказанным гипотетическим предположением о разной степени адаптации тех или иных типов условий местопроизрастания и соответствующих типов леса к действию катастрофических факторов [17], которая выражается в разной продолжительности и интенсивности лесовосстановления в соответствии со степенью и относительной частотой их горимости. На горях и вырубках в зеленомошных и нагорных типах леса, где частота и повторяемость пожаров относительно высока, процесс лесовозобновления и формирования молодого древостоя проходит в относительно короткие сроки. В, практически, ранее не горимых горных травяно-папоротниковых типах леса лесовозобновительный процесс на горях крайне растянут во времени, а на вырубках-горях абсолютно не выражен [17]. Тем самым, согласно полученным результатам, предположительно эти типы леса оказались не адаптированными не только к пожарам, но и к сплошным рубкам.

Минерализация поверхности почвы, путем удаления верхнего органогенного горизонта, положительным образом сказывается на возобновлении и дальнейшем развитии темнохвойных древесных растений на вырубках в Емш-тр-п. Но одного этого мероприятия в конечном итоге оказывается явно не достаточно, поскольку минерализованные участки интенсивно зарастают ивой козьей и, частично, березой, которые препятствуют дальнейшему появлению, интенсивному росту и развитию хвойных растений и могут полностью их вытеснять. Поэтому в дальнейшем здесь необходима регулярная интенсивная вырубка кустарников и березы в целях ухода за хвойным подростом,

появившимся на минерализованных участках, не зависимо от общей полноты древостоя. Это несколько не соответствует положениям действующих Правил ухода за лесами [13], которые основаны на многолетнем опыте проведения рубок ухода в молодняках преимущественно в равнинных лесах Европейской части России и отчасти Западной Сибири. Основными критериями назначения рубок ухода в молодняках является высокая общая сомкнутость (полнота) молодняка и явные признаки угнетения хвойных древесных растений. Поэтому необходима разработка к ним дополнений, с учетом конкретных лесотипологических условий [22]. На вырубках в Евтр-п при недостаточном естественном возобновлении напрашивается необходимость создания лесных культур. Но в связи с характерными лесорастительными условиями – слабый щербенный почвенный горизонт (не более 20–30 см), близкое залегание подстилающих скальных монолитов, позднее таяние снега, опасность эрозии почвы и т. д., делает здесь проведение искусственного возобновления традиционными методами затруднительным. Как уже отмечалось, под пологом древостоев в этом типе леса в районе основного водораздела обычные выходы грунтовых вод, тем самым происходит формирование ручьев, питающих реки двух крупных водных бассейнов – Волжско-Камского и Обь-Иртышского. В свою очередь это делает экологическое водо- и климаторегулирующее значение лесов этого типа более важным [23], чем источник древесины, тем более при их низкой продуктивности [5]. Это особенно актуально в условиях современных изменений климата и отмечаемом падении уровня воды в крупных реках [23; 25; 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При длительном господстве в живом напочвенном покрове высокотравья на вырубках в ельниках мшисто-травяно-папоротниковом и высокотравно-папоротниковом последующее естественное возобновление и формирование полноценных сомкнутых молодняков затруднено. На вырубках в ельниках мшисто-

травяно-папоротниковых формируются естественные низкополотные молодняки ярко выраженной не естественной полосной структуры, где темнохвойные полосы, преимущественно из сохраненного подроста предварительного возобновления, шириной 10–20 м чередуются с длительно-производными травяно-кустарниково-мелколиственными полосами по бывшим волокам шириной 5–15 м. На вырубках в ельниках высокотравно-папоротниковом формируются длительно-производные травяно-кустарниковые пустоши с куртинными редколесьями.

В целях формирования полноценных темнохвойных молодняков в ельниках мшисто-травяно-папоротниковом необходим комплекс мероприятий, включающий в себя содействие естественному возобновлению путем минерализации поверхности почвы или частичное создание лесных культур по волокам, но с обязательным последующим многократным уходом путем интенсивной рубки кустарников и мелколиственных. При крайне важном экологическом водорегулирующем значении ельников высокотравно-папоротниковых, низкой их продуктивности и слабовыраженном лесовосстановлении на вырубках, в будущем следует воздержаться от рубки древостоев в этом типе леса и не включать их в расчетную лесосеку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Бех И. А., Воробьев В. Н. Потенциальные кедровники. Проблемы кедр. Томск : СО РАН, Ин-т экологии природных комплексов – филиал Ин-та леса им. В. Н. Сукачёва. 1998. Вып. 6. 123 с.
- Глушко С. Г., Комарова Т. А., Прохоренко Н. Б. Формирование молодняков после рубок и пожаров в темнохвойных осокново-папоротниковых лесах Южного Сихотэ-Алиня // Лесоведение. 2022, № 2. С. 144–156 DOI: 10.31857/S002411482202005X
- Горчаковский П. Л. Растительный мир высокогорного Урала. М. : Наука, 1975. 281 с.
- Кедровые леса Сибири / под ред. И. В. Семечкина, Н. И. Поликарпова, А. И. Ирошниковой и др. Новосибирск : Наука, 1985. 226 с.
- Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск : Изд-во АН СССР УНЦ, 1973. 176 с.
- Коновалова М. Е. Восстановительная динамика леса на сплошных вырубках горных кедровников Южной Сибири // Лесоведение. 2015. № 3. С. 267–274.
- Размерная и возрастная структура горных кедровников Приенисейских Саян / М. Е. Коновалова, Е. Г. Коновалова, Е. Н. Цветков, Д. Д. Генов // Сибирский лесной журнал, 2020. № 3. С. 51–62. DOI: 10.15372/SJFS20200305
- Крылов Г. В., Таланцев Н. К., Козакова Н. Ф. Кедр. М. : Лесная пром-сть, 1983. 216 с.
- Мелехов И. С. Лесоведение. М. : Лесная пром-сть, 1980. 403 с.
- Обыденников В. И. Кожухов Н. И. Типы вырубков и возобновление леса. М., Лесная пром-сть, 1977. 173 с.
- Поликарпов Н. П. Комплексные исследования в горных лесах Западного Саяна // Вопросы лесоведения. Красноярск, 1970. С. 26–79.
- Поляков В. И., Семечкин И. В. Динамика и устойчивость черневых кедровников Западного Саяна // Лесоведение. 2004, № 2. С. 12–19.
- Правила ухода за лесами. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 534 от 30.07.2020. URL: <https://base.garant.ru/75083479/>.
- Смолоногов Е. П. Эколого-географическая дифференциация и динамика кедровых лесов Урала и Западно-Сибирской равнины (эколого-лесоводственные основы оптимизации хозяйства). Свердловск : РИСО УрО АН СССР, 1990. 288 с.
- Танцырев Н. В. Минерализация почвы как метод содействия естественному возобновлению кедров сибирского на вырубках // Лесное хозяйство, 2009. № 2. С. 20–21.
- Танцырев Н. В. Анализ размещения кедровой кладовой семян кедров сибирского по следам их зимнего использования // Вестник Бурятской гос. сельскохозяйств. акад. им. В. Р. Филиппова, 2020. № 3 (60). С. 117–125. DOI: 10.34655/bgsha.2020.60.3.018
- Танцырев Н. В. Начальная фаза формирования послепожарных горных кедровников на Северном Урале // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. XL. № 5. С. 395–403. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-395-403
- Шиманюк А. П. Естественное возобновление на концентрированных вырубках. М. : Изд-во АН СССР, 1955. 355 с.
- Do H. T. T., Grant J. C., Trinh N. B. et al. Recovery of tropical moist deciduous dipterocarp forest in Southern Vietnam. // Forest Ecology and Management. 2019. Vol. 433. P. 184–204.
- Du E., Tang Y. Distinct climate effects on Dahurian larch growth at an Asian temperate-boreal forest ecotone and nearby boreal sites // Forests. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 27. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13010027>
- Impacts of soil conditions and light availability on natural regeneration of Norway spruce *Picea abies* (L.) H. Karst. in low-elevation mountain forests / M. K. Dyderski, A. Gazda, M. Hachulka et al. // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75. Iss. 4, article No. 91.
- Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic forest typology as a scientific and methodological basis for environmental studies and forest management // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 609. 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012044
- Ivanova N. S. Impact of climate changes, timber harvesting, and fires on boreal forests (Example of the Ural mountains, Russia) // Sustainable Bioresource Management, New York, Apple Academic Press. 2020. P. 29–52. <https://doi.org/10.1201/9780429284229-4>
- Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics // Sustainability. 2022. Vol. 14, no. 6. P. 3384. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14063384>
- Early Performance of Tree Species in a Mountain Reforestation Experiment / R. Jandl, G. Kindermann, C. Foldal, S. Schüller, C. Bouissou // Forests. 2021. Vol. 12(2). P. 256. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020256>
- Pătru-Stupariu I., Hossu C. A., Grădinaru S. R., Nita A., Stupariu M.-S., Huzui-Stoiculescu A., Gavrilidis A.-A. A Review of Changes in Mountain Land Use and Ecosystems

tem Services: From Theory to Practice // Land. 2020. Vol. 9(9). P. 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9090336>

27. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000–2020 / Y. Zuo, Y. Li, K. He, Y. Wen // Ecol. Indic., 2022. Vol. 143. P. 109429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109429>

REFERENCES

1. Bekh I. A., Vorob'yev V. N. Potentsial'nye kedrovniki. Problemy kedra. Tomsk : SO RAN, Institut ekologii prirodnikh kompleksov – filial instituta lesa im. V. N. Sukachyova. 1998, vyp. 6. 123 s.

2. Glushko S. G., Komarova T. A., Prokhorenko N. B. Formirovanie molodnyakov posle rubok i pozharov v tyomnokhvoynykh osokovo-paportnikovyykh lesakh Yuzhnogo Sikhote-Alinya. Lesovedenie. 2022, № 2. S. 144–156.

3. Gorchakovskiy P. L. Rastitel'nyy mir vysokogor-nogo Urala. Moscow : Nauka, 1975, 281 s.

4. Kedrovye lesa Sibiri / I. V. Semechkin, N. I. Polikarpov, A. I. Iroshnikov i dr. Novosibirsk : Nauka, 1985. 226 s.

5. Kolesnikov B. P., Zubareva R. S., Smolonogov E. P. Lesorastitel'nye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoy oblasti. Sverdlovsk : AN SSSR UNTs, 1973, 176 s.

6. Konovalova M. E. Vosstanovitel'naya dinamika lesa na sploshnykh vyrubkakh gornyykh kedrovnikov Yuzhnoj Sibiri. Lesovedenie. 2015. № 3. S. 267–274

7. Razmernaya i vozrastnaya struktura gornyykh kedrovnikov Prienisejskikh Sayan / M. E. Konovalova, E. G. Konovalova, E. N. Tsvetkov, D. D. Genov // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2020. № 3. S. 51–52.

8. Krylov G. V., Talantsev N. K., Kozakova N. F. Kedr. Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1983. 216 s.

9. Melekhov I. S. Lesovedenie. Moscow. Lesnaya promyshlennost', 1980. 403 s.

10. Obydennikov V. I., Kozhukhov N. I. Tipy vyrubok i vozobnovlenie lesa. Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1977. 173 s.

11. Polikarpov N. P. Kompleksnye issledovaniya v gornyykh lesakh Zapadnogo Sayana. Voprosy lesovedeniya. Krasnoyarsk, 1970. S. 26–79.

12. Polyakov V. I., Semechkin I. V. Dinamika i ustoychivost' chernykh kedrovnikov Zapadnogo Sayana. Lesovedenie. 2004, № 2, s. 12–19.

13. Pravila ukhoda za lesami. Prikaz ministerstva prirodnikh resursov i ekologii Rossijskoj Federatsyi. № 534 ot 30.07.2020. URL: <https://base.garant.ru/75083479/>.

14. Smolonogov E. P. Ekologo-geograficheskaya differentsiatsiya i dinamika kedrovyykh lesov Urala i Zapadno-Sibirskoy ravniny (ekologo-lesovodstvennye osnovy optimizatsii khozyajstva). Sverdlovsk, RISO UrO AN SSSR, 1990. 288 s.

15. Tantsyrev N. V. Mineralizatsiya pochvy kak metod sodejstviya estestvennomu vozobnovleniyu kedra sibirskogo na vyrubkakh. Lesnoe khozyajstvo. 2009, № 2. S. 20–21.

16. Tantsyrev N. V. Analiz razmeshcheniya kedrovkoj kladovok semyan kedra sibirskogo po sledam ikh zimnego ispol'zovaniya. Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii im. V. R. Filippova. 2020, № 3(60) s. 117–125. DOI: 10.34655/bgsha.2020.60.3.018

17. Tantsyrev N. V. Nachalnaya faza formirovaniya poslepozharnykh gornyykh kedrovnikov na Severnom Urale. Khvojnye borealnoj zony. 2022, t. XL, № 5. S. 395–403. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-395-403

18. Shimanyuk A. P. Estestvennoe vozobnovlenie na kontsentrirrovannykh vyrubkakh. Moscow : AN SSSR, 1955. 355 s.

19. Do H. T. T., Grant J. C., Trinh N. B. et al. Recovery of tropical moist deciduous dipterocarp forest in Southern Vietnam // Forest Ecology and Management. 2019, Vol. 433, p. 184–204.

20. Du E., Tang Y. Distinct climate effects on Dahurian larch growth at an Asian temperate-boreal forest ecotone and nearby boreal sites // Forests, 2022, v. 13, no. 1, p. 27. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13010027>

21. Dyderski M. K., Gazda A., Hachułka M. et al. Impacts of soil conditions and light availability on natural regeneration of Norway spruce *Picea abies* (L.) H. Karst. in low-elevation mountain forests // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75. Iss. 4, article No. 91.

22. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic forest typology as a scientific and methodological basis for environmental studies and forest management // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 609. 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012044

23. Ivanova N. S. Impact of climate changes, timber harvesting, and fires on boreal forests (Example of the Ural mountains, Russia) // Sustainable Bioresource Management, New York, Apple Academic Press. 2020. P. 29–52. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429284229-4>

24. Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics // Sustainability, 2022, vol. 14, no. 6, p. 3384. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14063384>

25. Jandl R., Kindermann G., Foldal C., Schüller S., Bouissou C. Early Performance of Tree Species in a Mountain Reforestation Experiment // Forests. 2021. Vol. 12(2). P. 256. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020256>

26. Pătru-Stupariu I., Hossu C. A., Grădinaru S. R., Nita A., Stupariu M-S, Huzui-Stoiculescu A., Gavrilidis A-A. A Review of Changes in Mountain Land Use and Ecosystem Services: From Theory to Practice // Land. 2020. Vol. 9(9). P. 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9090336>

27. Zuo Y., Li Y., He K., Wen Y. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000–2020 // Ecol. Indic., 2022, vol. 143, p. 109429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109429>

© Танцырев Н. В., 2026

ЕСТЕСТВЕННОЕ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ НА НАРУШЕННЫХ ЛЕСНЫХ УЧАСТКАХ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЛЕСА И ТИПАХ ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПОДЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

А. А. Камашев¹, В. А. Савченкова¹, М. И. Хорькова²

¹Мытищинский филиал МГТУ им Н. Э. Баумана

Российская Федерация, Московская область, 141005, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1

E-mail: aakamashev@rambler.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства

Российская Федерация, Московская область, 141202, г. Пушкино, ул. Институтская, 15

Аннотация. Целью исследования является оценка структуры нарушенных лесных участков подзоны северной тайги посредством кластерного анализа для сегментации нарушенной площади на однородные лесорастительные выделы. Объект исследования – подрост светлохвойных лесообразующих пород на участке площадью 147,87 га, нарушенном при строительстве площадки шламохранилища в Сосногорском лесничестве Республики Коми. Натурное обследование проведено выборочным методом: заложено по 30 пробных площадок (10×10 м) в каждом из четырёх типов лесорастительных условий с учётом трёх категорий удалённости от прилегающего лесного насаждения (до 50 м, 51–100 м, более 100 м). Установлено, что после вырубki ельников долгомошников (55,8 %), сосняков сфагновых (25,3 %) и сосняков долгомошных (18,3 %) сформировались сосняки бруснично-зеленомошно-лишайниковые (66,2 %), кустарничково-долгомошные (18,8 %), голубично-зеленомошно-сфагновые (14,7 %) и осоково-чернично-долгомошные (0,3 %). Выявлено, что на расстоянии до 50 м от стены леса густота естественного возобновления достигает 3,9 тыс. шт./га, на расстоянии 51–100 м – до 2,2 тыс. шт./га, а далее 100 м снижается до 0,6 тыс. шт./га. Кластеризация методом KMeans и иерархическая кластеризация методом Уорда позволили выделить четыре кластера, различающихся по продуктивности: наиболее продуктивный кластер (кластер 1) характеризуется наивысшими значениями густоты по всем типам лесорастительных условий (СБЗЛ – 102,5, СКД – 54,5, СГЗС – 63,3, СОЧД – 59,8 шт./га). Корреляционный анализ показал наиболее тесную положительную связь между СКД и СГЗС ($r = 0,64$). На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости проведения мероприятий по искусственному лесовосстановлению в сосняках долгомошных, сфагновых и черничных при удалённости участков от прилегающего насаждения более 50 м.

Ключевые слова: лесорастительные условия; лесной участок; таёжная зона; кластерный анализ; корреляция; сегментация; естественное лесовосстановление; северная тайга.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 107–119

NATURAL REFORESTATION IN DISTURBED FOREST AREAS IN VARIOUS TYPES OF FOREST AND TYPES OF FOREST-GROWING CONDITIONS OF THE NORTHERN TAIGA SUBZONE

A. A. Kamashev¹, V. A. Savchenkova¹, M. I. Khorkova²

¹Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University

1, 1st Institutskaya str., Mytishchi, 141005, Moscow region, Russian Federation

E-mail: aakamashev@rambler.ru

²All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization

15, Institutskaya str., Pushkino, 141202, Moscow region, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is to assess the structure of disturbed forest areas in the northern taiga subzone using cluster analysis to segment the disturbed area into homogeneous forest areas. The object of the study is the undergrowth of light coniferous forest-forming species in an area of 147.87 hectares that was disturbed during the construction of a slurry storage facility in the Sosnogorsk Forestry District of the Komi Republic. The field survey was conducted using a selective method: 30 test sites (10×10 m) were established in each of the four types of forest conditions, taking into account three categories of distance from the adjacent forest plantation (up to 50 m, 51–100 m, and more than 100 m). It was found that after the cutting of spruce-long-moss forests (55.8 %), pine-sphagnum forests (25.3 %), and pine-long-moss forests (18.3 %), lingonberry-green-moss-lichen forests (66.2 %), shrub-long-moss

forests (18.8 %), blueberry-green-sphagnum forests (14.7 %), and sedge-blueberry-long-moss forests (0.3 %). It was found that at a distance of up to 50 m from the forest wall, the density of natural regeneration reaches 3.9 thousand plants per hectare, at a distance of 51-100 m, it reaches 2.2 thousand plants per hectare, and beyond 100 m, it decreases to 0.6 thousand plants per hectare. KMeans clustering and hierarchical Ward clustering allowed us to identify four clusters that differ in productivity: the most productive cluster (cluster 1) has the highest values of density in all types of forest conditions (102.5, 54.5, 63.3, and 59.8 units/ha, respectively). Correlation analysis showed the closest positive relationship between SCD and SGS ($r = 0.64$). Based on the results obtained, it was concluded that it is necessary to carry out measures for artificial reforestation in long-moss, sphagnum, and blueberry pine forests when the distance between the sites and the adjacent plantation is more than 50 m.

Keywords: Forest conditions; forest area; taiga zone; cluster; correlation; segmentation.

ВВЕДЕНИЕ. В настоящее время в современных экономических условиях восстановление нарушенных лесных участков имеет большое значение вследствие прямого воздействия человека. Вместе с тем функционирование и развитие промышленного производства не всегда способствует организации рационального землепользования [Лиханова и др., 2014]. Речь идет о видах хозяйственной деятельности, связанных с нарушением земной поверхности. В результате такой деятельности образуются большие массивы нарушенных земель, к которым относятся земли, утратившие свою хозяйственную ценность в связи с изменением почвенного и растительного покрова, гидрологического режима, образование техногенного рельефа в результате производственной деятельности промышленного назначения. В связи с чем особую актуальность для таежных лесов, которые более чувствительны к любому воздействию, приобретает повышение эффективности мероприятий по лесовосстановлению в целях повышения продуктивности молодняков, биологического потенциала восстановленных лесных участков и сокращения срока восстановления лесных ресурсов [Брыжко, 2017; Зарипов и др., 2020; Лиханова, 2004; Копцева и др., 2013]. В условиях таежной зоны естественное возобновление имеет определенное преимущество над искусственным лесовосстановлением, особенно в тех случаях, когда речь идет об отдельных видах нарушенных лесных участков и типах лесорастительных условиях: устойчивость деревьев к неблагоприятным факторам в конкретных лесорастительных условиях, более конкурентоспособны по сравнению с лесными культурами и требует меньших ресурсов, чем искусственное. Однако многолетние наблюдения, проводимые авторами, позволяют предположить, что не во всех условиях таежной зоны целесообразно отдавать предпочтение естественному возобновлению лесов [Башегуров и др., 2020; Нгуен Ван Зинь и др., 2018; Сунгурова и др., 2014].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с изложенным возникла необходимость формирования цели исследования, а именно, оценка структуры нарушенных участков посредством кластерного анализа для сегментации всей нарушенной площади на однородные части, вновь сформированные лесорастительные выделы. Соответственно задача состоит в изучении особенностей возобновления основных лесобразующих пород на нарушенных землях лесного фонда в различных типах лесорастительных

условиях подзоны северной тайги, включая анализ его распределения в зависимости от расстояния до прилегающего к молоднякам насаждения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проводилось на лесном участке, нарушенном при промышленном производстве, а именно, при строительстве площадки шламохранилища (147,87 га) планирующего использовать при складировании отходов производства – красного шлама, который образуется при переработке боксита. Территория района исследования относится к таежной лесорастительной зоне северо-таежного лесного района европейской части Российской Федерации [Лесохозяйственный регламент..., 2017; Мартыненко и др., 2006].

Климат в районе исследований формируется под влиянием арктических и полярных воздушных масс, с весьма развитой циклонической деятельностью. В холодный период года территория испытывает наибольшее влияние Атлантики. При продвижении на восток и северо-восток влияние Атлантики заметно ослабевает, обуславливая понижение температуры воздуха в указанном направлении. Среднегодовая температура воздуха в разные годы понижалась от $-3,8$ до $+2,5$ °C. В данных климатических условиях района исследования сформирован таежный лесной район.

Согласно данным материалов лесоустройства и государственного лесного реестра на территории района исследования нарушению подверглись следующие типы леса: ельники долгомошники (55,8 %), сосняки сфагновые (25,3 %), сосняки долгомошные (18,3 %) и сосняки брусничники (0,6 %). Для них характерны группы типов почв: песчаные и супесчаные, иллювиально-железисто-гумусовые на песке и супеси; торфянисто-подзолистые супесчаные и песчаные на глееватых суглинках; торфяно-глеевые, торфяно-верховые на оглеенных валунных суглинках и торфянисто-подзолистые глееватые супесчаные, суглинистые на суглинках и глинах.

В ходе натурного обследования установлено, после вырубki указанных типов леса образуются сосняки бруснично-зеленомошно-лишайниковые (далее – С.бр.-зел.-лиш.) 66,2 %, сосняки кустарничково-долгомошные (далее – С.куст.-дм.) 18,8 %, сосняки голубично-зеленомошно-сфагновые (далее – С.голуб.-зел.-сф.) 14,7 % и сосняки осоково-чернично-долгомошные (далее – С.оск.-чер.-дм.) 0,3 % от общей площади нарушенного участка.

Натурное обследование проводилось выборочным методом, при котором определялись количественные (количество деревьев основных пород, тыс.шт/га, высота) и качественные (древесная порода, состав насаждения, полнота) характеристики обследуемого участка, которые распространялись на весь лесной участок. Принимая во внимание актуальность разработки практических рекомендаций в части целесообразного выбора способа лесовосстановления нарушенных участков, в рамках настоящего исследования принято решение придерживаться методики закладки пробных площадок утвержденной Инструкцией по сохранению подростов..., 1983. С учетом удаленности от границы прилегающего к исследуемому участку лесного насаждения (категории расстояния до 50 м, от 51 до 100 м и более 100 м определены на основании экспериментальных данных, приведенных в табл. 2) заложено по 30 пробных площадок в каждом типе лесорастительных условий.

Пробные площадки располагались на равном расстоянии друг от друга, имели квадратную форму размером 10×10 м и составляли площадь 100 м² каждая. При этом весь подрост и самосев делился по группам высот (до 0,2 м; 0,21–0,5 м; 0,6–1,0 м; 1,1–1,5 м; более 1,5 м). Таким образом, общая площадь заложённых пробных площадок составляет 3,6 га, что составляет 2,4 % от общей площади исследуемого участка [Об утверждении Порядка отнесения земель..., 2019].

Объектом исследования является подрост светлых хвойных лесобразующих пород на нарушенных лесных участках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа таксационных описаний исследуемого лесного участка до рубки произрастали хвойные и мягколиственные насаждения в брусничных, долгомошных, сфагновых и травяно-болотных типах леса. Среди указанных типов леса на брусничные и травяно-болотные совокупно приходится лишь 0,9 %. Принимая во внимание незначительный (менее 1 %) объем указанных типов леса в структуре нарушенных участков, в рамках настоящего исследования принято решение их не учитывать. Средние таксационные показатели насаждений лесного участка до рубки приведены в табл. 1.

Со всей территории нарушенных участков снят плодородный слой почвы и сдвинут к периметру участка. В дальнейшем лесной участок по целевому назначению не использовался и был возвращен по истечении 12 лет в лесной фонд после естественного зарастания хвойными и мягколиственными породами деревьев [Постановление..., 2018; Правила лесоразведения..., 2021].

Данные о количественных и качественных показателях восстанавливаемого насаждения, в зависимости от удаленности от источника обсеменения, приводятся в табл. 2.

Таблица 1

Средние таксационные показатели насаждений лесного участка до рубки

Состав	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Бони- тет	Полно-га	Средний запас, м³/га			
						молод- няки	средне- возрас- тные	приспе- вающие	спелые и пере- стойные
Хозяйство – хвойное									
8С2Б+Е	70	12	9	5А	0.5	12	80	–	65
7Е1С2Б	120	14	11	5А	0.5	5	–	–	80
Хозяйство – мягколиственное									
8Б2Е+С	20	4	3	5А	0.6	5	–	–	–

Таблица 2

Характеристика молодняка, сформировавшегося после рубки

Тип лесорастительных условий	Коэффициент состава	Удаленность от прилегающего лесного насаждения, м	Полнота	Количество экземпляров всего (числитель), в т.ч. главной породы (знаменатель) шт/га				
				до 0,2 м	0,21–0,5 м	0,6–1,0 м	1,1–1,5 м	Более 1,5 м
С.бр.-зел.-лиш.	8С1Б1Ос ед.Е ед.Л	до 50 м	0,9	30 16	133 63	383 233	1327 940	3159 2706
С.куст.-дм.	7С3Б+Ос	до 50 м	0,6	–	317 220	600 350	603 427	333 207
С.голуб.-зел.-сф.	7С3Б ед.Е	до 50 м	0,4	–	137 100	340 250	613 383	560 413
С.оск.-чер.-дм.	6С2Е2Б+Ос ед.Л	до 50 м	0,6	30 30	193 180	377 310	583 430	1013 677
С.бр.-зел.-лиш.	6С2Б2Ос ед.Е ед.Л	от 51 до 100 м	0,7	74 44	203 80	454 234	1233 743	1609 1136
С.куст.-дм.	6С4Б ед.Ос	от 51 до 100 м	0,4	–	243 90	480 247	500 320	290 207

Окончание табл. 2

Тип лесорастительных условий	Коэффициент состава	Удаленность от прилегающего лесного насаждения, м	Полнота	Количество экземпляров всего (числитель), в т.ч. главной породы (знаменатель) шт/га				
				до 0,2 м	0,21–0,5 м	0,6–1,0 м	1,1–1,5 м	Более 1,5 м
С.голуб.-зел.-сф.	6СЗБ1Ос ед.Е	от 51 до 100 м	0,3	–	170 83	353 190	397 213	403 260
С.оск.-чер.-дм.	5С1ЕЗБ1Ос	от 51 до 100 м	0,4	17 17	137 107	266 166	516 290	814 514
С.бр.-зел.-лиш.	3СЗБ4Ос ед.Е ед.Л	более 100 м	0,4	180 40	260 63	443 170	396 146	370 163
С.куст.-дм.	5С5Б	от 51 до 100 м	0,2	–	350 137	407 197	246 143	100 53
С.голуб.-зел.-сф.	6БЗС1Ос ед.Е	от 51 до 100 м	0,1	–	196 73	330 113	306 123	116 33
С.оск.-чер.-дм.	4СЗБЗОс+Е	от 51 до 100 м	0,2	60 60	194 120	337 137	556 170	130 60

Сведения из табл. 2 наглядно показывают, что естественное лесовосстановление на нарушенном лесном участке протекает крайне медленно, неравномерно и имеет существенное различие по густоте. При этом в составе хвойного молодняка преобладает сосна и не в значительном количестве присутствует ель и лиственница. Среди мягколиственных доминирует береза и осина [Морозов и др., 2021, Осипенко и др., 2021].

По внешнему периметру исследуемого участка: на расстоянии до 50 м в глубину отмечено наличие достаточного естественного возобновления основных лесобразующих пород в количестве до 3.9 тыс.шт. на 1 га и от 51 до 100 м – до 2.2 тыс. шт. на 1 га. Состояние его удовлетворительное. Густое охвоение, зеленая окраска хвои, заметно выраженная мутовчатость, конусообразная симметричная средней густоты крона протяженностью 1/3 ствола в группах и 1/2 ствола – при одиночном размещении, прирост по высоте за последние 3–5 лет не утрачен, прирост вершинного побега не менее прироста боковых ветвей половины кроны, прямые неповрежденные стволы, мелкощуччатая кора [Об утверждении Правил лесовосстановления..., 2021].

Однако следует заметить, что далее 100 метров от прилегающего к нарушенному участку насаждения (в глубину участка) отмечено недостаточное количество подроста и молодняка – до 0,6 тыс.шт. на 1 га, во многих случаях его отсутствие. Необходимо отметить, что данные показатели являются средними для всех типов лесорастительных условий, так как в каждом отдельном случае они будут зависеть от многих факторов, в том числе почвенных, гидрологических, а также положение участка в рельефе [Борко, 2012].

Учитывая изложенное в целях разработки рекомендаций, повышающих эффективность лесовосстановления нарушенных участков, принято решение провести анализ структуры нарушенных участков посредством кластерного анализа для сегментации всей нарушенной площади на однородные части – лесорастительные выделы.

В ходе кластерного анализа экспериментальные данные объединены по указанным категориям, значе-

ния суммированы в каждой группе. При этом удалены пропущенные нулевые значения.

Кластеризация проведена методом KMeans с тремя кластерами. Создан Pairplot с цветовой маркировкой по кластерам [Kaufman, 2009].

В целях детальной сегментации экспериментальных данных, полученных на постоянных пробных площадях и загруженных из файла TREE2.xlsx, проведено их отфильтровывание по типам лесорастительных условий, получен график для категорий лесорастительных условий сосняк кустарниково-долгомошный (далее – СКД), сосняк голубично-зеленомошно-сфагновый (далее – СГЗС), сосняк бруснично-зеленомошно-лишайниковый (далее – СБЗЛ), сосняк осоково-чернично-долгомошный (далее – СОЧД) (рис. 1). Проведенная сегментация позволяет лучше «увидеть» скрытые подгруппы внутри данных.

На рис. 1 можно видеть, что в ходе сегментации экспериментальных данных сформировано 4 основных кластера родственных элементов статистической совокупности: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД).

Наглядным результатом сегментации всей нарушенной площади на однородные части – лесорастительные выделы, является дендрограмма, которая построена с использованием метода Ward, минимизирующего разброс внутри кластеров.

На рис. 2 приведена иерархия кластеров, объединяющая похожие объекты на разных уровнях. Построения дендрограммы проведено на основании суммированных экспериментальных данных на постоянных пробных площадках по 4 категориям: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД [Bholowalia, 2014].

На дендрограмме применено условное обозначение, приведенное в табл. 3.

В ходе построения иерархии кластеров суммированы экспериментальные данные по 4 категориям: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД.

Сегментация нарушенных участков проведена с учетом следующих оценочных критериев: тип лесорастительных условий, количество жизнеспособных экземпляров древесной растительности на 1 га, удаленность от прилегающего насаждения и высоты.

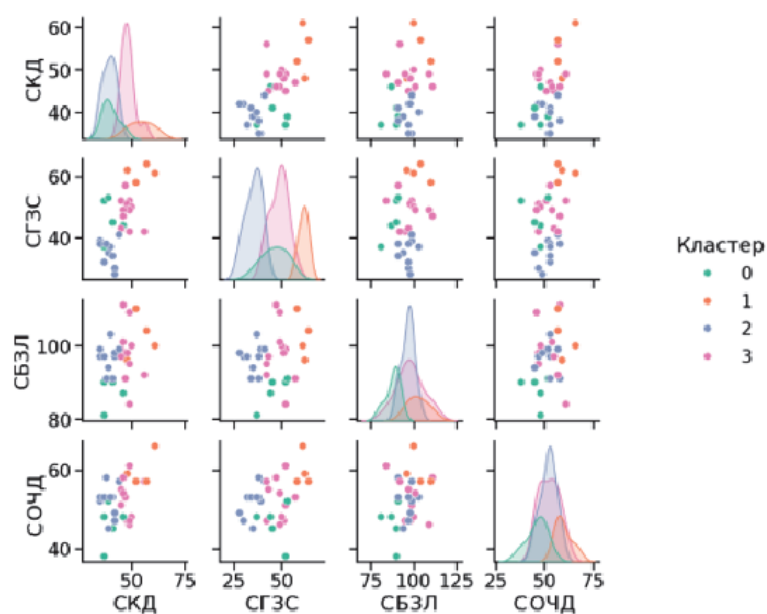


Рис. 1. Распределение значений по типам лесорастительных условий (категориям)

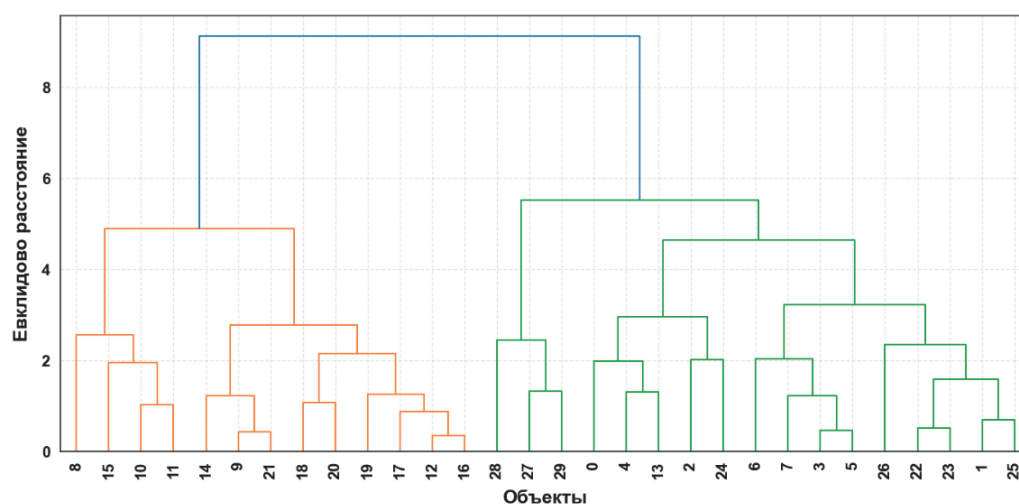


Рис. 2. Дендрограмма: иерархическая кластеризация типов лесовосстановления

Таблица 3

Условные обозначения дендрограммы

№ п/п	Объект	СКД	СГЭС	СБЗЛ	СОЧД	Кластер
0	0	48	62	96	59	1
1	1	45	52	99	51	3
2	2	49	52	84	61	3
3	3	48	51	98	47	3
4	4	47	57	91	53	3
5	5	50	50	100	48	3
6	6	49	49	109	46	3
7	7	49	42	95	47	3
8	8	37	52	90	38	0
9	9	42	30	97	47	2
10	10	46	44	87	48	0
11	11	41	45	90	45	0
12	12	35	39	99	52	2
13	13	39	53	91	52	0
14	14	39	35	94	45	2
15	15	37	37	81	48	0
16	16	35	38	97	53	2
17	17	37	32	97	53	2

Окончание табл. 3

№ п/п	Объект	СКД	СГЗС	СБЗЛ	СОЧД	Кластер
18	18	41	34	91	53	2
19	19	40	37	103	53	2
20	20	38	38	91	58	2
21	21	42	28	98	49	2
22	22	45	43	97	55	3
23	23	44	41	99	57	2
24	24	56	42	92	57	3
25	25	46	49	101	54	3
26	26	46	47	111	58	3
27	27	57	64	104	57	1
28	28	61	61	100	66	1
29	29	52	58	110	57	1

Кластер	Объект
0	[8, 10, 11, 13, 15]
1	[0, 27, 28, 29]
2	[9, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23]
3	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 22, 24, 25, 26]

Дендрограмма демонстрирует группировку схожих объектов в кластеры по мере увеличения допустимого расстояния между ними (например, евклидово расстояние по оси Y) в исследуемых типах лесорастительных условий:

Оранжевая группа объединяет участки с определенным набором лесорастительных условий характеризующихся, как правило, умеренными (1,7 шт/га) значениями СГЗС и СБЗЛ, а также низкими (1,1 шт/га) или средними (1,3 шт/га) значениями СКД и СОЧД.

Зеленая группа включает участки с (более 2,0 шт/га) значениями СГЗС и СОЧД, а также умеренными (2,0 шт/га) высокими (более 2,0 шт/га) СБЗЛ и СКД. Это участки с высокой густотой молодняка (более 2,0 шт/га). Количество деревьев основных пород в количестве 2,0 шт/га принято за основу в связи с требованиями (критериями) к молоднякам, площади которых подлежат отнесению к землям, на которых расположены леса утвержденные приказом Минприроды России от 29.12.2021 г. № 1024. Таким образом, зеленая группа отражает участки с более интенсивными и благоприятными условиями для роста и развития молодого поколения основных лесобразующих пород.

В целях не допустить погрешность из-за влияния разных единиц измерения, экспериментальные данные масштабированы (стандартизированы), т. е. критерии преобразованы так, чтобы они имели сравнимую шкалу. Это важно, потому что в многомерных алгоритмах (например, кластеризация, Principal Component Analysis – метод основных компонент, применяемый для снижения размерности данных и выделения главных направлений вариации, признаки с большими значениями могут искусственно «перетягивать» расстояния и влиять на результат. В связи с этим все исследуемые параметры (СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД) были преобразованы в единую шкалу, в которой каждый признак имеет среднее значение, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице.

Без стандартизации признаки с большими абсолютными значениями (например, десятки или сотни)

могут искусственно «перетягивать» евклидовы расстояния, тем самым искажая результат: один параметр будет доминировать над остальными, даже если его влияние объективно меньше. Поэтому стандартизация обеспечивает сравнимость параметров, корректность расстояний и объективность полученных кластеров.

Это нужно:

- чтобы все признаки влияли на анализ одинаково;
- чтобы расстояния между объектами (в дендрограмме, k – средних и т. д.) были честными;
- чтобы результаты кластеризации отражали суть, а не просто масштаб чисел.

Существует два основных подхода и критерия при определении оптимального количества кластеров:

1. Визуальный анализ дендрограммы. Проводя горизонтальную линию на дендрограмме, смотрим, на каком уровне происходит резкое объединение двух больших групп. Оптимальным «срезом» является – чуть ниже этого уровня. Это аналог метода локтя, но только для иерархии.

2. Метод локтя (Elbow method) (для KMeans и других метрик). Строится график зависимости инерции (WSS) от числа кластеров. Ищем «локоть» – точку, после которой добавление кластеров почти не уменьшает ошибку.

На рис. 3 показано распределение значений по категориям (Boxplot).

Наиболее выраженными отличиями сильнее всех выделяется кластер 1, для которого наивысшие значения по всем показателям. Особенно заметно по СКД (54,5), СГЗС (63,3), СБЗЛ (102,5) и СОЧД (59,8). Эта группа отражает наиболее продуктивные и развитые лесорастительные условия, благоприятные для роста древостоя.

Наименее выраженным является кластер 2 характеризующийся наименьшими значениями СГЗС (35,2) и СКД (39,3), умеренными значениями СБЗЛ (96,6) и нормальными показателями СОЧД (52,0). Эта группа с редким и слабо выраженным зарастанием древостоя, характерным для начальной стадии восстановления.

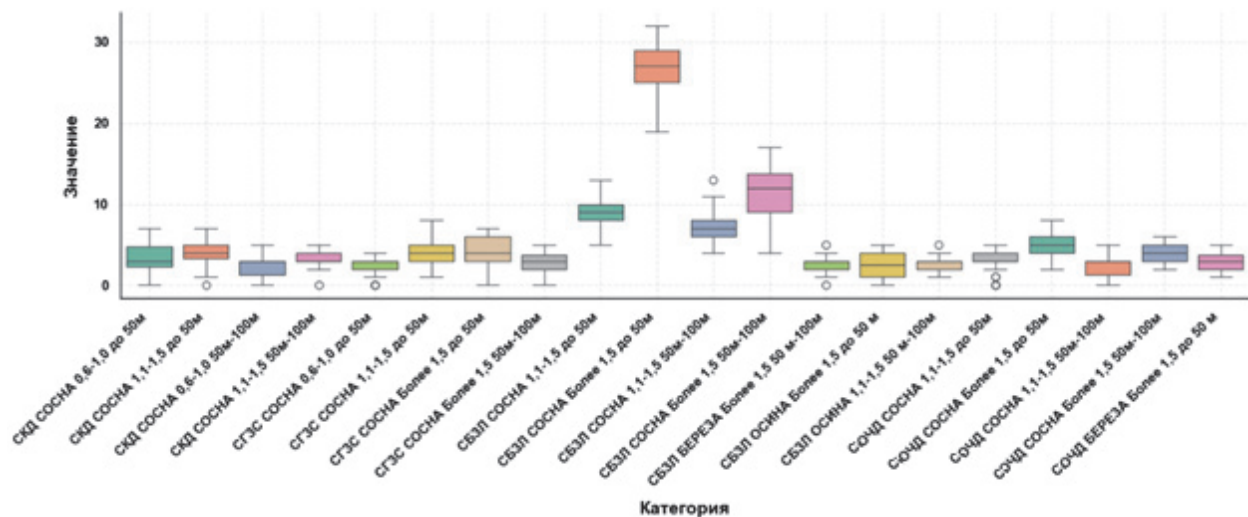


Рис. 3. Распределение значений по категориям (Boxplot)

Сходными являются кластеры 2 и 0 так как очень похожи по СКД (около 40), однако в кластере 0 выше СГЗС (46,2 против 35,2). Это характеризуется разным стадиям развития на схожих участках.

Кроме того, сходным и является кластер 3 и 1. Оба довольно «сильные» по значениям, но в кластере 3 СКД = 48,2, тогда как в кластере 1 = 54,5. У 3 кластера СГЗС = 48,5, а кластере 1 = 61,3. Кластер 3 – умеренно развитый, немного уступает кластеру 1, возможно, следующая стадия после 1 или разные породы либо среда.

Кластер 1 значительно отличается от всех остальных, объединяя участки с наиболее выраженными лесорастительными условиями: высоким СКД, СГЗС и СОЧД. В то время как кластеры 0 и 2 представляют собой менее развитые участки, схожие по СКД, но различающиеся по плотности зарастания (СГЗС). Кластер 3 занимает промежуточное положение и, несмотря на близость к кластеру 1, остаётся отдельной группой благодаря немного сниженным значениям СГЗС и СКД. Это подчёркивает чувствительность метода к комплексному профилю признаков.

Учитывая изложенное, целесообразно провести анализ состояния молодого поколения леса естест-

венного происхождения в зависимости от расстояния до ближайшего лесного участка, на котором произрастает приспевающее и спелое насаждение в состоянии репродукции (далее – расстояние до семенников).

На рис. 4, 5, 6 отражено сравнение пород по расстояниям.

Графики на рис. 4, 5, 6 показывают количество деревьев по породам для каждой категории (СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД). На котором видно, какие породы доминируют в разных диапазонах. Вертикальные линии на столбцах – это показывают ошибки (стандартное отклонение или доверительный интервал), которые Seaborn строит по умолчанию при использовании sns.barplot.

Они показывают разброс данных – насколько сильно изменяются значения внутри категории. Чем длиннее вертикальная линия, тем больше разброс (данные сильно варьируются). Если вертикальная линия короткая, значит, значения внутри категории стабильны.

На рис. 7, 8, 9, 10 показано распределение деревьев по породам и расстоянию. Категория: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД.

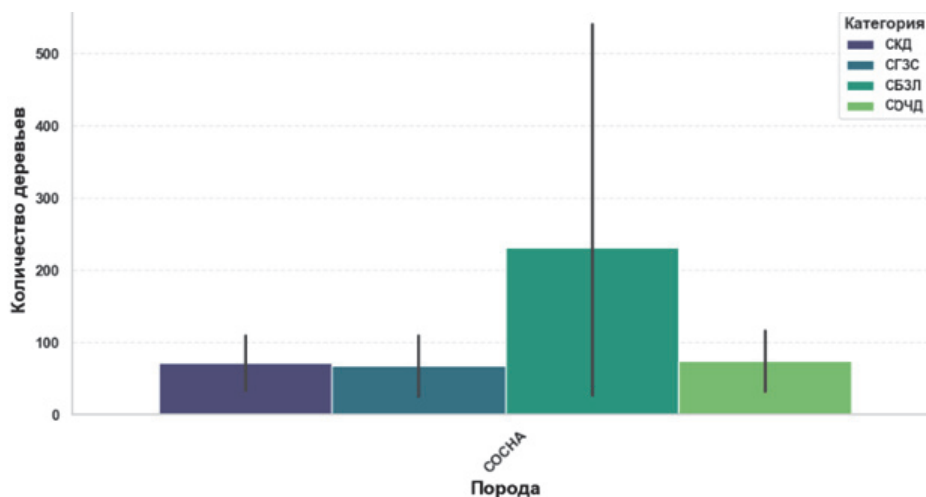


Рис. 4. Сравнение пород по расстояниям (до 50 м)

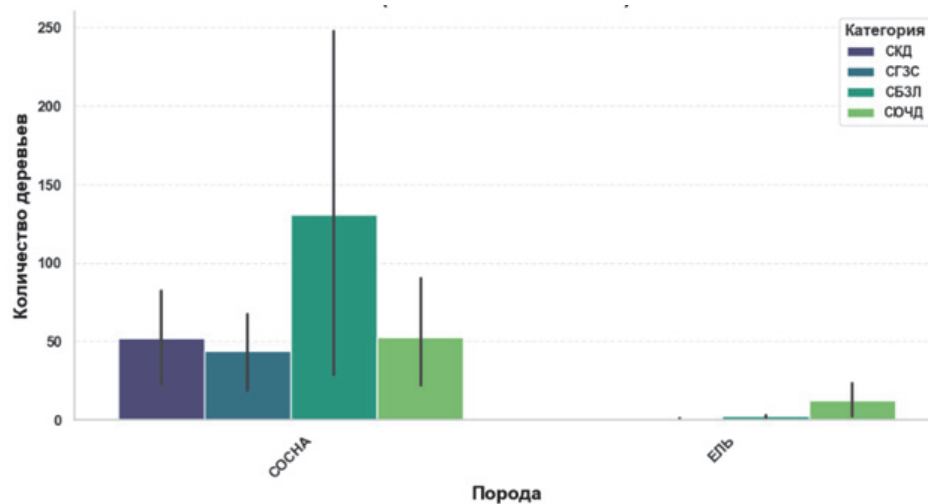


Рис. 5. Сравнение пород по расстояниям (от 50 до 100 м)

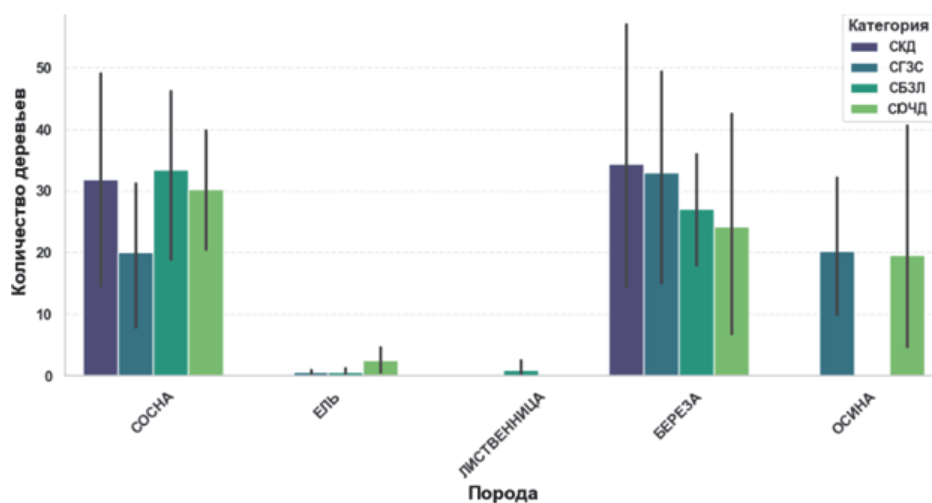


Рис. 6. Сравнение пород по расстояниям (более 100 м)

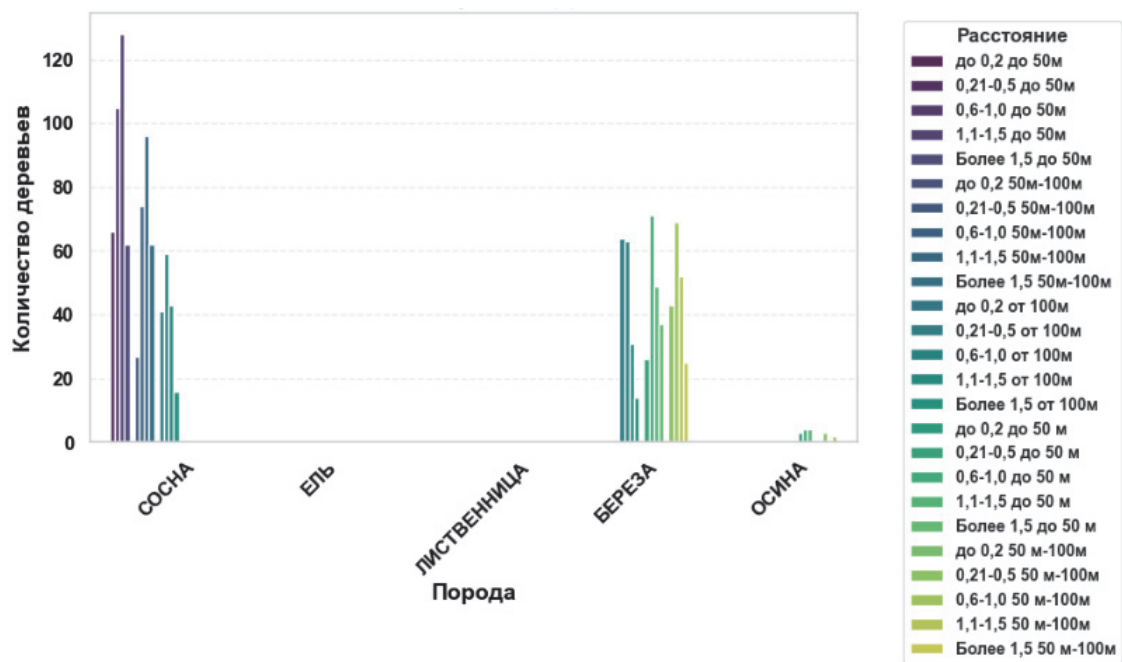
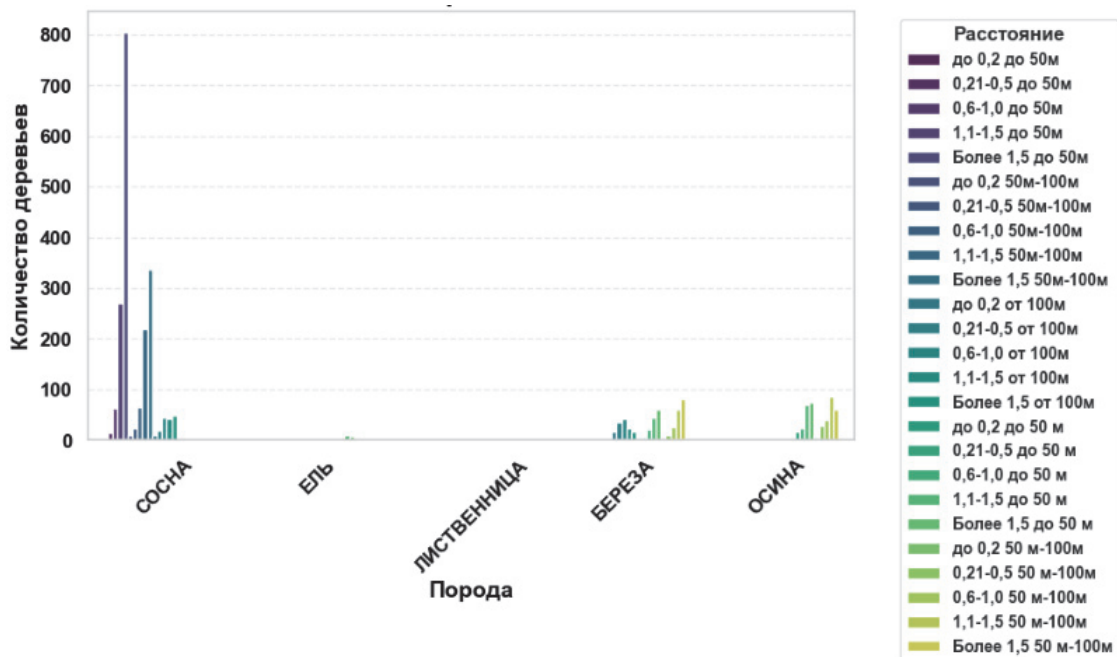
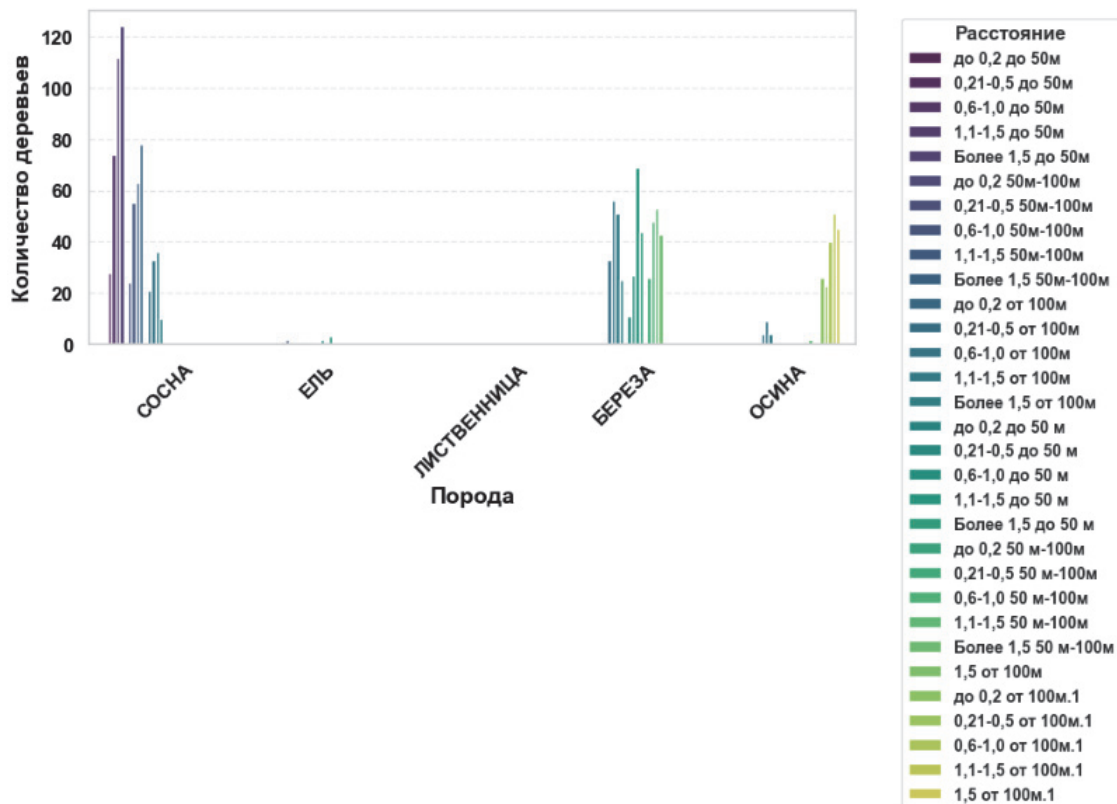


Рис. 7. Распределение деревьев по породам и расстоянию. Категория: СКД



Ось Y отображает количество деревьев, зафиксированных для каждого типа лесорастительных условий в определённой категории и породе:

– ось X – сочетания вида ТЛУ + порода + расстояние (пример: СКД СОСНА 0,6–1,0 до 50 м);

– ось Y – сколько деревьев было зафиксировано в этой подкатегории.

По оси X представлены конкретные сочетания породы и расстояния (до 50 м, 50–100 м и т. д.), а по оси Y – количество учтённых деревьев в данной категории.

На рис. 7, 8, 9, 10 можно видеть степень разброса экспериментальных данных по различным категориям. Чем больше диапазон разброса (ширина «ящика» и длина «усов»), тем выше вариативность признака в данной категории, что может свидетельствовать о неоднородности условий, сильном влиянии внешних факторов. Исследование указанных факторов не входит в задачу настоящей работы. Чем меньше разброс, тем более стабильны и однородны значения признака (густота, расстояние до семенников, высот-

ная группа подроста) в данной категории, что может указывать на одинаковую природу наблюдаемых объектов, устойчивость условий среды или стандартные методы формирования выборки. В частности, лесные участки координально отличаются от земельных участков на иных категориях земли тем, что на них имеются в наличии переходных условий между определенными и принятыми к рассмотрению ранее в работе 4-мя группами лесорастительных условий (СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД). Это позволяет дополнить схемы распределения площадей сосновых насаждений подвергшихся вырубке в результате разработки карьеров, строительства скважин и производственных площадок за 20-летний период, опубликованные в статье [Оценка восстановления нарушенных лесных

участков подзоны северной тайги], являющихся промежуточными этапами под названием «переходные условия».

На рис. 11 изображена корреляционная связь между установленными в рамках настоящего исследования группами лесорастительных условий (СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД).

Таблица на рис. 12 показывает, насколько два признака связаны между собой в каждой ячейке. Значения лежат в диапазоне от -1 до 1 : $1,0$ – идеальная положительная связь; $0,0$ – отсутствует линейная связь; $-1,0$ – идеальная отрицательная связь.

В табл. 4 дано краткое описание признаков с учетом коэффициента СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД.

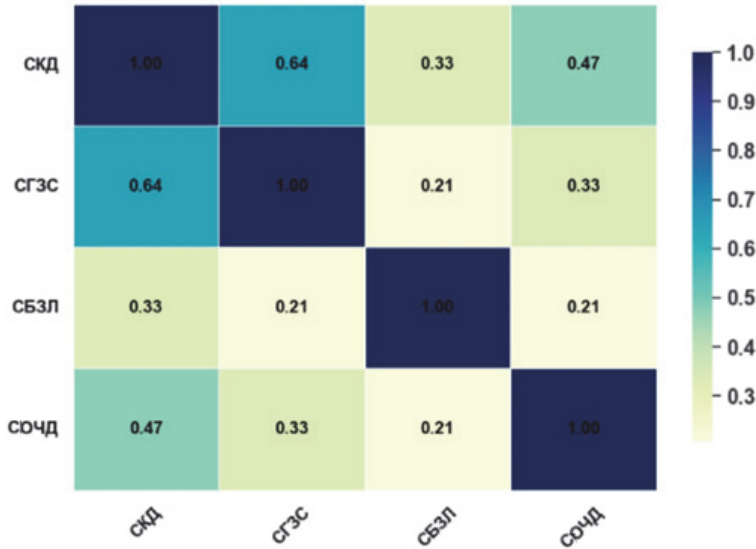
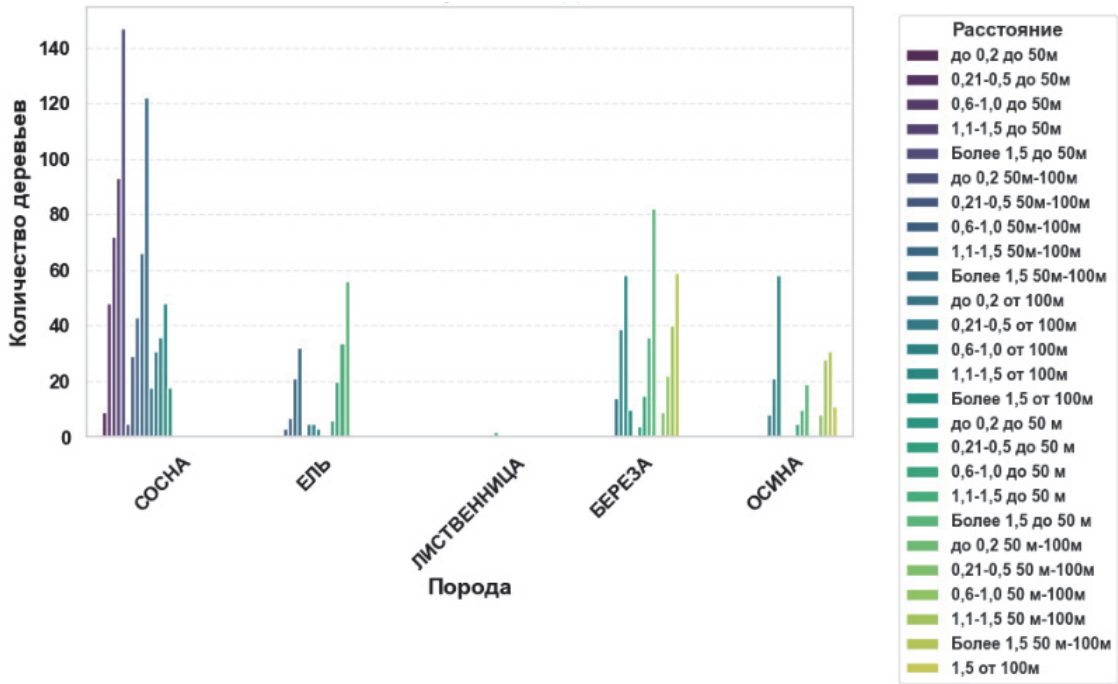


Рис. 11. Корреляция между СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД

Таблица 4

Описание признаков с учетом коэффициента СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД

Пара признаков	Коэффициент	Значение
СКД – СГЗС	0,64	Достаточно сильная положительная связь, свидетельствующая о сходстве результата восстановления нарушенного участка, а именно, количество штук на 1 га достигает 1,8 тыс. шт/га при расстоянии от стены леса 50 м. При увеличении расстояния более 100 м количество сокращается до 1,1 тыс. шт/га
СКД – СОЧД	0,47	Умеренная положительная связь – более равномерное распределение естественного возобновления на нарушенном лесном участке в количестве 2,0 тыс. шт/га при расстоянии от стены леса 50 м. При увеличении расстояния более 100 м количество сокращается до 1,2 тыс. шт/га
СКД – СБЗЛ	0,33	Небольшая положительная связь – демонстрирующая естественное возобновление на расстоянии более 100 м количество 1,4 тыс. шт/га
СГЗС – СОЧД	0,33	Тоже умеренно небольшая положительная связь по количеству естественного восстановления
СБЗЛ – СГЗС	0,21	Очень слабая связь по количеству естественного восстановления
СБЗЛ – СОЧД	0,21	Слабая связь свидетельствует о том, что в условиях СБЗЛ на расстоянии 50 м от семенников густота соответствует достаточному количеству естественного возобновления леса и не требуется проведение мероприятий по созданию лесных культур (5,0 тыс. шт/га), а в условиях ЕОЧД (2,2 тыс. шт/га)

Наиболее тесная положительная связь наблюдается между СКД и СГЗС ($r = 0,64$), что указывает на закономерное соответствие между густотой древостоя. Остальные корреляции – умеренные и слабые, особенно для признака СБЗЛ, который практически не зависит от других факторов. Это подчёркивает, что структура и масса зелёной листвы регулируются иными условиями, возможно, породным составом, возрастом или микроклиматом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования на нарушенном участке впервые для подзоны северной тайги определена структура типов леса, подвергшихся нарушению: ельники долгомошники (55,8 %), сосняки сфагновые (25,3 %), сосняки долгомошные (18,3 %) и сосняки брусничники (0,6 %).

Выявлено, что после вырубki указанных типов леса образуются сосняки бруснично-зеленомошно-лишайниковые (66,2 %), сосняки кустарничково-долгомошные (18,8 %), сосняки голубично-зеленомошно-сфагновые (14,7 %) и сосняки осоково-чернично-долгомошные (0,3 %) от общей площади нарушенного участка.

Одновременно для подзоны северной тайги авторами проведена оценка естественного лесовосстановления нарушенных лесных участков, которое протекает крайне медленно, неравномерно и имеет существенное различие по густоте. При этом в составе хвойного молодняка преобладает сосна и не в значительном количестве присутствует ель и лиственница. Среди мягколиственных доминирует береза и осина [Морозов и др. 2023].

Для достижения поставленной цели сегментация нарушенных участков проведена с учетом следующих оценочных критериев: тип лесорастительных условий, количество жизнеспособных экземпляров древесной растительности на 1 га, удаленность от прилегающего насаждения и высоты. Указанные критерии выбраны авторами на основании результатов натур-

ных исследований, позволивших установить их связь с естественным возобновлением основных лесобразующих пород. Полученные знания об особенностях формирования новых выделов позволят повысить эффективность принятия управленческих решений в ходе процесса восстановления нарушенных лесных участков.

В ходе исследования установлено, что самая продуктивная и развитая группа лесных условий объединена в кластер 1. Этой группе соответствуют следующие параметры оценочных критериев – расстояние от прилегающих семенников до 50 м для следующих типов лесорастительных условий и густоты естественного возобновления: СКД (54,5 шт/га), СГЗС (63,3 шт/га), СБЗЛ (102,5 шт/га); и СОЧД (59,8 шт/га). Это позволяет выделить случаи, при которых мероприятия по содействию естественному возобновлению лесов будут соответствовать требованиям, установленным лесным законодательством.

На основании полученных сведений выявлена корреляционная связь между установленными в рамках настоящего исследования группами лесорастительных условий (СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД):

Изложенные результаты корреляционного анализа позволяют сделать вывод о необходимости проведения мероприятий по искусственному лесовосстановлению в случаях: в типах лесорастительных условий сосняках долгомошных, сфагновых, черничных, удаленности участков от прилегающего лесного насаждения на расстоянии более 50 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Башегуров К. А., Жигулин Е. В., Жижин С. М., Магасумова А. Г. Совершенствование лесовосстановления сосновых лесов подзоны северной тайги // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск : Изд-во Брянск. гос. инженер.-технологич. ун-та, 2020, № 58. С. 3–6.

2. Борко А. Ч. Влияние расстояния от стен леса на формирование самосева и подроста после проведения

полосно-постепенных рубок // Труды БГТУ. 2012. № 1. С. 72–74.

3. Брыжко В. Г. Назначение восстановления нарушенных земель в современных экономических условиях // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 105–109.

4. Зарипов Ю. В., Осипенко Р. А., Залесова Е. С., Залесов С. В. Опыт рекультивации различных видов нарушенных земель // Экобиотех. 2020. Т. 3, № 4. С. 621–626.

5. Инструкции по сохранению подроста и молодняка хозяйственно ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесозаготовителей вырубков с проведенными мероприятиями по восстановлению леса : утв. Приказом Гослесхоза СССР от 08.12.1983 г. № 147.

6. Копцева Е. М., Абакумов Е. В. Первичные сукцессии растительности и почв на карьерах в подзоне северной тайги (на территории Ухтинского и Сосногорского районов Республики Коми) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2013. № 1. С. 28–44.

7. Лесохозяйственный регламент Сосногорского лесничества Республики Коми : утв. приказом Министерства промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорте Республики Коми от 15.12.2017 г. № 2809/1.

8. Лиханова И. А. Восстановление лесных экосистем на антропогенно нарушенных территориях в подзоне крайнесеверной тайги (Усинский район) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2004.

9. Лиханова И. А., Арчегова И. Б. Развитие теоретических и практических аспектов процесса восстановления нарушенных земель на севере Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 79–85.

10. Мартыненко В. А., Груздев Б. И., Осадчая Г. Г. Растительные ресурсы окрестностей городов Ухта и Сосногорск : монография. Ухта : Ин-т управления, информации и бизнеса, 2006. 93 с.

11. Морозов А. Е., Башегуров К. А., Залесов С. В., Осипенко Р. А. Заращение сейсмозаведочных профилей в условиях зеленомошной группы типов леса подзоны Северной тайги // Междунар. науч.-исслед. журн., 2021. Вып. 1 (103), ч. 2. С. 145–150.

12. Морозов А. Е., Белов Л. А., Башегуров К. А., Залесов С. В., Розинкина Е. П. Естественное заращение песчаных карьеров в условиях Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 243. С. 86–99.

13. Нгуен Ван Зинь, Грязькин А. В., Беляева Н. В., Фан Тхань Лам, Шахов А. Г. Естественное возобновление хвойных пород на площадях лесных культур // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 6–15.

14. Осипенко Р. А., Жижин С. М., Башегуров К. А., Морозов А. Е. Рекультивация сухоройных карьеров в условиях Северной подзоны тайги Западной Сибири. URL: <http://bio.urgau.ru> (дата обращения: 03.10.2020).

15. О проведении рекультивации и консервации земель : Постановление Правительства Российской Федерации от 10.07.2018 г. № 800.

16. Об утверждении Порядка отнесения земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям,

на которых расположены леса, и формы соответствующего акта : Приказ Минприроды России от 11.03.2019 г. № 150.

17. Об утверждении Правил лесоразведения, формы, состава, порядка согласования проекта лесоразведения, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесоразведения : Приказ Минприроды России от 20.12.2021 г. № 978.

18. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления : Приказ Минприроды России от 29.12.2021 г. № 1024.

19. Сунгурова Н. Р., Сунгуров Р. В., Страздаускас С. Е. Культуры сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) на рекультивируемых землях // Вестник КрасГАУ. 2014. № 11(98). С. 170–173.

20. Kaufman L., Rousseeuw P. J. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley-Interscience. 2009.

21. Bholowalia P., Kumar A. EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means // International Journal of Computer Applications, 2014. Vol. 105(9). P. 17–24.

REFERENCES

1. Bashegurov K. A., Zhigulin E. V., Zhizhin S. M., Magasumova A. G. Sovershenstvovanie lesovosstanovleniya sosnovy'x lesov podzony' severnoj tajgi // Aktual'ny'e problemy' lesnogo kompleksa. Bryansk : Izd-vo Bryansk. gos. Inzhener.-texnologich. un-ta, 2020. № 58. S. 3–6.

2. Borko A. Ch. Vliyanie rasstoyaniya ot sten lesa na formirovanie samoseva i podrosta posle provedeniya polosno-postepenny'x rubok // Trudy BGTU. 2012. № 1. S. 72–74.

3. Bry'zhko V. G. Naznachenie vosstanovleniya narushenny'x zemel' v sovremenny'x e'kono-micheskix usloviyax // Fundamental'ny'e issledovaniya. 2017. № 6. S. 105–109.

4. Zari-pov Yu. V., Osipenko R. A., Zalesova E. S., Zalesov S. V. Opy't rekul'tivacii raz-lichny'x vidov narushenny'x zemel'. E'kobiotech, 2020, T. 3, № 4. S. 621–626.

5. Instrukcii po soxraneniyu podrosta i molodnyaka xozyajstvenno cenny'x porod pri razrabotke lesossek i priemke ot lesozagotovitelej vy'rubok s provedenny'mi meropri-yat'yami po vosstanovleniyu lesa: utverzhdena prikazom Goslesxozha SSSR ot 08.12.1983 g. № 147.

6. Kopceva E. M., Abakumov E. V. Pervichny'e sукцессии rastitel'nosti i pochv na kar'erax v podzone severnoj tajgi (na territorii Uxtinskogo i Sosnogorskogo rajonov Respubliki Komi) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 3. Biologiya. 2013. № 1. S. 28–44.

7. Lesoxozyajstvenny'j reglament Sosnogorskogo lesnichestva Respubliki Komi : utverzhdenny'j prikazom Ministerstva promy'shlennosti, prirodny'x resursov, e'nergetiki i transporte Respubliki Komi ot 15.12.2017 g. № 2809/1.

8. Lixanova I. A. Vosstanovlenie lesny'x e'kosistem na antropogenno narushenny'x territoriyax v podzone

krajnesevernoj tajgi (Usinskij rajon). Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskix nauk. Sy'kty'vkar, 2004.

9. Lixanova I. A., Archegova I. B. Razvitie teoreticheskix i prakticheskix aspektov processa vosstanovleniya narushenny'x zemel' na severe Respubliki Komi // Teoreticheskaya i prikladnaya e'kologiya. 2014. № 3. S. 79–85.

10. Marty'nenko V. A., Gruzdev B. I., Osadchaya G. G. Rastitel'ny'e resursy' okrestnostej gorodov Uxta i Sosnogorsk: monografiya. Uxta : In-t upravleniya, informacii i biznesa, 2006. 93 s.

11. Morozov A. E., Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Osipenko R. A. Zarastanie sejsmoraz-vedochny'x profilej v usloviyax zelenomoshnoj gruppy' tipov lesa podzony' Severnoj tajgi // Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn., 2021. Vy'p. 1 (103), ch. 2. S. 145–150.

12. Morozov A. E., Belov L. A., Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Rozinkina E. P. Estestvennoe zarastanie peschany'x kar'erov v usloviyax Zapadno-Sibirskogo severo-taezhnogo ravninnogo lesnogo rajona // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii. 2023. № 243. S. 86–99.

13. Nguen Van Zin', Gryaz'kin A. V., Belyaeva N. V., Fan Txan' Lam, Shaxov A. G. Estestvennoe vozobnovlenie xvojny'x porod na ploshhadyax lesny'x kul'tur // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii. 2018. Vy'p. 223. S. 6–15.

14. Osipenko R. A., Zhizhin S. M., Bashegurov K. A., Morozov A. E. Rekul'tivaciya suxo-rojny'x kar'erov v usloviyax Severnoj podzony' tajgi Zapadnoj Sibiri. URL: <http://bio.urgau.ru> (data obrashheniya: 03.10.2020).

15. O provedenii rekul'tivacii i konservacii zemel' : Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 10.07.2018 g. № 800.

16. Ob utverzhdenii Poryadka otneseniya zemel', prednaznachenny'x dlya lesovosstanovleniya, k zemlyam, na kotory'x raspolozheny' lesa, i formy' sootvetstvuyushhego akta : Prikaz Minprirody' Rossii ot 11.03.2019 g. № 150.

17. Ob utverzhdenii Pravil lesorazvedeniya, formy', sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesorazvedeniya, osnovanij dlya otkaza v ego soglasovanii, a takzhe trebovanij k formatu v e'lektronnoj forme proekta lesorazvedeniya : Prikaz Minprirody' Rossii ot 20.12.2021 g. № 978.

18. Ob utverzhdenii Pravil le-sovosstanovleniya, formy', sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesovosstanovleniya, osnovanij dlya otkaza v ego soglasovanii, a takzhe trebovanij k formatu v e'lektronnoj forme proekta lesovosstanovleniya : Prikaz Minprirody' Rossii ot 29.12.2021 g. № 1024.

19. Sungurova N. R., Sungurov R. V., Strazdauskas S. E. Kul'tury' sosny' oby'kvennoj (*Pinus silvestris* L.) na rekul'tiviruemy'x zemlyax // Vestnik KrasGAU. 2014. № 11(98). S. 170–173.

20. Kaufman L., Rousseeuw P. J. (2009). Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley-Interscience.

21. Bholowalia P., Kumar, A. (2014) EBK-Means: A Clustering Technique based on El-bow Method and K-Means. International Journal of Computer Applications, 105(9), 17–24.

© Камашев А. А., Савченкова В. А.,
Хорькова М. И., 2026

Поступила в редакцию 25.11.2025
Принята к печати 26.06.2026

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ ПРОРАСТАНИЯ СЕМЯН *PINUS SYLVESTRIS* L.
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЯНОГО ЛОЖА В УСЛОВИЯХ СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО
ЛАБОРАТОРНОГО ПРОРАЩИВАНИЯ**

Д. А. Сурин, О. С. Залывская

Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова
Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17
E-mail: surin.d@edu.narfu.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования зависимости энергии прорастания семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от температуры водяного ложа в условиях стандартизированного лабораторного проращивания. Цель работы – определение оптимального температурного режима для увеличения энергии прорастания семян сосны обыкновенной и верификация требований ГОСТ 13056.6–97 с учетом климатических особенностей Архангельской области. Исследование выполнено на аппарате АПС-01 с регулируемой температурой водяного ложа. Экспериментальная выборка включала 11 вариантов испытаний (в том числе референсный по ГОСТ) с четырьмя повторностями каждый. Независимой переменной служила температура водяного ложа (диапазон +16,6...+30,0 °С днем, +14,0...+25,0 °С ночью), зависимыми – количество проросших семян (энергия прорастания) и длина корешка. Статистическая обработка данных охватывала расчет описательной статистики, коэффициента корреляции Пирсона и однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Установлено, что максимальная энергия прорастания семян сосны составляет $69 \pm 0,9$ % при среднесуточной температуре водяного ложа +18,0 °С (+20,2 °С днем, +17,3 °С ночью). Дальнейшее повышение температуры вызывает резкое снижение их всхожести. Коэффициент корреляции выявил слабую отрицательную линейную зависимость между ростом температуры и энергией прорастания семян. Однофакторный дисперсионный анализ продемонстрировал статистически значимые различия между группами ($F = 481,5$; $p < 0,05$), что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии влияния температуры. Выявлено расхождение между оптимальной температурой по данным исследования (+18,0 °С) и референсной температурой по ГОСТ (+20,9 °С). Линейный прогноз указывает на критическую точку прорастания около +41 °С, что связано с риском денатурации белков и активации патогенных процессов (например, развития плесени *Penicillium* spp.). Результаты свидетельствуют о возможном введении зональных поправок при проращивании семян сосны обыкновенной с учетом региональных особенностей. Поправочные коэффициенты должны базироваться на долгосрочных метеорологических данных и широтной зональности. Исследования касаются изменения температуры проращивания в лабораторных условиях в соответствии с природными условиями региона и могут применяться для повышения эффективности технологий лесовосстановления.

Ключевые слова: водяное ложе; всхожесть; ГОСТ 13056.6–97; однофакторный дисперсионный анализ; энергия прорастания; корреляция; лабораторное проращивание; *Pinus sylvestris* L.; семена сосны обыкновенной; температурный режим.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 120–127

**DEPENDENCE OF GERMINATION ENERGY OF *PINUS SYLVESTRIS* L. SEEDS ON WATER BATH
TEMPERATURE UNDER STANDARDIZED LABORATORY GERMINATION CONDITIONS**

D. A. Surin, O. S. Zalyvskaya

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation
E-mail: surin.d@edu.narfu.ru

Annotation. The paper presents the results of an experimental study on the dependence of germination energy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seeds on water bath temperature under standardized laboratory germination conditions. The objective was to determine optimal temperature regimes for maximizing germination energy and to verify the requirements of GOST 13056.6–97 in view of contemporary climatic conditions in the Arkhangelsk region. The research was conducted using an APS-01 germination apparatus with controlled water bath temperature. The experimental design included 11 test variants (including a reference one according to GOST) with four replicates each. The independent variable was the water bath temperature (range: +16.6...+30.0 °C during the day, +14.0...+25.0 °C at night), while the dependent variables were the number of germinated seeds (germination energy) and radicle length. Statistical data

processing involved descriptive statistics, Pearson correlation coefficient calculation, and one-way analysis of variance (ANOVA). It was established that maximum germination energy reaches 69% at a mean daily water bath temperature of +18.0 °C (+20.2 °C during the day, +17.3 °C at night). Further temperature increase leads to a sharp decline in germination. The correlation coefficient revealed a weak negative linear relationship between rising temperature and germination energy. ANOVA demonstrated statistically significant differences between groups ($F = 481.5$; $p < 0.05$), allowing rejection of the null hypothesis of no temperature effect. A discrepancy was identified between the optimal temperature derived from the study (+18 °C) and the reference temperature specified by GOST (+20.9 °C). Linear forecasting indicates a critical germination threshold at approximately +41 °C, associated with risks of protein denaturation and activation of pathogenic processes (e. g., development of *Penicillium* spp.). The findings indicate the necessity of revising regulatory documents to account for regional peculiarities and global warming. It is proposed to introduce correction coefficients into GOST based on long-term meteorological data and latitudinal zonality to enhance the efficiency of forest restoration technologies.

Keywords: water bath temperature; germination energy; *Pinus sylvestris* L.; seed germination; laboratory germination; ANOVA; Pearson correlation; standardization; GOST 13056.6–97; Scots pine seeds.

ВВЕДЕНИЕ

Лесное семеноводство является ключевым звеном в системе устойчивого лесопользования и эффективного лесовосстановления, где качество посадочного материала определяет долгосрочную продуктивность и устойчивость лесных экосистем. Качество семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), доминирующей породы лесов Европейского Севера России, играет центральную роль в этих процессах. Одним из критически важных показателей качества семян является их всхожесть — способность к образованию нормальных проростков при установленных условиях проращивания, определяемая согласно ГОСТ 13056.6–97. Энергия прорастания, отражающая скорость и равномерность появления всходов, также является важным параметром, напрямую влияющим на успех искусственного лесовосстановления.

Температурный режим представляет собой один из главных экологических факторов, регулирующих физиологические процессы на всех этапах онтогенеза растений, включая прорастание семян. Известно, что как слишком низкие, так и чрезмерно высокие температуры могут негативно влиять на энергию прорастания и всхожесть семян, снижая ее за счет повреждения клеточных структур или активации патогенных процессов [Castoldi et al., 2014; Сурсо, 2015]. Экспериментальное определение температурных условий позволяет не только повысить эффективность выращивания семян, но и минимизировать потери посадочного материала [Камра, 1968; Мохначев, 2023].

В Архангельской области, входящей в северную и среднюю таёжные подзоны Европейского Севера, температурный режим верхних горизонтов почвы в вегетационный период формируется под совместным влиянием широтной зональности, микрорельефа, типа растительного покрова и эндогенных геотермальных факторов, в частности — конвективного теплового потока (КТП). Полевые замеры, выполненные в 2005–2006 гг. на постоянных и временных пробных площадях в Приморском, Устьянском и Виноградовском районах области, установили, что средняя температура почвы на глубине 30 см в апреле–июне варьирует в пределах +1,8...+2,8 °C (май) и +4,6...+5,4 °C (июнь), при этом участки с повышенным КТП характеризуются достоверно ($p < 0,01$) более высокими значениями — разница достигает +0,6 °C

в мае и +0,8 °C в июне по сравнению с фоновыми территориями [Дровнина и др., 2007].

Экстраполяция этих данных на верхний горизонт, непосредственно участвующий в процессе прорастания (0–2 см), обоснована физиологией проростков *Pinus sylvestris* L. и микроклиматической практикой: по данным В. В. Протопопова (1959) и В. Н. Нилова (1967), разность температур между глубиной 30 см и поверхностью почвы в открытых биогеоценозах в июне–июле составляет от +3,5 до +6,0 °C, при этом амплитуда зависит от инсоляции, влажности и характера растительного покрова. С учётом этого, средняя температура в слое 0–2 см в Архангельской области в период массового прорастания (конец мая — начало июня) оценивается в +12,5...+14,5 °C на фоновых территориях и +14,0...+16,0 °C — в зонах с повышенным КТП. В отдельные тёплые дни при ясной погоде и низкой облачности температура поверхности почвы может достигать +19...+21 °C, особенно на минерализованных волоках и веяниковых вырубках старше 4 лет; такие экстремумы наблюдаются в 30–40 % дней вегетационного окна и способствуют ускорению метаболизма зародыша, но не приводят к критической дегидратации при отсутствии засухи.

Ночью на тех же участках температура в приземном слое снижается до +2,5...+5,0 °C, а в условиях ясной безоблачной погоды и сухого верхнего горизонта возможны заморозки до –1,5...0 °C, особенно в апреле и начале мая. В июне такие события редки и фиксируются, как правило, не более чем в 2–3 дня за месяц, преимущественно на оголённых участках. На фоне листовного подроста или в зонах с повышенным КТП амплитуда суточных колебаний снижается: дневные максимумы уменьшаются на 7–10 °C, ночные минимумы повышаются на 2–3 °C, что создаёт стабильные условия для выживания всходов.

Температурный режим у поверхности почвы в Архангельской области в вегетационный период составляет +16...+18 °C в зонах локального геотермального подогрева и на благоприятных по микроклимату участках: минерализованные волокна, южные склоны с разреженным травяным покровом [Дровнина и др., 2007] и на вырубках [Нилов, 1967]. Указанное значение (+18 °C) может быть предложено как регионально обоснованный норматив для лабораторного проращивания районированных семян.

Экспериментальное принятие режима проращивания, равного +18 °С, соответствует естественным условиям прорастания в Архангельской области и может усилить репрезентативность результатов для лесосеменной практики Севера.

Цель работы – определение оптимального температурного режима энергии прорастания семян сосны обыкновенной и верификация требований ГОСТ 13056.6–97 с учетом климатических особенностей Архангельской области.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

- 1) проведение сравнительного анализа показателей всхожести при градиенте температур;
- 2) выявление оптимальных температурных условий, способствующих максимизации скорости и равномерности прорастания;
- 3) определение зависимости энергии прорастания семян *Pinus sylvestris* L. от температурного режима водяного ложа аппарата АПС-01 в условиях стандартизированного лабораторного проращивания с последующей оптимизацией температурных параметров.

Предметом исследования стала динамика энергии прорастания семян *Pinus sylvestris* L., а объектом – процесс проращивания, протекающий под воздействием регулируемого температурного фактора. В эксперименте независимой переменной служила температура водяного ложа аппарата для проращивания, а зависимыми переменными – количество нормальных проростков (всхожесть), их средняя длина корешка и равномерность появления всходов (энергия прорастания).

В качестве рабочей гипотезы принята предпосылка о наличии нелинейной зависимости между температурой водяного ложа и энергией прорастания: предполагалось, что увеличение температуры до достижения порогового значения будет стимулировать физиологическую активность, после чего наступит фаза угнетения, обусловленная негативным влиянием гипертермии на целостность клеточных структур и метаболические процессы.

Энергия прорастания, согласно ГОСТ 13056.6–97, определяется как процентное соотношение семян, образовавших нормальные проростки, к общему числу высеваемых семян за установленный начальный период тестирования (в данном исследовании установленный срок определения энергии прорастания по ГОСТ 13056.6–97 – 7 суток). Данный показатель является интегральной характеристикой силы всхожести и отражает потенциал быстрого и равномерного появления всходов, что имеет решающее значение для технологий лесовосстановления. Активация прорастания инициируется при создании благоприятных экологических условий, включающих достаточный уровень влажности субстрата, оптимальную температуру и доступ молекулярного кислорода к зародышу. Необходимые для этих процессов биохимические реакции обеспечиваются за счет распада запасных питательных веществ эндосперма, аккумулированных в период онтогенеза семени [Наквасина, 2000].

В эксперименте использовали семена сосны обыкновенной I класса качества, отобранные из партии, по-

ступившей на лесосеменную станцию. Сертификат качества семян № 29/33926 от 25.03.2023, место сбора семян – Архангельская область, Красноборское лесничество, Красноборское сельское участковое лесничество, кв 19, участок совхоза «Черевковский». Отбор проб проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 13056.1–97. Из исходной партии путем многократного перемешивания и последовательного деления получено десять выемок – дискретных выборок семенного материала, взятых за один прием. Из совокупности выемок составлен объединенный образец, из которого методом квартования выделен единый средний образец массой 50 г. Качество всей партии семян оценивали на основании анализа полученного среднего образца.

Исследование выполнено на автоматизированном аппарате для проращивания семян АПС-01, позволяющем точно контролировать и программировать температурный режим водяного ложа. Экспериментальная программа включала 11 испытаний, каждое из которых повторялось четырежды ($n = 4$), что обеспечило репрезентативность данных. Испытания варьировались по температурному режиму: диапазон дневных температур изменялся от +16,6 °С до +30,0 °С, ночных – от +14,0 °С до +25,0 °С, шаг изменения температуры – 2 °С. В качестве контрольного (референсного) режима выступал стандарт ГОСТ 13056.6–97 (+20,9 °С).

Подготовка посевного материала осуществлялась в стерильных условиях. При проращивании семян на аппарате в качестве ложа использовали подкладки с фитилями из фланелевой ткани, прошитые в 2 слоя, на которых размещали фильтровальную бумагу и выкладывали семена. Поверхность металлического листа с отверстиями обрабатывали 70%-м раствором изопропилового спирта для дезинфекции. На него укладывали круглые подложки из белой хлопчатобумажной фланели с фитилями, прошедшие предварительную стерилизацию в медицинском автоклаве при температуре 121 °С и давлении 1,1 атм в течение 20 минут. На подложки помещали два слоя фильтровальной бумаги, которая затем увлажнялась дистиллированной водой до полного насыщения. Семена распределяли по поверхности бумаги пинцетом в шахматном порядке таким образом, чтобы исключить их взаимный контакт, что минимизировало риск передачи патогенов и обеспечивало равномерный доступ к влаге. Каждый лоток накрывался прозрачным пластмассовым колпачком с центральным отверстием, предназначенным для поддержания необходимой влажности воздуха в микроатмосфере и обеспечения газообмена, предотвращая при этом развитие анаэробных процессов и загнивания. Процесс контроля температуры водяного ложа представлен на рис. 1.

Каждый экспериментальный вариант маркировался цифровым кодом. Температурный режим имитировал суточную цикличность и управлялся встроенным микрокомпьютером аппарата, с автоматическим переключением каждые 12 часов. Контроль температуры воды водяного ложа осуществлялся с помощью поверенного электронного регистратора температуры (логгера) ATAL-ATV, оснащенного выносным термощупом с точностью измерения $\pm 0,1$ °С.



Рис. 1. Процесс контроля температуры водяного ложа при проращивании семян

По окончании 7-дневного периода оценки энергии прорастания производился подсчет количества нормальных проростков в абсолютных единицах (штуках), после чего данные пересчитывали в проценты для сопоставимости с требованиями ГОСТ. Для оценки морфометрических параметров проростков измеряли длину первичного корешка каждого нормального проростка с помощью поверенного цифрового штангенциркуля ШЦЦ-1 с точностью 0,01 мм.

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием встроенного пакета «Анализ данных» прикладного программного обеспечения Microsoft Excel. Для оценки степени связи между независимой и зависимой переменными рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона. Для проверки статистической значимости различий между группами применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные, полученные в ходе 11 испытаний с четырехкратной повторностью ($n = 4$), демонстрируют выраженную зависимость энергии прорастания семян сосны обыкновенной от температуры водяного ложа (табл. 1). Фактическая температура водяного ложа может отклоняться от заданной в настройках аппарата, поэтому обязательна её инструментальная регистрация.

Описательная статистика, представленная в табл. 2, позволяет оценить общую вариативность и форму распределения экспериментальных данных.

Таблица 1
Вариативность результатов проращивания семян *Pinus sylvestris* L.

№ опыта Experiment No.	Количество проросших семян, шт. Number of germinated seeds						Средняя длина корешка, мм Average radicle length, mm	Температура в аппарате, °C Temperature in the chamber, °C		Температура на ложе, °C Temperature on the tray, °C	
	1 сотня 1st hundred	2 сотня 2nd hundred	3 сотня 3rd hundred	4 сотня 4th hundred	Среднее значение Average number of germinated seeds	Ошибка среднего значения The error of the average number of germinated seeds		Днем Day	Ночью Night	Днем Day	Ночью Night
1	19	20	20	23	20	1,4	5	19,0	14,0	16,6	14,0
2	42	42	44	43	42	1,0	8	21,0	16,0	18,1	16,2
3	71	69	68	70	69	0,9	12	23,0	18,0	20,2	17,3
4	67	67	68	68	67	0,8	10	25,0	20,0	21,3	17,9
5	55	55	51	57	55	1,5	10	27,0	22,0	24,2	18,1
6*	51	49	48	50	49	0,9	10	29,0	24,0	22,9	18,8
7	44	44	41	46	44	1,2	16	31,0	26,0	25,1	19,3
8	36	37	36	37	37	0,6	20	33,0	28,0	27,5	22,0
9	29	30	30	28	30	1,0	25	35,0	30,0	28,8	24,2
10	19	20	20	20	20	0,5	37	37,0	32,0	29,1	24,7
11	12	13	15	13	13	0,7	50	39,0	34,0	30,0	25,0

Примечания. *Жирным шрифтом выделен референсный режим по ГОСТ 13056.6–97.

Таблица 2

Описательная статистика результатов определения энергии прорастания семян

Показатели статистики/ Statistical indicators	1 сотня 1st hundred	2 сотня 2nd hundred	3 сотня 3rd hundred	4 сотня 4th hundred
Среднее, шт./ Mean, pcs	40,4	40,1	40,1	41,4
Стандартная ошибка, шт./ Standard error, pcs	5,9	5,6	5,5	5,8
Медиана, шт./ Median, pcs	42	40	41	43
Мода, шт./ Mode, pcs	19	-	20	-
Стандартное отклонение, шт./ Standard deviation, pcs	19,6	18,4	18,2	19,2
Дисперсия выборки, шт./ Sample variance, pcs	385,6	340,0	331,0	366,8
Экссесс/ Kurtosis	-1,0	-0,9	-0,8	-1,1
Асимметричность/ Skewness	0,11	0,03	0,25	0,10
Интервал, шт./ Range, pcs	59	55	53	57
Минимум, шт./ Minimum, pcs	12	13	15	13
Максимум, шт./ Maximum, pcs	71	68	68	70
Сумма, шт./ Sum, pcs	445	441	441	455
Счет, шт./ Count, pcs	11	11	11	11

Таблица 3

Корреляция данных выборки

1 сотня 1st hundred	2 сотня 2nd hundred	3 сотня 3rd hundred	4 сотня 4th hundred
-0,46	-0,40	-0,47	-0,50

Ее анализ показывает, что дисперсия выборки колеблется в пределах 331,0–385,6 шт., что свидетельствует о значительной внутригрупповой вариабельности. Отрицательные значения эксцесса ($-0,8 \div -1,1$) указывают на плосковершинность распределения, то есть на меньшую концентрацию значений вокруг среднего по сравнению с нормальным распределением. Низкие значения асимметричности ($0,03\text{--}0,25$) свидетельствуют о слабой асимметрии распределения, близкой к симметричной форме.

Для количественной оценки направления и силы линейной связи между средней температурой водяного ложа и энергией прорастания рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r) по каждой из четырех повторностей (табл. 3) при уровне значимости $p = 0,05$ (5 %).

Полученные значения коэффициентов корреляции варьировались от $-0,40$ до $-0,50$, что свидетельствует о наличии слабой отрицательной линейной зависимости. Это указывает на тенденцию к снижению энергии прорастания с ростом температуры водяного ложа. Следует отметить, что корреляция сама по себе не доказывает причинно-следственную связь; однако в рамках данного эксперимента, где все прочие условия (влажность, состав субстрата, световой режим) были строго контролируемыми и постоянными, температура является единственным варьирующим фактором. Следовательно, можно констатировать, что наблюдаемое снижение всхожести обусловлено именно изменением температурного режима.

В качестве альтернативы нами рассмотрен непараметрический коэффициент Спирмена, который менее чувствителен к выбросам и не предполагает нормальности распределения. Однако, учитывая, что анализ описательной статистики (табл. 2) показал отсутствие

значительных отклонений от нормального распределения (умеренные значения эксцесса и асимметричности), применение параметрического коэффициента Пирсона является методологически обоснованным.

Для визуализации зависимости энергии прорастания от температуры водяного ложа на рис. 2 представлен график в виде аппроксимирующей кривой. Аппроксимация данных выполнена с использованием полиномиальной функции 6-го порядка, что позволило наиболее точно отразить нелинейную форму экспериментального распределения ($R^2 = 0,9836$).

Анализ кривой аппроксимации выявляет наличие четко выраженного максимума, соответствующего опыту № 3. При среднесуточной температуре водяного ложа $+18,0^\circ\text{C}$ ($+20,2^\circ\text{C}$ днём и $+17,3^\circ\text{C}$ ночью) зафиксировано максимальное среднее количество проросших семян – $69 \pm 0,9$ шт., из 100 (69 %). Этот показатель существенно превышает среднее значение по всем опытам и на 20 шт. (29 %) выше результата, полученного в референсных условиях по ГОСТ 13056.6–97 (49 шт. $\pm 0,9$ при $+20,9^\circ\text{C}$).

Дальнейшее повышение температуры сопровождается резким снижением энергии прорастания, что свидетельствует о выходе за пределы оптимального диапазона и вхождении в зону термического стресса. Асимметричная форма кривой подтверждает гипотезу о существовании порогового значения температуры, после достижения которого начинается фаза угнетения физиологических процессов, необходимых для прорастания.

Для проверки нулевой гипотезы об отсутствии влияния температурного режима на энергию прорастания семян применен однофакторный дисперсионный анализ. Альтернативная гипотеза предполагала

наличие статистически значимых различий в среднем количестве проросших семян между опытами, проведенными при различных температурных режимах.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа (табл. 4) отражают, существуют ли статистически значимые различия между средними значениями зависимой переменной в разных группах, сформированных по уровням фактора.

Так как $F_{\text{расчетное}} > F_{\text{критическое}}$, то гипотеза H_0 опровергнута. Это означает, что наблюдаемые различия в энергии прорастания между температурными режимами являются статистически значимыми и не могут быть объяснены случайной вариацией. Следовательно, можно утверждать, что температура водяного ложа оказывает достоверное влияние на количество проросших семян. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9836$ (рис. 2) подтверждает, что 98,36 % вариации в энергии прорастания объясняется изменением температурного фактора, что свидетельствует о высокой степени связи между этими переменными.

В результате проведения опытов при температурах, приближающихся к $+30^\circ\text{C}$, визуально фиксировалось первичное развитие мицелия плесневых грибов рода *Penicillium*. Наличие спор данного рода на поверхности семян и в окружающей воздушной среде является повсеместным и неизбежным. В усло-

виях, создаваемых в аппарате для проращивания (высокая влажность субстрата, оптимальный температурный режим и ограничение газообмена под герметизирующим колпачком), споры *Penicillium* spp. находят благоприятную среду для прорастания и активного роста.

Развитие сапрофитных микроорганизмов дополнительно стимулируется наличием легко усваиваемых питательных веществ, источником которых служат как сами семена, так и органические соединения, присутствующие в воде. Предпочтение *Penicillium* к нейтральной или слабокислой среде также соответствует условиям, сложившимся в ходе эксперимента. Таким образом, конкурентное подавление прорастания семян патогенными микроорганизмами, наряду с прямым термическим стрессом (денатурация белков и повреждение мембранных структур), является одним из ключевых факторов, обуславливающих резкое снижение энергии прорастания при повышенных температурах.

Для экстраполяции зависимости энергии прорастания от температуры водяного ложа был построен линейный прогноз, представленный на рис. 3. Согласно полученной модели, при достижении температуры $+41^\circ\text{C}$ прогнозируемое количество проросших семян снижается до нуля.

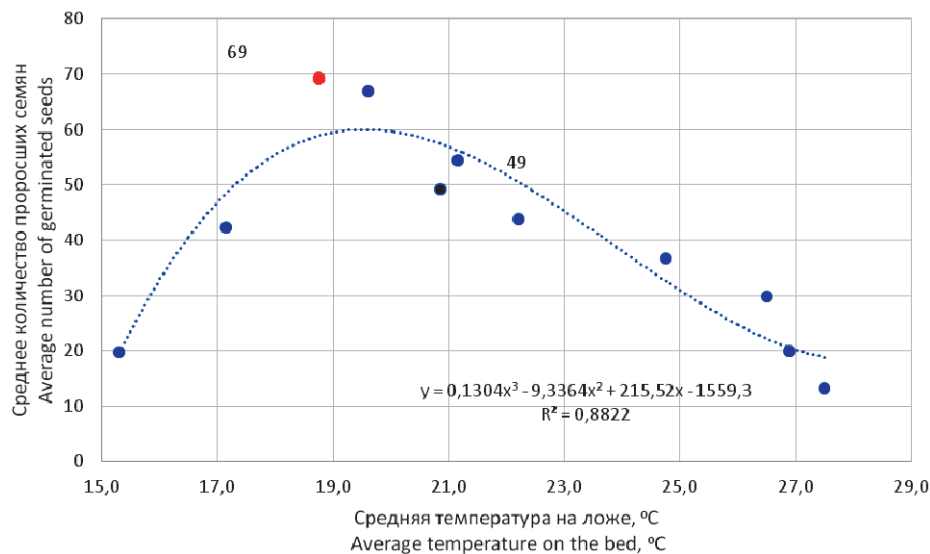


Рис. 2. Графическое распределение результатов определения энергии прорастания

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа между опытами для установленных температур

Источник вариации/ Source of variation	SS* (Sum of Squares)	Df (degrees of freedom)	MS (Mean Square)	F	P-Значение P-value	F критиче- ское F critical
Между группами/ Between groups	14152,0	10,0	1415,2	481,5	0,0	2,1
Внутри групп/ Within groups	97,0	33,0	2,9			
Итого/ Total	14249	43				

Примечание. *При $\alpha=0,05$: SS – сумма квадратов; df – число степеней свободы; MS – средний квадрат; F – расчетное значение отношения Фишера; P – уровень значимости для вычисленного F; F критическое – табличное значение отношения Фишера.

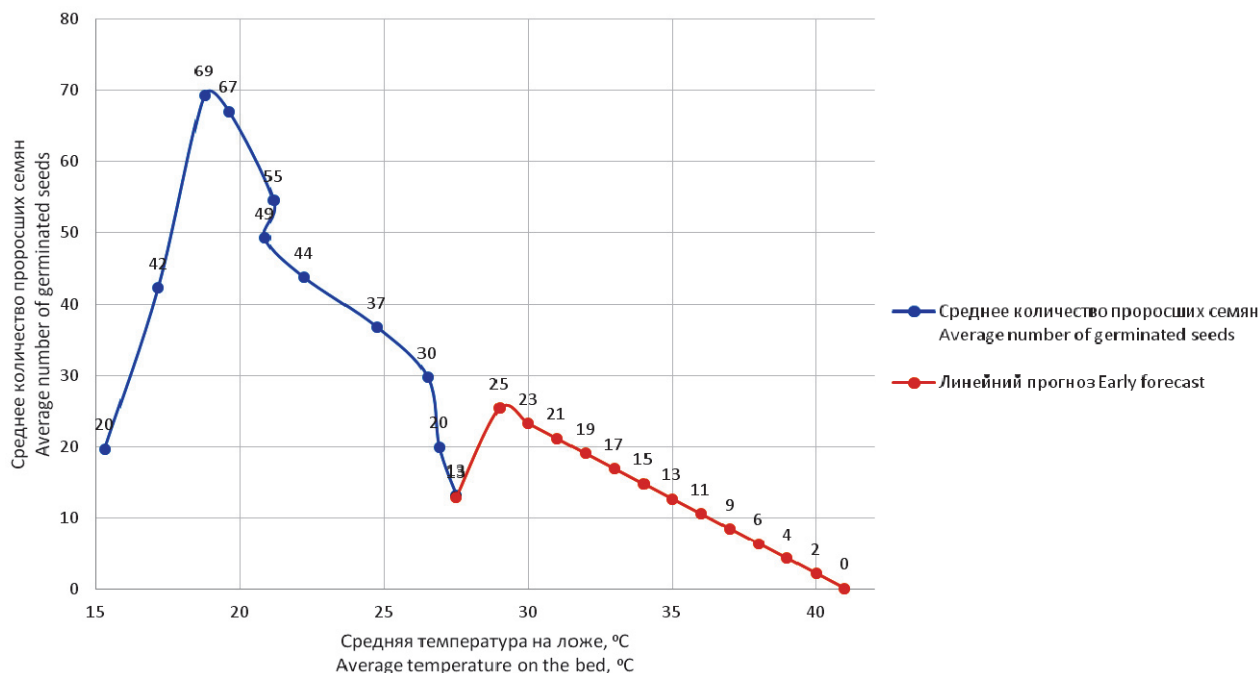


Рис. 3. График линейного прогноза среднего количества проросших семян в зависимости от увеличения температуры

Однако следует подчеркнуть, что данная экстраполяция носит чисто теоретический характер и не может рассматриваться как достоверное предсказание биологического процесса. При температурах выше +30 °C наблюдается резкое снижение всхожести, обусловленное не только термическим стрессом, но и активным развитием патогенных микроорганизмов (в частности, плесневых грибов рода *Penicillium*), которые конкурируют с зародышем за питательные вещества и выделяют токсины. Кроме того, высокие температуры вызывают денатурацию белков и повреждение мембранных структур клеток зародыша, что делает сам факт прорастания невозможным.

Таким образом, линейный прогноз за пределами +30 °C не имеет практической значимости, поскольку он игнорирует биологические ограничения и механизмы угнетения, действующие в реальных условиях. Анализ литературы подтвердил, что дальнейшее повышение температуры сверх этого порога не способствует ускорению прорастания, а лишь усиливает физиологическое угнетение и риск гибели семян [Жигулин, 2021].

Понижение температуры ниже оптимального уровня (+18 °C) также нецелесообразно, поскольку приводит к замедлению метаболических процессов, переходу семян в состояние покоя и, как следствие, снижению скорости и равномерности появления всходов.

На основании полученных данных предлагается ввести широтно-климатический поправочный коэффициент к температуре для проведения лабораторного проращивания по ГОСТ 13056.6-97 для Архангельской области, определяемый как разность между средней температурой почвы вегетационного периода за последние 20–25 лет в регионе и усредненным нормативом температуры проращивания. В нашем случае он равен –3 °C.

ВЫВОДЫ

1. Проведенное исследование посвящено изучению влияния температурных условий на процесс прорастания семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Работа выполнена на базе лаборатории Архангельской лесосеменной станции центра защиты леса Архангельской области с использованием аппарата для проращивания семян АПС-01, в котором температура водяного ложа регулировалась для определения ее воздействия на энергию прорастания и всхожесть семян.

2. Анализ полученных данных подтвердил рабочую гипотезу о нелинейной зависимости энергии прорастания от температуры.

3. Проведенное исследование позволило установить оптимальный температурный режим водяного ложа для максимизации энергии прорастания семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Архангельской области.

4. Средняя температура почвы вегетационного периода в Архангельской области составляет +18 °C. Для обеспечения репрезентативности результатов лабораторные методики должны быть привязаны к региональным климатическим нормам.

5. На основании полученных данных предлагаем ввести систему поправочных коэффициентов для температуры проращивания, дифференцированных по географическим зонам и основанных на средних многолетних метеорологических данных за последние 20–25 лет.

6. Исследование может способствовать оптимизации лабораторного проращивания и определения качества семян, тем самым и формировать основу для разработки адаптивных нормативных документов, способных повысить эффективность технологий лесовосстановления и отвечающим принципам зонального подхода в лесном семеноводстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. ГОСТ 13056.6–97 Семена деревьев и кустарников – Метод определения всхожести: межгосударственный стандарт: утв. и введ. в действие постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 12 марта 1998 г. № 48: дата введения 01.07.1998. М., 1998. 31 с.
2. Дровнина С. И., Беляев В. В., Хмара К. А. Температура почвы на территориях с различными показателями конвективного теплового потока в Архангельской области // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные и точные науки». 2007. № 2. С. 20–25.
3. Жигулин А. В., Оплетаев А. С. Влияние освещенности на рост сеянцев с закрытой корневой системой // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 11(113)-1. С. 124–128. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.022
4. Мохначев П. Е., Махнева С. Г., Потапенко А. М., Бартыш А. А., Клеткин А. А. Основные показатели качества семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сформированных в условиях аэропромвыбросов разного химического состава // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 3 (86). С. 65–73. DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.007
5. Наквасина Е. Н. Географическая изменчивость как основа семеноводства сосны обыкновенной на Европейском Севере России : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: специальность 06.03.01 – Лесные культуры, селекция и семеноводство / СПб., 2000. С. 12. // Национальная электронная библиотека : [сайт]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_831258/?ysclid=mimuagazcv756728101 (дата обращения: 15.02.2024).
6. Нилов В. Н. О микроклимате вейниковых рубок // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере. М. : Наука, 1967. С. 125–130.
7. Протопопов В. В. Микроклиматические условия в зарослях кипрея [*Chamaenerium angustifolium* (L.) Scop.] // Ботанический журнал. 1959. Т. 44, № 8. С. 1125–1134.
8. Сурсо М. В. Микрофенология женского репродуктивного цикла и структура урожая семян сосны обыкновенной в северной тайге [Текст] // Известия вузов. Лесной журнал 2015 № 2. С. 50–62. ISSN 0536-1036. Библиогр.: с. 59–62 [сайт]. URL: https://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/165/5_-surso.pdf?ysclid=mimvi63xj490565966 (дата обращения: 10.03.2024).
9. Castoldi E., Mattioni C., Vendramin G. G., La Porta, N. Effect of seed mass and number of cotyledons on germination and early seedling performance in two Mediterranean pines under contrasting temperature regimes // Annals of Forest Science, 2014. Vol. 71(7). P. 847–856. DOI:10.5424/fs/2014233-05480
10. Kamra S. K. Germination studies on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seed. *Silvae Genetica*. 1968. Vol. 17(3–4). P. 95–98. URL: <https://pub.epsilon.slu.se/5842/1/SFS062.pdf> (дата обращения: 10.03.2024).

REFERENCES

1. GOST 13056.6–97 Semena derev'ev i kustarnikov – Metod opredeleniya vsxozhesti: mezhgosudarstvennyj standart: utv. i vved. v dejstvie postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta Rossijskoj Federacii po standartizacii, metrologii i sertifikacii ot 12 marta 1998 g. № 48: data vvedeniya – 01.07.1998. M., 1998. 31 s.
2. Drovkina S. I., Belyaev V. V., Xmara K. A. Temperatura pochvy' na territoriyax s razlichny'mi pokazatelyami konvektivnogo teplovogo potoka v Arxangel'skoj oblasti // Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya «Estestvenny'e i tochny'e nauki». 2007. № 2. S. 20–25.
3. Zhigulin A. V., Opletaev A. S. Vliyanie osveshennosti na rost seyancev s zakrytoj kornevoj sistemoj // Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn. 2021. 11(113)-1. S. 124–128. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.022
4. Moxnachev P. E., Maxneva S. G., Potapenko A. M., Barty'sh A. A., Kletkin A. A. Osnovny'e pokazateli kachestva semyan sosny' oby'knovennoj (*Pinus sylvestris* L.), sformirovanny'x v usloviyax ae'ropromvy'brossov raznogo ximicheskogo sostava // Lesa Rossii i xozyajstvo v nix. 2023. № 3 (86). S. 65–73. DOI: 10.51318/FRET.2023.3. 86.007
5. Nakvasina E. N. Geograficheskaya izmenchivost' kak osnova semenovodstva sosny' oby'knovennoj na Evropejskom Severe Rossii: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. d-ra s.-x. nauk: special'nost' 06.03.01 – Lesny'e kul'tury', selekciya i semenovodstvo / Sankt-Peterburg, 2000. S. 12. // Nacional'naya e'lektronnaya biblioteka [sajt]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_831258/?ysclid=mimuagazcv756728101 (data obrashheniya: 15.02.2024).
6. Nilov V. N. O mikroklimате vejnikovyx vy'rubok // Voprosy' taezhnogo lesovodstva na Evropejskom Severe. M. : Nauka, 1967. S. 125–130.
7. Protopopov V. V. Mikroklimaticheskie usloviya v zaroslyax kipreya [*Chamaenerium angustifolium* (L.) Scop.] // Botanicheskij zhurnal. 1959. T. 44, № 8. S. 1125–1134.
8. Surso M. V. Mikrofenologiya zhenskogo reproduktivnogo cikla i struktura urozhayev semyan sosny' oby'knovennoj v severnoj tajge [Tekst] // Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal 2015 № 2. S. 50–62. ISSN 0536-1036. Bibliogr.: s. 59–62 [sajt]. URL: https://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/165/5_-surso.pdf?ysclid=mimvi63xj490565966 (data obrashheniya: 10.03.2024).
9. Castoldi E., Mattioni C., Vendramin G. G., La Porta N. (2014). Effect of seed mass and number of cotyledons on germination and early seedling performance in two Mediterranean pines under contrasting temperature regimes. *Annals of Forest Science*, 71(7), 847–856. DOI:10.5424/fs/2014233-05480
10. Kamra S. K. (1968). Germination studies on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seed. *Silvae Genetica*, 17(3–4), 95–98 [sajt]. URL: <https://pub.epsilon.slu.se/5842/1/SFS062.pdf> (data obrashheniya: 10.03.2024).

© Сурин Д. А., Залывская О. С., 2026

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.1

DOI: 10.64430/1993-0135-2026-3-128-134

Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 3. С. 128–134

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ В ЯЧЕЙКАХ СТАТОРА И РОТОРА ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ РАЗМОЛЕ ХВОЙНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова

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

Аннотация. В ножевых размалывающих машинах, кроме течения волокнистой суспензии в узком зазоре между ножами ротора и статора, наблюдается интенсивное перетекание этой суспензии из ячеек статора в ячейки ротора и наоборот. При этом движение гарнитуры ротора относительно гарнитуры статора можно рассматривать как движение одной шероховатой поверхности относительно другой. Изучение движения волокнистой суспензии по шероховатой поверхности в ножевых размольных машинах представляет определенный интерес, как с точки зрения исследования процесса разработки волокнистой суспензии, за счет гидродинамических сил, и как исследование частного случая течения потока в гидромашинах.

Ключевые слова: размол, дисковая мельница, волокнистая суспензия, гидродинамика, хвойная целлюлоза, статор, ротор, шероховатая поверхность.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 128–134

HYDRODYNAMICS OF FIBER SUSPENSION FLOW IN STATOR AND ROTOR CELLS OF A DISC REFINER DURING SOFTWOOD PULP REFINING

Yu. D. Alashkevich, N. S. Reshetova

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

Abstract. In knife grinding machines, in addition to the flow of fibrous slurry in the narrow gap between the rotor and stator blades, there is an intense flow of this slurry from the stator cells to the rotor cells and vice versa. In this case, the movement of the rotor headset relative to the stator headset can be considered as the movement of one rough surface relative to another. The study of the movement of a fibrous suspension over a rough surface in knife grinding machines is of particular interest, both from the point of view of studying the process of developing a fibrous suspension due to hydrodynamic forces, and as a study of a special case of flow in hydraulic machines.

Keywords: refining, disc mill, fibrous slurry, hydrodynamics, coniferous pulp, stator, rotor, rough surface.

ВВЕДЕНИЕ

Размол волокнистой массы, предшествующий отливу бумаги, оказывает решающее влияние, как на процесс изготовления бумаги, так и на свойства готового продукта.

Лист бумаги, отлитый из неразмолотых волокнистых материалов, получается неудовлетворительным по своему строению, внешнему виду и физико-механическим свойствам. Он обладает неравномерным, облачным просветом, большой пористостью, пухлостью и малой прочностью.

Это происходит потому, что сравнительно длинные и грубые волокна сплетаются в хлопья и, оседая на

сетке, дают неоднородный по структуре лист. Неразмолотые волокна обладают малой пластичностью, слабо развитой поверхностью и мало гидратированы, вследствие чего такие волокна плохо связываются друг с другом в бумажном листе. На наш взгляд, главной целью размола волокнистых материалов является:

– придание волокнистому материалу определенной структуры в отношении размеров по длине и толщине, а также по фракционному составу, чтобы обеспечить желаемое строение и плотность бумажного листа;

– сообщение волокнистому материалу определенной степени гидратации – развитие поверхности, пла-

стичности и других свойств, от которых зависит создание в бумаге межволоконных сил связи и многие свойства бумаги: механическая прочность, объемный вес, впитывающая способность, воздухопроницаемость, прозрачность и другие.

Размол волокнистых материалов в бумажную массу производится в настоящее время на размалывающих аппаратах периодического и непрерывного действия – роллах, конических мельницах, рафинерах и специальных аппаратах для роспуска, рафинирования и размола массы. Независимо от типа размалывающего аппарата, принцип размола волокна в классических машинах примерно один и тот же.

Он заключается в том, что волокнистая суспензия непрерывным потоком поступает к ножам рабочего органа машины, состоящего из неподвижно закрепленных ножей статора или планки и вращающихся ножей, расположенных на барабане, конусе или диске (роторе).

ТЕЧЕНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ В ЯЧЕЙКАХ СТАТОРА И РОТОРА

Полагая, что при движении волокнистой суспензии в ячейках ротора и статора она подвергается разработке за счет гидродинамических сил, рассмотрим момент, когда при движении шероховатых поверхностей относительно друг друга ячейки статора перекрываются ячейками ротора (рис. 1).

Выбор такой модели течения волокнистой суспензии объясняется тем, что в этом случае имеют место наименьшие скоростные характеристики потока за счет резкого увеличения объема исследуемого пространства, следовательно, и наименьшие гидродинамические силы, действующие на волокно. Делаем следующие допущения:

1. Движение потока можно рассматривать как течение жидко-твердой среды, состоящей из воды и диспергированных в ней волокон, имеющий ньютоновский характер движения [1–5]. Ориентирование волокон по потоку приводит к отсутствию связей между ними. Волокна гасят поперечные пульсации чистой воды (причем тем интенсивнее, чем выше концентрация волокнистой суспензии). Исходя из этого, можем считать, что движение потока волокнистой суспензии в рабочей камере установки будет проис-

ходить в ламинизированном режиме с наличием турбулентных пульсаций.

2. Движение потока в межножевой ячейке происходит в направлении, перпендикулярном меридиональной плоскости рабочей камеры установки, то есть вектор осредненной скорости потока в ячейке между ножами направлен перпендикулярно боковой поверхности ножа гарнитуры.

3. Поток жидкости в межножевом зазоре имеет постоянную скорость. В действительности, за счет пульсаций давления при перекрытии ячеек, скорость непостоянна во времени, однако за счет высокой частоты перекрытий, происходит сглаживание пульсаций скорости в ячейке между соседними ножами.

Учитывая принятые нами допущения, а также, основываясь на теории гидродинамического подобия, можно полагать, что течение жидкости в рабочей камере установки сходно с течением жидкости по шероховатой поверхности или в канале за плохо обтекаемым телом, рассмотренным в работах [6–12].

Для гидравлических машин, к которым относятся и ножевые размалывающие машины, при установившемся течении потока условием гидродинамического подобия можно считать сходство критериев Рейнольдса и симплексов геометрического подобия – коэффициента стеснения потока $I = \frac{S}{h}$ (рис. 1) и со-

отношение $\frac{L}{\ell}$, характеризующего ячейку гарнитуры и плохо обтекаемое тело. Наиболее полно схема течения потока за плохо обтекаемым телом изложена в работе Г. И. Абрамовича [8].

Исходя из подобия схем течения потока (рис. 1) в канале за плохо обтекаемым телом и в ячейках статора установки можем считать, что в ячейке статора существует циркуляционная зона интенсивного смещения вследствие срыва расширяющейся струи с поверхности ножа статора. За счет отражения струи от стенки ячейки образуется зона обратного течения, причем величина обратной скорости потока определяется как скоростью сорванной струи, так и геометрическими параметрами ячейки статора [8].

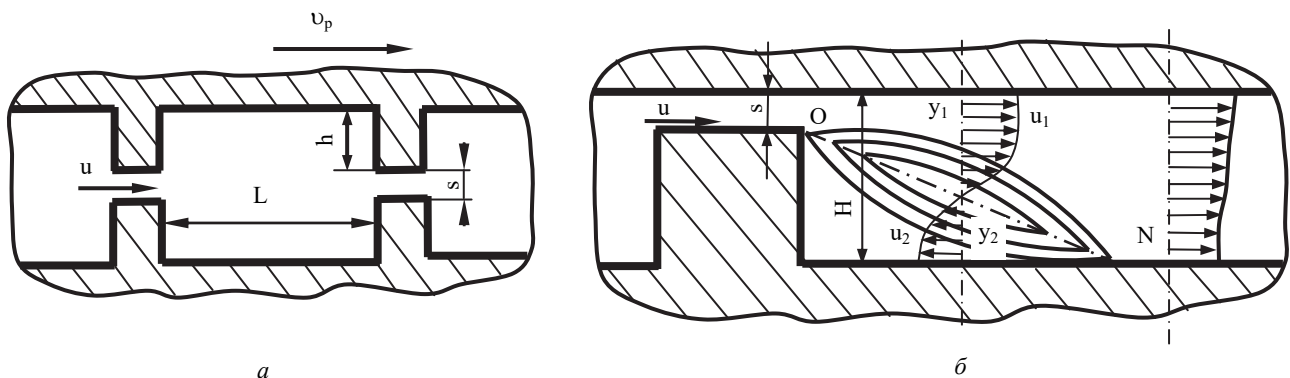


Рис. 1. Схема течения жидкости в ячейке:

а – для дисковой размалывающей машины; б – для плохообтекаемого тела (по Г. И. Абрамовичу)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА В ЯЧЕЙКАХ СТАТОРА УСТАНОВКИ

Для изучения профиля скорости потока волокнистой суспензии в циркуляционной зоне ячейки статора воспользуемся реологическим уравнением волокнистой суспензии и уравнением движения волокнистой суспензии в векторной форме в общем виде [1], которое спроектируем на оси прямоугольной системы координат:

на ось ОХ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ & = \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \times \\ & \times \left[e^{-\alpha_k} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \right]; \end{aligned}$$

на ось ОУ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ & = \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \times \\ & \times \left[\frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \right. \\ & \left. + e^{-\alpha_k} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) \right]; \quad (1) \end{aligned}$$

на ось ОZ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ & + \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \times \\ & \times \left[\frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + e^{-\alpha_k} \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Если к трем уравнениям в проекциях на оси прямоугольной системы координата (1) добавить уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

то они могут быть использованы для расчета поля скоростей в циркуляционной зоне ячейки статора.

Для решения задачи вводим следующие допущения:

1. Считаем движение суспензии в ячейке статора установившимся. Следовательно, можно принять,

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0.$$

2. Полагаем, что поток в ячейке имеет преобладание в направлении оси ОХ. Тогда можно пренебречь составляющими скорости по осям ОУ и ОZ, т. е. $v = w = 0$.

3. Массовыми силами в потоке можно пренебречь, т. е.:

$$\bar{F}_x = \bar{F}_y = \bar{F}_z = 0.$$

4. Поток является однородным по ширине и по ходу его движения, то есть, учитывая высокую диспергированность, имеем

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

В этом случае система уравнений движения жидкости значительно упрощается и приводится к виду

$$\left. \begin{aligned} 1. \quad 0 &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \frac{\partial u}{\partial y}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \\ 2. \quad 0 &= -\frac{\partial P}{\partial y}; \\ 3. \quad 0 &= -\frac{\partial P}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Второе и третье уравнения системы (3) говорят о постоянстве гидростатического давления по всей поверхности рассматриваемого сечения потока. Поэтому будем рассматривать профиль скорости, ограничившись первым уравнением системы (3), как предложено в [13].

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \frac{\partial u}{\partial y}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (4)$$

С учетом обозначений $\frac{\partial u}{\partial x} = \gamma$, $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial \gamma}{\partial y}$, выражение (4) принимает вид

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial y} + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial y}. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$\sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma}. \quad (6)$$

Получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma}. \quad (7)$$

Проинтегрируем уравнение (4)

$$\frac{\partial P}{\partial x} y = \frac{\mu}{2} \gamma + \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma} + c, \quad (8)$$

для чего при разложении экспоненциальной функции в ряд ограничимся первыми двумя членами:

$$e^{-\frac{\alpha_k}{2}\gamma} \approx 1 - \frac{\alpha_k}{2}\gamma. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} y = \frac{\mu}{2} \gamma + \sum_{k=1}^{n+1} A_k - \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} \gamma + c_1. \quad (10)$$

Введем граничные условия: $y = 0$, то $\gamma = 0$, тогда из уравнения (10) имеем

$$c_1 = -\sum_{k=1}^{n+1} A_k. \quad (11)$$

Подставляя значение c_1 в уравнение (10), получим:

$$\frac{\partial P}{\partial x} y = \frac{\mu}{2} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2}. \quad (12)$$

При повторном интегрировании (12) имеем:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 = \frac{\mu}{2} u - u \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} + c_2. \quad (13)$$

Учитывая, что на линии нулевых расходов в циркуляционной зоне ячейки статора скорость равна нулю, введем граничные условия: если $y = \delta$, то $u = 0$, где δ – толщина пограничного слоя циркуляционной зоны. Тогда из уравнения (13) имеем

$$c_2 = \frac{dP}{2dx} \delta^2. \quad (14)$$

Подставляя c_2 в уравнение (13) и преобразуя его, получим:

$$\frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - \delta^2) = 2u \left(\frac{\mu}{2} - \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} \right). \quad (15)$$

Обозначив $\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\Delta P}{\ell}$ [6] и подставив в уравнение (15) значение $\frac{\partial P}{\partial x}$, получим

$$-\frac{\Delta P}{\ell} (y^2 - \delta^2) = 2u \left(\frac{\mu}{2} - \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} \right). \quad (16)$$

Отсюда скорость движения волокнистой суспензии в циркуляционной зоне ячейки статора:

$$u = \frac{\Delta P \delta^2}{\ell \left(\mu - \sum_{k=1}^{n+1} \alpha_k A_k \right)} \left(1 - \frac{y^2}{\delta^2} \right). \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже упоминалось ранее, для волокнистых суспензий низкой концентрации (до 5 %) при достижении определенных значений градиентов скоростей, они будут двигаться аналогично ньютоновской жидкости, и её внутренние напряжения будут характеризоваться только вязкостным трением [1; 14–18].

В связи с этим, реологическое уравнение волокнистой суспензии (2) асимптотически приближается к прямой линии $\tau = \mu_T \gamma$, где γ – градиент скорости; μ_T – коэффициент динамической вязкости диспергированной суспензии.

С учетом этого, для отрывного двухмерного ламинарного потока профиль скорости в циркуляционной зоне ячейки статора можно представить с использованием метода Польгаузена [19]:

$$\frac{u}{u_1} = (2\eta - 3\eta^3 + \eta^4) + \left(\frac{\lambda}{\sigma} \right) (\eta - 3\eta^2 - \eta^4), \quad (18)$$

где u – скорость потока в пограничном слое циркуляционной зоны; u_1 – скорость потока выше границы пограничного слоя циркуляционной зоны.

$$\eta = \frac{y}{\delta} \leq 1, \quad (19)$$

где y – ордината точки в пограничном слое, для которой находится величина скорости; δ – толщина пограничного слоя в отрывном потоке.

Безразмерный параметр λ имеет смысл отношения сил давления к вязким силам, учитывает свойства конкретной жидкости, обтекающей тело

$$\lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (20)$$

Для отрывных потоков воды величина λ принимается равной (–12) [9; 19]. Подтверждением того, что для диспергированного потока при больших градиентах скоростей волокнистая масса низкой концентрации ведет себя при течении аналогично воде [1], явились наши экспериментальные исследования [20]. При изучении скоростных характеристик течения воды, а также волокнистой массы концентрацией $C = 0,2$ и 2 % оказалось, что величины δ для воды и массы и величины $\frac{\partial u}{\partial x}$ для этих жидкостей равны.

Исходя из этого, можно полагать, что при отрывном характере течения потока величина λ определяется преимущественно вязкостными характеристиками жидкости. Следует подчеркнуть, что формула (18) имеет смысл только для пограничных слоев, ограниченных циркуляционной зоной (пространство $0-y_1-N-y_2-0$) (рис. 1), где прилипание жидкости ко дну ячейки не проявляется.

Профиль скорости в исследуемой зоне рабочей камеры установки (рис. 2) свидетельствует о наличии высоких градиентов скорости внутри этой зоны и, следовательно, значительных касательных напряжениях сдвига, являющихся функцией градиентов скорости

$$\tau = f(\gamma), \quad (21)$$

где τ – касательное напряжение сдвига; γ – градиент скорости потока.

Кроме касательных сдвиговых напряжений, в отрывном потоке имеют место турбулентные касательные напряжения, вызванные поперечными пульсациями скорости относительно осредненной скорости движения потока [8; 9; 19].

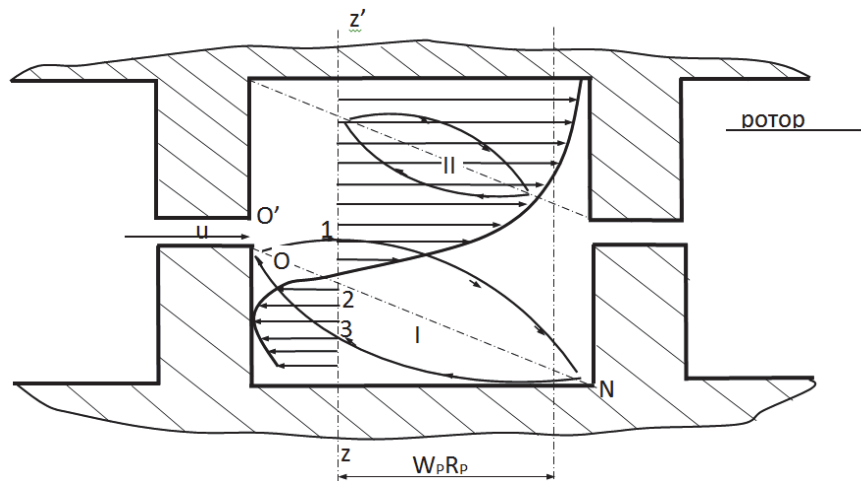


Рис. 2. Модель течения потока в рабочей камере установки:

1 – циркуляционная зона в ячейке статора; 2 – циркуляционная зона в ячейке ротора

Величины напряжений в потоке с интенсивным перемешиванием могут быть определены из выражения [1]

$$\tau_{\text{турб}} = (T + \mu)\gamma, \quad (22)$$

где T – динамический коэффициент турбулентного перемешивания потока, который согласно [8] оценивается величиной обратной скорости потока и во много раз превосходит величину μ .

Исходя из проведенных нами экспериментальных исследований, величина γ для воды и волокнистой массы $c = 0,2$ и 2% отличается незначительно, как и максимальные обратные скорости потока.

Отсюда можно заключить, что $\tau_{\text{турб}}$ для волокнистых масс в исследованном нами диапазоне концентраций ($c = 0,2 \div 2\%$) можно оценивать по величине $\tau_{\text{турб}}$ для воды.

Для расчета $\tau_{\text{турб}}$ в отрывной расширяющейся струе воспользуемся методом, предложенным Бруссиным [19] по аналогии с ньютоновским законом трения в ламинарном потоке:

$$\tau_{\text{турб}} = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (23)$$

где ε – коэффициент кинематической вязкости потока.

Согласно теории отрывных потоков, предложенной Прандтлем [9] величина ε определяется из уравнения

$$\varepsilon = xb(u_m - u_n), \quad (24)$$

где b – толщина циркуляционной зоны, определяемая из выражения $b = (y_1 - y_2)$ (рис. 1); u_m – величина скорости потока на границе пограничного слоя; u_n – величина обратной скорости потока в циркуляционной зоне; x – эмпирическая постоянная, взятая из теории Прандтля [8], равная $0,0088$.

Для зоны смешения при определении $\tau_{\text{турб}}$ необходимо получить величину E , эквивалентную коэффициенту кинематической вязкости и называемую коэффициентом турбулентной вязкости E [9].

$$E = 1,25 \cdot 10^{-3} \frac{(u_1 - u_2)^2}{u_1 - u_2} x, \quad (25)$$

где x – координата по длине зоны смешения.

Тогда

$$\tau_{\text{турб}} = \rho E \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (26)$$

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА В ЯЧЕЙКАХ РОТОРА УСТАНОВКИ

Сделаем следующие предположения:

1. Течение жидкости в ячейках ротора, как и в ячейках статора, имеет диспергированный характер в связи с высоким градиентом скорости потока. Возможные модели течения потока в ячейках ротора представлены на рис. 2.

2. Скорость вращения ротора v_p значительно выше осредненной скорости течения потока волокнистой массы в межножевом зазоре u_1 .

При этом в ячейке ротора за счет срыва потока с ножа будет иметь место циркуляционная зона, направление вращения которой будет противоположно направлению осредненной скорости потока u_1 . Интенсивность смешения в этой зоне определяется величиной $\Delta u = (v_p - u_1)$.

Предполагаемый профиль скорости потока в ячейке ротора для рассматриваемого случая представлен на рис. 2. При этом максимальное гидродинамическое воздействие на волокно оказывается в ячейках ротора и статора, градиент скорости потока в межножевом зазоре будет значительно ниже вследствие того, что вихрь в ячейке ротора вращается в сторону, противоположную направлению скорости в межножевом зазоре.

3. Величина v_p незначительно выше скорости u_1 . При этом в ячейке ротора будет существовать циркуляционная зона слабой интенсивности, либо ее не будет совсем. Характер течения потока в ячейке ротора будет определяться скоростью вращения ротора, и эпюра скоростей в рассматриваемой зоне будет иметь вид, представленный на рис. 2. Гидродинамическое воздействие на волокно осуществляется в ячейках статора и межножевом зазоре установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Течение волокнистой суспензии в ячейках статора представляет собой отрывное обтекание шероховатой поверхности с образованием циркуляционных зон интенсивного смешения. В ячейках ротора циркуляционные зоны характеризуются слабой интенсивностью.

2. На основании теоретического анализа течения волокнистой суспензии в циркуляционных зонах ячеек статора и ротора, определены скоростные характеристики и возникающие при этом касательные напряжения, которые могут оказать определенное воздействие на разработку волокна.

3. Первоначально сделанные предположения о возможном механизме разрушения волокон за счет гидродинамических сил, возникающих при течении волокнистой суспензии в рабочих органах ножевых машин, дополнительно подтверждаются проведенным теоретическим анализом скоростных и силовых характеристик при течении волокнистой суспензии в ячейках между ножами гарнитуры дисковой мельницы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М. : Лесная пром-сть, 1980. 248 с.
2. Непенин Ю. Н. Технология целлюлозы. В 3 т. Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. М. : Лесная пром-сть, 1990. 600 с.
3. Гаузе А. А., Гончаров В. Н., Кугушев И. Д. Оборудование для подготовки бумажной массы : учебник для вузов. Москва : Экология, 1992. 352 с.
4. Пузырев С. С., Коростелев С. А., Ковалева О. П. Размол при низкой концентрации // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 5. С. 54–58.
5. Фляте Д. М. Свойства бумаги. СПб. : Лань, 2012. 384 с.
6. Крюков В. Н., Солнцев В. П. Исследование теплообмена на шероховатой пластине // Тепло- и массоперенос : сб. тр. Минск, 1972. Т. 1, ч. 1. С. 57–61.
7. Смирнов Л. В. Характеристика пульсаций давления в зоне отрывного напорного потока // Труды НИИ Гидропроект. 1972. Сб. 23. С. 84–93.
8. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960. 715 с.
9. Николаев Н. А., Харин В. Ф. Гидродинамические закономерности пленочного течения жидкости по шероховатой поверхности // Теоретические основы химической технологии. 1974. Т. 8, № 5. С. 712–719.
10. Островский Г. М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб. : Наука, 2000. 359 с.
11. Войнов Н. А., Фролов А. С., Жукова О. П. Анализ параметров обратных токов и газосодержания в жидкости за выступом шероховатости // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53, № 2. С. 160–167.
12. Method for Intensive Gas-Liquid Dispersion in a Stirred Tank / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova [et al.] // ChemEngineering. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 30. DOI: 10.3390/chemengineering7020030.

13. Bill F., Stiwers K. Theorie und Praxis des Mahlens // Wochenblatt fur Papierfabrikation. Berlin, 1911. S. 47–48.

14. Алашкевич Ю. Д., Кугушев И. Д. К вопросу об исследовании процесса размола бумажной массы на ножевых размалывающих машинах // Краткие сообщения / ЛТИ им. Ленсовета. Секция инженерной химической техники. Ленинград, 1970. С. 13–15.

15. Алашкевич Ю. Д., Селедчик В. В., Кугушев И. Д. Гидродинамика процесса размола на ножевых размалывающих машинах // Сб. тр. ЦНИИБ. 1971. Вып. 6. С. 181–188.

16. Теоретическое исследование процесса измельчения материала в рабочей камере дисковой мельницы / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, Д. А. Беляев, Е. А. Бороздин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 11. С. 125–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131

17. Алашкевич Ю. Д., Решетова Н. С. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли : учеб. пособие. Красноярск : СибГТУ, 2015. 317 с.

18. Петрова А. А., Алашкевич Ю. Д., Воронин И. А. Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на отдельные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готового продукта // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 429–435. DOI: 10.14258/jcprm.20230412552

19. Чжен П. Отрывные течения. В 3 т. / пер. с англ. под ред. А. Ю. Ишлинского. Москва : Мир, 1972. Т. 1–2. 552 с.

20. Гидродинамические явления при размолке волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах : монография / Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова, В. П. Барановский, Л. В. Кутовая. Красноярск : СибГТУ, 2003. 176 с.

REFERENCES

1. Terent'ev, O. A. Gidrodinamika voloknisty'x suspenzij v cellyulozno-bumazhnom proizvodstve. M. : Lesnaya prom-st', 1980. 248 s.
2. Nepenin Yu. N. Tekhnologiya cellyulozy'. V 3 t. T. 2. Proizvodstvo sul'fatnoj cellyulozy' : ucheb. posobie dlya vuzov. 2-e izd., pererab. M. : Lesnaya prom-st', 1990. 600 s.
3. Gauze A. A., Goncharov V. N., Kugushev I. D. Oborudovanie dlya podgotovki bumazhnoj massy' : uchebnik dlya vuzov. M. : E'kologiya, 1992. 352 s.
4. Puzyrev S. S., Korostelev S. A., Kovaleva O. P. Razmol pri nizkoj koncentracii // Cellyuloza. Bumaga. Karton. 2006. № 5. S. 54–58.
5. Flyate D. M. Svoystva bumagi. SPb. : Lan', 2012. 384 s.
6. Kryukov V. N., Solncev V. P. Issledovanie teploobmena na sheroxovatoj plastine // Teplo- i massopereenos : sb. tr. Minsk, 1972. T. 1, ch. 1. S. 57–61.
7. Smirnov L. V. Karakteristika pul'sacij davleniya v zone otr'yvnogo napornogo potoka // Trudy' NII Gidroproekt. 1972. Sb. 23. S. 84–93.
8. Abramovich G. N. Teoriya turbulentny'x struj. M. : Fizmatgiz, 1960. 715 s.
9. Nikolaev N. A., Xarin V. F. Gidrodinamicheskie zakonomernosti plenochного techeniya zhidkosti po

sheroxovatoj poverxnosti // Teoreticheskie osnovy` ximicheskoy texnologii. 1974. T. 8, № 5. S. 712–719.

10. Ostrovskij G. M. Prikladnaya mexanika neodnorodny`x sred. SPb. : Nauka, 2000. 359 s.

11. Vojnov N. A., Frolov A. S., Zhukova O. P. Analiz parametrov obratny`x tokov i gazosoderzhaniya v zhidkosti za vy`stupom sheroxovatosti // Teoreticheskie osnovy` ximicheskoy texnologii. 2019. T. 53, № 2. S. 160–167.

12. Method for Intensive Gas–Liquid Dispersion in a Stirred Tank / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova [et al.] // ChemEngineering. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 30. DOI: 10.3390/chemengineering7020030

13. Bill F., Stiwen K. Theorie und Praxis des Mahlens // Wochenblatt fur Papierfabrikation. Berlin, 1911. S. 47–48.

14. Alashkevich Yu. D., Kugushev I. D. K voprosu ob issledovanii processa razmola bumazhnoj massy` na nozhevy`x razmaly`vayushhix mashinax // Kratkie soobshheniya / LTI im. Lensoвета. Sekciya inzhenernoj ximicheskoy texniki. Leningrad, 1970. S. 13–15.

15. Alashkevich Yu. D., Seledchik V. V., Kugushev I. D. Gidrodinamika processa razmola na nozhevy`x razmaly`vayushhix mashinax // Sb. tr. CzNIIB. 1971. Vy`p. 6. S. 181–188.

16. Teoreticheskoe issledovanie processa izmel`cheniya materiala v rabochej kamere diskovoj mel`nicy / I. A. Semikopenko, V. P. Voronov, D. A. Belyaev, E. A. Borozdin // Vestnik BGTU im. V. G. Shuxova. 2020. № 11. S. 125–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131.

17. Alashkevich Yu. D., Reshetova N. S. Teoriya i konstrukciya mashin i oborudovaniya otrasli : ucheb. Posobie. Krasnoyarsk : SibGTU, 2015. 317 s.

18. Petrova A. A., Alashkevich Yu. D., Voronin I. A. Vliyanie risunka kombinirovannoj garnitury` diskovoj mel`nicy na otdel`ny`e bumagoobrazuyushhie svoystva voloknisty`x polufabrikatov i fiziko-mexanicheskie xarakteristiki gotovogo produkta // Ximiya rastitel`nogo sy`r`ya. 2023. № 4. S. 429–435. DOI: 10.14258/jcprm.20230412552

19. Chzhen P. Otry`vny`e techeniya. V 3 t. / per. s angl. pod red. A. Yu. Ishlinskogo. M. : Mir, 1972. T. 1–2. 552 s.

20. Gidrodinamicheskie yavleniya pri razmole voloknisty`x polufabrikatov v nozhevy`x razmaly`vayushhix mashinax : monografiya / Yu. D. Alashkevich, N. S. Reshetova, V. P. Baranovskij, L. V. Kutovaya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 176 s.

© Алашкевич Ю. Д., Решетова Н. С., 2026

Поступила в редакцию 01.04.2026

Принята к печати 26.06.2026

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 547.992.3+674.81

DOI: 10.64430/1993-0135-2026-3-135-144

Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 3. С. 135–144

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПЛАСТИКОВ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ

А. В. Артёмов¹, В. Г. Буриндин¹, А. С. Ершова¹, А. Е. Шкуро¹,
Ю. Л. Юрьев¹, С. Н. Пазникова²

¹Уральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
E-mail: artemovav@m.usfeu.ru

²Уральский государственный институт ГПС МЧС России
Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22

Целью работы являлось исследование электронной структуры и детальный анализ реакционных центров модельных фрагментов лигнина H-типа методом теории функционала плотности (DFT). Это позволило оценить распределение электронной плотности и определить наиболее реакционноспособные позиции в молекулах данного типа лигнина, что необходимо для выявления взаимосвязи между структурными особенностями и реакционной способностью в процессах его химической активации. Полученные результаты легли в основу установления закономерностей формирования лигноцеллюлозных пластиков без связующих (ПБС) на основе растительного (травянистого) сырья. Анализ возможных механизмов участия химических активаторов в активации природного лигнина показал, что их выбор критически влияет на структуру формируемых ПБС и должен учитывать электронную природу реакционных центров лигнина исходного растительного сырья.

Ключевые слова: природный лигнин, H-лигнин, квантово-химическое моделирование, теория функционала плотности (DFT), растительное сырьё, композиционные материалы, лигноцеллюлозный пластик, без связующего.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 135–144

QUANTUM-CHEMICAL STUDY OF THE MECHANISMS OF LIGNOCELLULOSE PLASTICS FORMATION WITHOUT RESINS

A. V. Artyomov¹, V. G. Buryndin¹, A. S. Yershova¹, A. E. Shkuro¹,
Yu. L. Yuryev¹, S. N. Paznikova²

¹The Ural State Forest Engineering University
37, Sibirskiy trakt, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation
e-mail: artemovav@m.usfeu.ru

²The Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia
22, Mira str., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation

The aim of the work was to study the electronic structure and to carry out a detailed analysis of the reaction centers of model fragments of H-type lignin by the density functional theory (DFT). This made it possible to estimate the distribution of the electron density and to determine the most reactive positions in the molecules of this type of lignin, which is necessary to reveal the relationship between structural features and reactivity in the processes of its chemical activation. The results obtained formed the basis for establishing the patterns of formation of lignocellulose plastics without resins (PWR) based on plant (herbaceous) raw materials. An analysis of the possible mechanisms of chemical activators' participation in the activation of natural lignin has shown that their choice critically affects the structure of the formed PWR and should take into account the electronic nature of the lignin reaction centers in the initial plant raw material.

Keywords: natural lignin, H-lignin, quantum chemical modeling, density functional theory (DFT), plant raw materials, composite materials, lignocellulose plastic, without resins.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно подробно изучены процессы делигнификации в различных процессах варки целлюлозы. При этом происходит деструкция лигнина и перевод его в растворимое состояние [1–4].

Отличительной особенностью при формировании лигноцеллюлозных пластиков без связующих веществ (ПБС) является химическая активация лигноуглеводного комплекса (ЛУК) с образованием функциональных групп способных участвовать в реакциях поликонденсации с образованием трехмерной структуры [5].

На основании литературного анализа [6–9] и проведенных ранее исследований сотрудниками кафедры ТЦБПиПП УГЛТУ [10–12] установлено, что для такой трансформации ЛУК распространение получили химические активаторы как уротропин (гексаметилентетрамин), карбамид (мочевина) и пероксид водорода.

Каждый из представленных выше химических активаторов обладает своим уникальным механизмом взаимодействия с компонентами конкретного растительного сырья, включая хвойную и лиственную древесину, а также травянистые растения.

В литературных и ранее полученных экспериментальных данных, были рассмотрены следующие механизмы взаимодействия и/или активации компонентов растительного сырья (в первую очередь лигнина) с рассматриваемыми химическими активаторами.

Так, например, уротропин в условиях пьезотермобработки влажного лигноуглеводного сырья разлагается с образованием формальдегида, который при взаимодействии с растительным лигнином образует сшитый трехмерный полимер [10].

Карбамид, в свою очередь, вступает в реакцию с лигнином по принципу реакции нуклеофильного замещения. Реакция идет в двух конкурирующих направлениях: 1 – деструкция – разрушение связей между глобулами лигнина и 2 – поликонденсация – образование новых С–С-связей между макромолекулами лигнина за счёт взаимодействия функциональных групп в различных структурных единицах одной и той же макромолекулы. При меньшей температуре доминирует процесс деструкции лигнина, при температуре выше 170 °С – поликонденсация [9].

Пероксид водорода и перуксусная кислота применяются при варке древесины органосольветным способом. Воздействие пероксида водорода на растительное сырье в таком случае соответствует процессам делигнификации. Представляет научный интерес влияние пероксида водорода на процесс химической активации ЛУК. От количества пероксида будет зависеть степень деструкции лигнина, которая сопровождается открытием структуры и реакционной способности его функциональных групп [11; 12].

Таким образом, выбор химического активатора растительного лигнина зависит не только от условий пьезотермической обработки растительного сырья и требуемых физико-механических свойств ПБС, но и от вида используемого растительного сырья (хвойная и лиственная древесина, травянистые растения), которое определяет массовое содержание лигнина, а также тип и соотношение этих лигнинов.

Для активации определенного типа лигнина, обладающего в данном растительном сырье, важно учитывать химический состав и свойства каждого вида лигнина. Растительные формы содержат разное количество лигнина в зависимости от происхождения и принадлежности, при этом обладают разными структурными особенностями и характеристиками. Это можно объяснить тем, что лигнин построен из субъединиц трех типов: п-гидроксифенильных (Н), гваяцильных (G) и сиренгильных (S) [13].

Распределение структурных единиц различных типов для растений различного биологического происхождения [14; 15], (S:G:H, %): хвойные породы 0-1:90-95:0,5-3,4, лиственные породы 50-75:20-50: следы, травянистые 25-50:25-50:10-25.

Превращения лигнина целесообразно подразделять на два типа: реакции структурных фрагментов и реакции полимерной цепи [16]. В числе главных реакций структурных фрагментов, играющих важную роль в процессах делигнификации, следует назвать: а) нуклеофильное замещение; б) нуклеофильное присоединение; в) β-элиминирование. К реакциям полимерной цепи относятся: а) деструкция полимерной цепи; б) реакции конденсации. Под реакциями конденсации обычно принято понимать превращения лигнина в присутствии кислот и оснований, приводящие к образованию в макромолекуле новых углерод-углеродных связей.

Помимо реакционноспособных положений в ароматическом кольце, реакционными центрами для химической полимеризации в структуре лигнина являются фенольные и алифатические гидроксильные группы (рис. 1) [17].

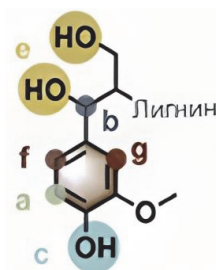


Рис. 1. Примеры распространённых способов химической полимеризации лигнина с помощью сшивания [17]: гидроксиметилирование (а), сульфонирование (а), нитрование (а), азо-сшивки (а), метилирование (а), фенолят (b), пропиленоксид, полиэтиленгликоль, поли-диглицидиловый эфир (с, е), формальдегид (f, g)

На сегодня выполнено ряд исследований [18–20] методами квантовой химии посвященных изучению сложной структуры лигнинов и влияния этой структуры на их реакционную способность, механизмов полимеризации молекул монолигнолов. Имеются работы по изучению строения и свойств предшественников лигнина. Были предприняты попытки с помощью квантовой химии выявить реакционноспособные участки в монолигнолах, чтобы предсказать, как протекает процесс полимеризации.

В исследовании [21] теоретически были исследованы синапиловый спирт, п-кумариловый спирт и

кониFERиловый спирт. Молекулярная геометрия и молекулярные структурные параметры монолигнолов определяли с использованием метода теории функционала плотности (DFT/B3LYP) с базисным набором 6-31G (d, p). Также этим методом были рассчитаны масштабированные колебательные частоты и химические сдвиги монолигнолов. Молекулярные структуры монолигнолов в основном состоянии были оптимизированы с использованием метода Гаусса 09. Была рассчитана энергетическая щель между LUMO (низшая свободная молекулярная орбиталь) и HOMO (высшая занятая молекулярная орбиталь). Трехмерные графики LUMO и HOMO для монолигнолов показаны на рис. 2.

Особенности энергетической щели (разрыва между HOMO и LUMO) позволяют делать выводы о свойствах молекулы:

- большая энергетическая щель свидетельствует о прочности молекулярной структуры и низкой поляризуемости (такие молекулы относят к «твёрдым» с точки зрения химической активности). Для их возбуждения требуется значительное количество энергии;

- малая энергетическая щель или её отсутствие указывает на хрупкость структуры (низкая кинетическая стабильность) и высокую химическую активность молекулы. Такие соединения относят к «мягким» и характеризуют повышенной поляризуемостью.

В синапиловом, кониFERиловом и п-кумариловом спиртах величина энергетической щели HOMO-LUMO составила 4,63, 4,70 и 4,79 эВ соответственно, что свидетельствует о том, что перенос заряда происходит в большей степени внутри синапиловых спиртов. Индекс электрофильности синапиловом, кониFERиловом и п-кумариловом спиртах составил – 1,647, 1,93, 2,089. П-кумариловый спирт обладает наиболь-

шим значением индекса электрофильности. Поэтому он наиболее склонен к участию в реакциях электрофильного замещения или присоединения, т. е. увеличение числа метоксигрупп в молекуле уменьшает её электрофильность, поскольку они эффективно рассеивают положительный заряд, снижая вероятность реакций электрофильного характера [21].

Таким образом, п-кумариловый спирт (монолигнол Н-типа), преобладающе содержащийся в травянистых растениях, проявляет наибольшую реакционную способность в электрофильных процессах среди рассмотренных соединений. Это делает его наиболее вероятным участником начальных стадий полимеризации лигнина, протекающих по механизму электрофильного замещения в ароматическом кольце [22].

На основании полученных данных можно заключить, что реакционная способность природного лигнина напрямую зависит от степени замещения ароматического кольца. Наличие свободных орто-положений (характерное для п-кумариловых фрагментов) создает условия для эффективной химической активации молекулы. Благодаря сильному электронодонорному эффекту фенольного гидроксила, данные позиции ароматического кольца приобретают высокий уровень электронной плотности. Это активирует данные позиции для электрофильной атаки химическими активаторами и последующей инициации процессов конденсации или полимеризации.

Основная цель работы заключается в исследовании и сравнительном анализе структурных и электронных характеристик модельных фрагментов лигнина Н-типа с различными типами заместителей методом теории функционала плотности (DFT) для определения реакционной способности лигнина Н-типа при взаимодействии с химическими активаторами.

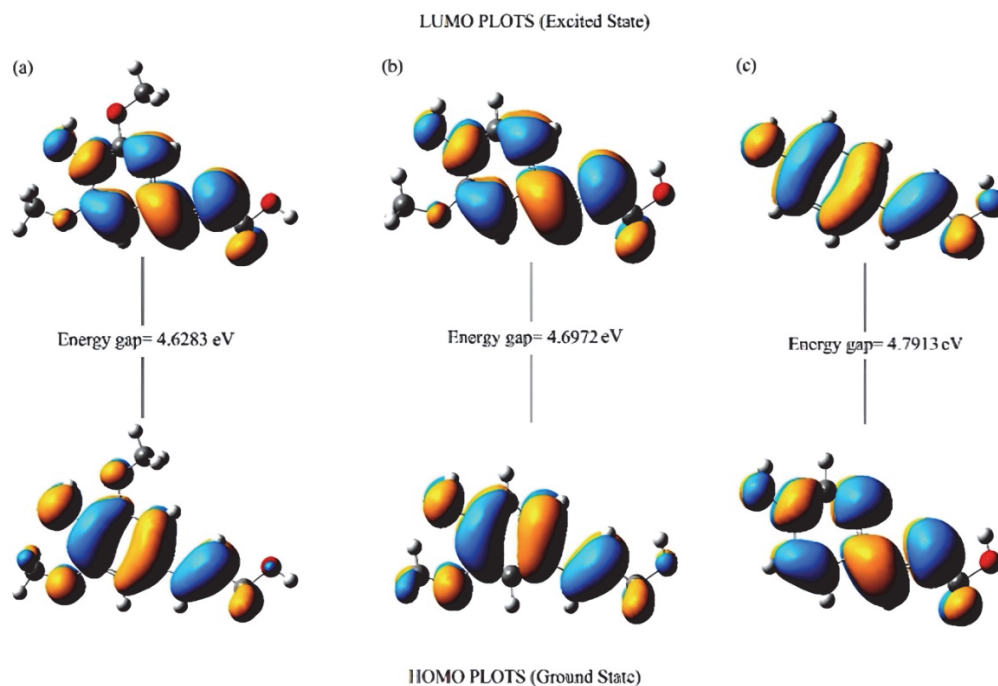


Рис. 2. Граничные молекулярные орбитали (LUMO и HOMO) и энергетическая щель для синапилового (а), кониFERилового (b) и п-кумарилового спиртов (с) [21]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Квантово-химический анализ фрагментов лигнина Н-типа в составе ЛУК, представляющих собой более сложные и разветвлённые структуры по сравнению с монолигнолами, был выполнен с применением теории DFT.

Основной задачей проведенного квантово-химического анализа являлось:

- определение влияния природы заместителей (алкильных и/или ароматических) на электронные и геометрические характеристики модельных фрагментов лигнина Н-типа;
- оценка относительной реакционной способности различных структурных звеньев в присутствии различных химических активаторов;
- прогнозирование механизмов взаимодействия активирующих химических активаторов с природным лигнином;
- идентификация факторов, влияющих на эффективность химического преобразования лигнина в условиях активации.

Исходные структуры лигнина Н-типа представляли собой модельные фрагменты, содержащие различные комбинации заместителей (рис. 3):

- алкил-арильные фрагменты (Alk – Ar);
- арил-арильные фрагменты (Ar – Ar)

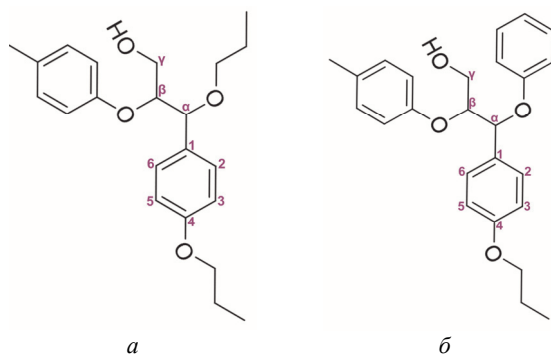


Рис. 3. Структурные фрагменты звеньев лигнина Н-типа с различными типами заместителей:
а – алкил-арильный; б – арил-арильный

Структуры лигнина (его модельных фрагментов) различными типами заместителей Alk – Ar и Ar – Ar) подготавливались с помощью программы Open Babel,

которая позволяют эффективно обрабатывать и оптимизировать молекулярные системы различной степени сложности [23].

Расчёты электронной структуры выполнялись в пакете ORCA 6.0.0 на уровне теории DFT PBE0/def2-TZVP [24–26]. При проведении работ был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН.

В качестве химических активаторов изучаемых соединений лигнина были рассмотрены уротропин (гексаметилентетрамин), карбамид (мочевина) и пероксид водорода.

Сопоставление осуществлялось между самими фрагментами звеньев лигнина Н-типа с разными типами заместителей Alk – Ar и Ar – Ar, а также между этими фрагментами и выбранными химическими активаторами (уротропином, карбамидом и пероксидом водорода).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были рассмотрены и проанализированы структурные фрагменты лигнина Н-типа (ФЛ-Н) с различными заместителями – алкильными (Alk) и/или ароматическими (Ar) (рис. 3).

Сравнительный анализ изучаемых модельных фрагментов лигнина представлен в табл. 1.

Структурные особенности ФЛ-Н демонстрируют существенные различия в зависимости от типа заместителя: ФЛ-Н Ar – Ar характеризуется более высокой степенью конденсации за счёт дополнительного арильного заместителя.

Данные структуры предварительно минимизировались по энергии с целью нахождения равновесной конформации, что обеспечивало получение физически обоснованных результатов расчетов. Оптимизация молекулярной геометрии модельных ФЛ-Н с различными типами заместителей показана на рис. 4 с использованием схемы нумерации атомов.

Координаты атомов различаются по пространственному расположению и обе молекулы имеют сложную структуру. Алкильные и арильные заместители создают объёмную структуру, способствующую образованию трёхмерной сетки в лигнине. Различия в пространственной организации (асимметрия молекулярной структуры) и в функциональных группах влияют на межмолекулярные взаимодействия и вносят основной вклад в различие реакционной способности центров для одного типа лигнина [27].

Таблица 1
Сравнительный анализ модельных ФЛ-Н с различными типами заместителей

Функциональные группы	Тип связи	Фрагмент		Примечание
		Alk – Ar	Ar – Ar	
Метоксильные группы (–OCH ₃)	C3–OCH ₃ / C5–OCH ₃	Отсутствуют	Отсутствуют	лигнин Н-типа
Гидроксильные группы (–OH) (фенольная)	C4–OH	C4–O–Alk	C4–O–Alk	в виде простой эфирной связи
Карбонильные группы (–C=O) (кетонная)	Cα=O	Cα – O – Alk	Cα – O – Ar	в виде простой эфирной связи
	Cβ=O	Cβ – O – Ar	Cβ – O – Ar	в виде простой эфирной связи
Гидроксильные группы (–OH) (спиртовая)	Cγ–OH	Cγ – CH ₂ –OH	Cγ – CH ₂ –OH	–

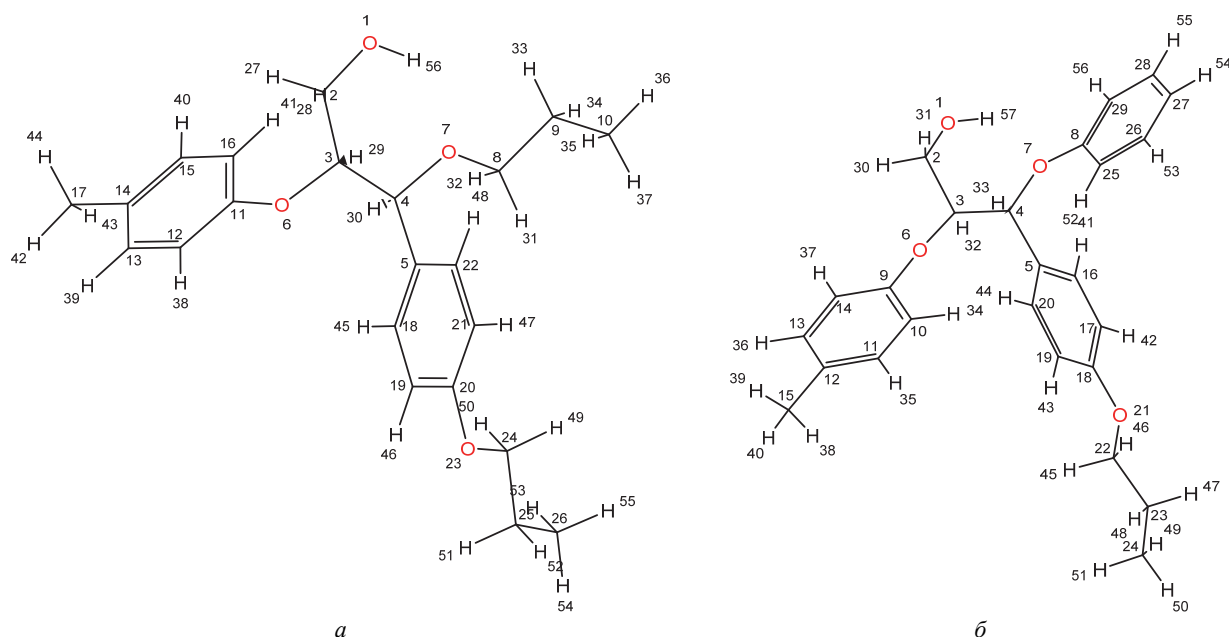
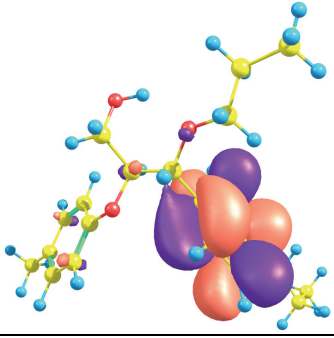
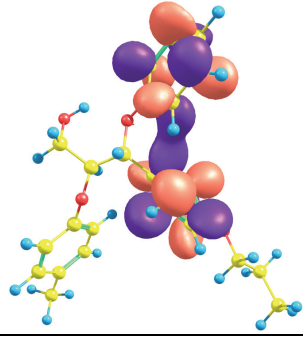
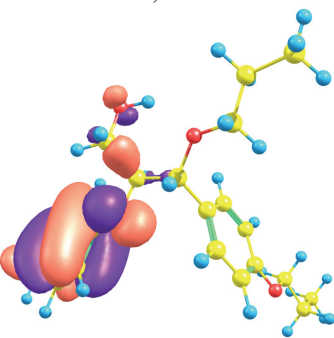
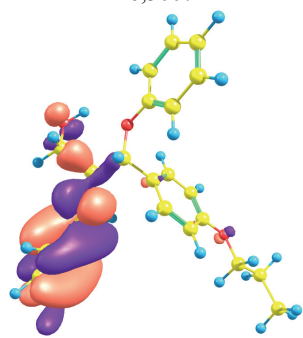


Рис. 4. Оптимизированные молекулярные модели ФЛ-Н с различными типами заместителей:
a – алкил-арильный; *б* – арил-арильный

Таблица 2

Энергетические характеристики молекулярных орбиталей соединений ФЛ-Н

Параметр	Фрагмент	
	Alk – Ar –0,3183	Ar – Ar –0,4329
LUMO, эВ		
HOMO, эВ		
ΔE, эВ	5,7626	5,8678

Анализ энергетических уровней HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) и LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) позволяет прогнозировать свойства молекул и их поведение при химических реакциях. Теоретический анализ электронной структуры рассматриваемых соединений в данной работе основан на расчёте энергий HOMO и LUMO и

величины энергетической щели ΔE. Выбранный уровень теории позволяет с высокой степенью достоверности интерпретировать полученные данные по энергии HOMO-LUMO [28; 29].

HOMO и LUMO, образуют пару так называемых фронтальных (пограничных) молекулярных орбиталей (FMO), которые определяют реакцию способ-

ность молекулы. НОМО, выступая в роли донора электронов, характеризует способность молекулы отдавать электроны, тогда как LUMO, функционируя как акцептор электронов, отражает способность молекулы принимать электроны.

Разница между показателями НОМО и LUMO является важным параметром, определяющим химическую стабильность молекулы. Энергетические значения НОМО и LUMO, а также величина энергетической щели между ними, влияют на кинетическую стабильность молекулы, характер химических реакций, в которых участвует соединение, на поляризуемость молекулы, химическую твердость или мягкость соединения.

Результаты расчетов энергии и распределения электронной плотности граничных молекулярных орбиталей (трехмерные графики LUMO и НОМО), а также ширины запрещенной зоны (ΔE) рассматриваемых соединений показаны в табл. 2.

Согласно табл. 2, с точки зрения донорной способности, основанной на НОМО, свидетельствует о том, что ФЛ-Н Alk – Ar является лучшим донором электронной плотности, в то время как ФЛ-Н Ar – Ar занимает более низкую позицию. В отношении акцепторной способности, оцениваемой по LUMO, ФЛ-Н Ar – Ar более эффективно принимает электронную плотность и лучше подходит для нуклеофильных атак. Таким образом, ФЛ-Н Ar – Ar имеет более низкую энергию по LUMO, что делает его менее эффективным донором, но более подходящим акцептором.

Величина энергетической щели НОМО-LUMO для ФЛ-Н Alk – Ar составила – 5,77 эВ. Поскольку чем меньше эта величина, тем легче осуществляется перенос электронов, ФЛ-Н Alk – Ar обладает повышенной реакционной способностью и способна быстрее и эффективнее вступать в реакции, связанные с переносом заряда. Это особенно важно для соединений типа лигниновых эфиров, для которых характерны именно такие процессы, включая окисление-восстановление и донорно-акцепторные взаимодействия [30]. Таким образом, если рассматривать общую химическую «мягкость» и потенциальную реакционную способность на основании ΔE , ФЛ-Н Alk – Ar является наиболее реакционноспособным в целом, тогда как ФЛ-Н Ar – Ar проявляет большую устойчивость.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Химическая активация уротропином

Для фенольных соединений, входящих в состав природного лигнина, уротропин служит источником метиленовых групп (связи $-\text{CH}_2-$). В реакциях с фенолами, имеющими свободную орто-позицию, уротропин инициирует образование межмолекулярных связей между фенольными молекулами посредством метиленовых мостиков.

Формальдегид (образующийся при термическом разложении уротропина) способен участвовать в реакции электрофильного замещения S_E . Для рассматриваемых ФЛ-Н наиболее вероятны две ключевые зоны реакции с уротропином:

– ароматические положения орто- и пара-положений по отношению к фенольному кислороду (ОН) и метоксильным/эфирным заместителям (ОР);

– бензильные атомы углерода рядом с О.

Реакция поликонденсации протекает аналогично получению фенолоформальдегидных смол (рис. 5).

По ожидаемой склонности химической активации ФЛ-Н Alk – Ar > ФЛ-Н Ar – Ar, поскольку первая структура обладает более выраженными донорными свойствами и, следовательно, легче подвергается атаке электрофильными метилирующими агентами.

2. Химическая активация карбамидом

Карбамид обладает амидной группой, которая может действовать как слабый нуклеофил. В водных растворах карбамид подвергается гидролизу, высвобождая аммиак. Аммиак, будучи сильным нуклеофилом, вступает в реакцию с электрофильными центрами лигнина, такими как альдегидные и кетонные группы.

Следовательно, в рассматриваемых структурах карбамид будет взаимодействовать прежде всего с:

- гидроксильным О1 и его протоном,
- эфирными О6, О7, О23,
- дополнительными С12, С15, С16, С19, С21, С22

у более функционализированных участков.

Аммиак вступает в последующие химические взаимодействия с компонентами лигнина, что приводит к формированию новых функциональных групп и изменению химического состава исходных соединений. В результате реакции с аммиаком образуются амины, амины или другие азотосодержащие компоненты (рис. 6).

По силе такого взаимодействия ФЛ-Н Alk – Ar $\approx$ ФЛ-Н Ar – Ar.

3. Химическая активация пероксидом водорода

Из-за слабой связи атомов кислорода молекула H_2O_2 термодинамически неустойчива и может самопроизвольно разлагаться с образованием воды и кислорода. Согласно литературным данным, в кислой среде пероксид водорода разлагается при температуре до 180 °С по схеме: $2\text{H}_2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$.

Для фенольных лигниновых структур H_2O_2 в кислой среде действует через гидропероксид-анион HO_2^- . Основными процессами являются окислительное расщепление эфирных связей между фенольными единицами, гидроксилирование ароматических ядер с образованием дополнительных фенольных гидроксильных групп, а также окисгенирование боковых цепей с образованием кетонных, альдегидных и карбоксильных групп.

Для рассматриваемых ФЛ-Н наиболее вероятные зоны атаки H_2O_2 :

- фенольный узел О1;
- активированные орто/пара-позиции кольца;
- бензильные атомы углерода рядом с эфирным кислородом.

Под воздействием пероксида водорода в кислой среде происходит окислительное преобразование лигнина, сопровождающееся образованием реакционноспособных продуктов (рис. 7). Пьезотермическая обработка ускоряет процессы окислительной деструкции с последующей поликонденсацией, способствуя созданию сетчатых структур из продуктов окисления лигнина.

По ожидаемой восприимчивости к окислению: ФЛ-Н Ar – Ar > ФЛ-Н Alk – Ar (из-за наиболее низкого LUMO).

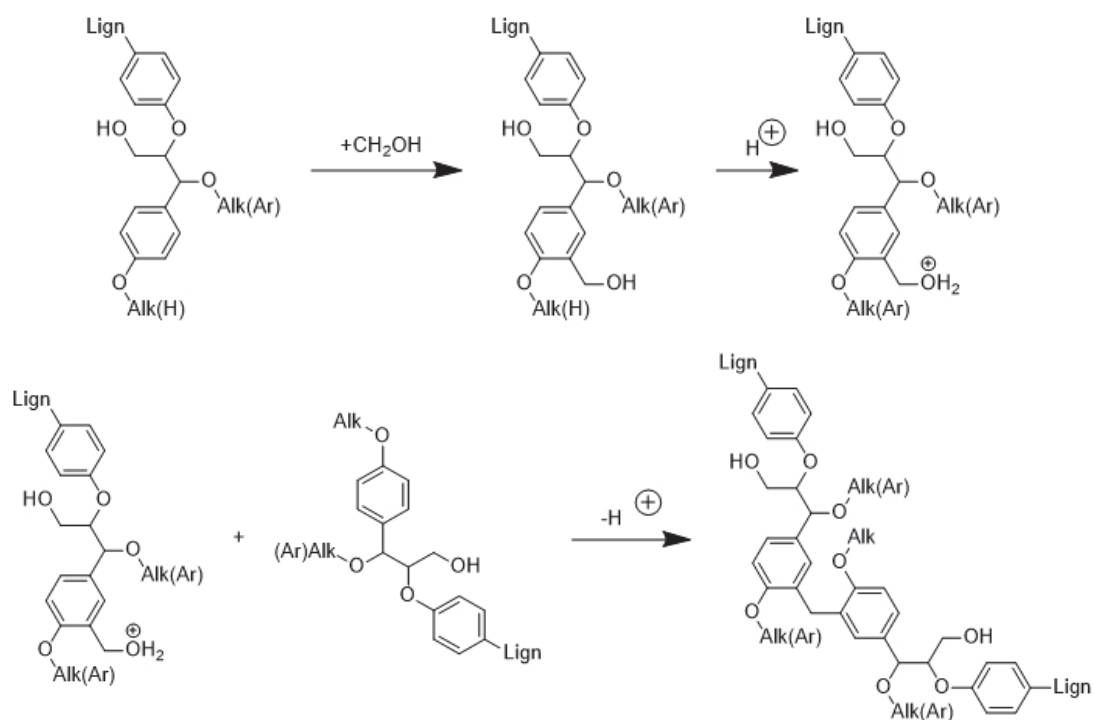


Рис. 5. Схема поликонденсации формальдегида и лигнина в кислой среде

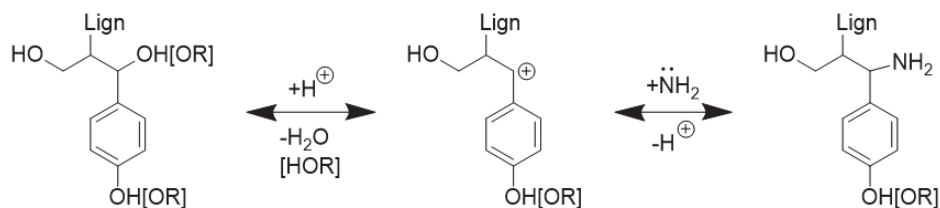


Рис. 6. Схема реакции лигнина с нуклеофилами в кислой среде

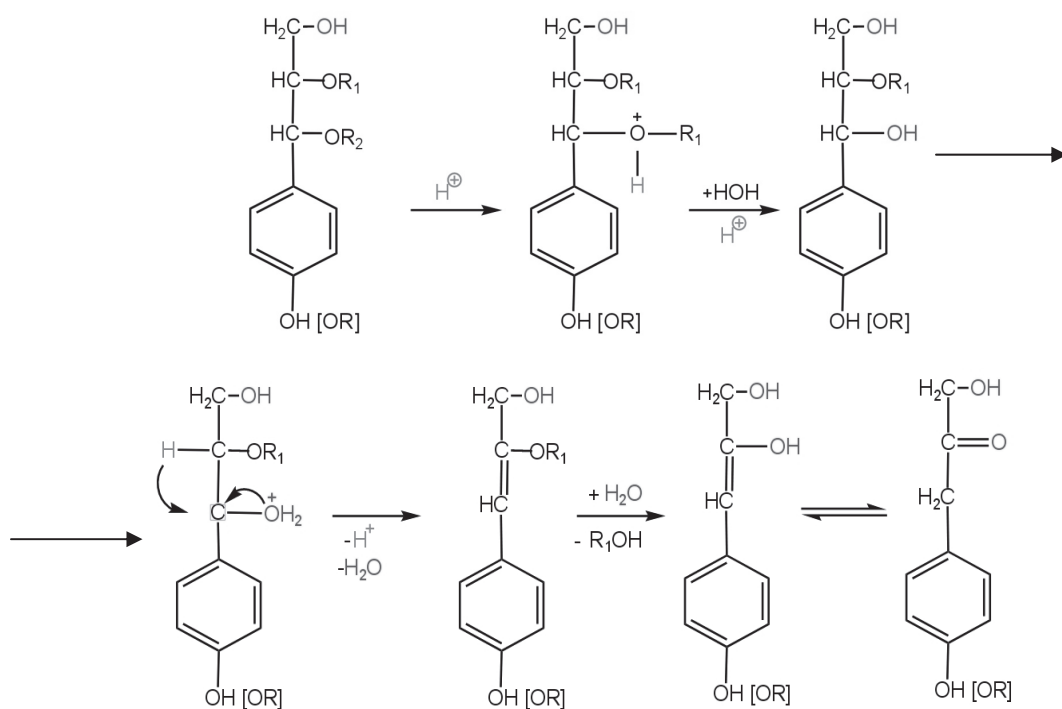


Рис. 7. Начальная стадия химической активации лигнина пероксидом водорода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование направлено на установление закономерностей процесса формирования ПБС на основе растительного (травянистого) сырья в присутствии химических активаторов. Возможные механизмы участия химических активаторов в активации природного лигнина такого сырья, обуславливают их критический выбор и оказывают значительное влияние на формирование структуры ПБС.

Методом DFT была исследована электронная структура и реакционные центры модельных фрагментов лигнина Н-типа. Различные виды фрагментов изучаемого типа лигнина проявляют разные электронные свойства, что определяется разным положением энергетических уровней НОМО и LUMO.

Результаты показывают, что энергетические характеристики граничных орбиталей (НОМО – LUMO) чувствительны к структуре молекулы. Композиционно и структурно схожие соединения демонстрируют различия в энергиях этих орбиталей. Это показывает, что реакционная способность определяется особенностями строения и наличием функциональных групп.

ФЛ-Н Alk – Ag характеризуется лучшими донорными свойствами и повышенной реакционной способностью в электрофильных реакциях. Причина заключается в более высоком уровне НОМО (–6,08 эВ) и меньшей энергетической щели ΔE (5,76 эВ) по сравнению с другим рассматриваемым видом ФЛ-Н Ag – Ag (табл. 2). Высокое положение НОМО облегчает отдачу электронов, делая молекулу эффективным донором электронной плотности. ФЛ-Н Alk – Ag предпочтителен для реакций электрофильного замещения и аминометилирования, поскольку обладает большей склонностью отдавать электроны электрофилам.

ФЛ-Н Ag – Ag проявляет лучшие акцепторные свойства. Его повышенная акцепторная активность обусловлена низким уровнем LUMO (–0,43 эВ). Низкое положение LUMO способствует легкому принятию электронов от нуклеофильных реагентов. Следовательно, ФЛ-Н Ag – Ag оптимален для реакций, включающих атаку нуклеофильным агентом по акцепторному центру, а также для процессов, требующих легкой окислительной активации. Благодаря низкой энергии LUMO, такие системы легче вступают в реакции окисления и взаимодействия с нуклеофилами.

Исходя из состава продуктов термогидролитического разложения рассматриваемых химических активаторов и активных центров изучаемых фрагментов лигнина, для уротропина оптимальный тип ФЛ-Н Alk – Ag (донорный, с высоким НОМО), для карбамида и пероксид водорода – оптимальный тип ФЛ-Н Ag – Ag (акцепторный, с низким LUMO).

Донорный эффект фенольного гидроксила, характерный для лигнина Н-типа, приводит к повышению электронной плотности в орто- и пара- положениях бензольного кольца. Это активизирует соответствующие реакционные центры для электрофильной атаки, в частности – протонированным формальдегидом. Наблюдаемая закономерность служит дополнительным подтверждением участия формальдегида в процессах конденсации при формировании структуры ПБС на основе растительного сырья (рис. 5).

Таким образом, проведенное исследование и полученные результаты создают основу для установления закономерностей формирования ПБС на основе разнотипного растительного сырья. Полученные данные позволяют перейти от эмпирического подбора химических активаторов к их научно обоснованному выбору, что позволит учитывать реакционную способность различных типов лигнина для получения ПБС с прогнозируемыми физико-механическими свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Пен Р. З., Каретникова Н. В., Шапиро И. Л. Катализируемая делигнификация растительного сырья пероксидом водорода и пероксикидотами (обзор) // Химия растительного сырья. 2020. № 4. С. 331–349. DOI 10.14258/jcprm.2020048119
2. Pérez A. D., Fiskari J., Schuur B. Delignification of Low-Energy Mechanical Pulp (Asplund Fibers) in a Deep Eutectic Solvent System of Choline Chloride and Lactic Acid // Frontiers in Chemistry. 2021. 9:688291. Doi: 10.3389/fchem.2021.688291
3. Получение целлюлозы щелочно-окислительно-органосольвентным способом / А. В. Вураско, Б. Н. Дрикер, Э. В. Мертин, Г. В. Астратова // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-3. С. 586–592.
4. Denisova M. N., Kukhlenko A. A., Orlov S. E. Investigation into the Process of Hydrotropic Delignification of Oat Straw in the Universal Thermo-baric Unit // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. Vol. 52, No. 4. P. 661–663. DOI: 10.1134/S0040579518040073
5. Zhang D., Zhang A., Xue L. A. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism // Wood Science and Technology. 2015. 49:661–679. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0728-6>
6. Скурыдин Ю. Г., Скурыдина Е. М. Влияние предгидролитической обработки древесины березы на физико-механические характеристики композитного материала, получаемого на ее основе // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 4. С. 103–112. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-103-112
7. Базарнова Н. Г., Галочкин А. И., Крестьянников В. С. Влияние мочевины на свойства прессованных материалов из древесины, подвергнутой гидро-термической обработке // Химия растительного сырья. 1997. № 1. С. 17–21.
8. Модифицированные древесные пластики без добавления связующих / В. Г. Дедюхин, В. Г. Бурындин, Н. М. Мухин, О. У. Гайнутдинова // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : материалы Всерос. семинара, Барнаул, 28–29 марта 2002 года. Барнаул : Алтайск. гос. ун-т, 2002. С. 258–263.
9. Баяндин М. А. Повышение деформативности хвойной древесины с целью гнутья : специальность 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Баяндин Михаил Андреевич. Красноярск, 2010. 16 с.
10. Артемов А. В. Разработка технологии получения изделий экструзией из древесных отходов без добавления синтетических связующих : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химиче-

ской переработки биомассы дерева; химия древесины» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Артемов Артём Вячеславович. Екатеринбург, 2010. 16 с.

11. Савиновских А. В. Получение пластиков из древесных растительных отходов в закрытых пресс-формах : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» : дис. ... канд. техн. наук / Савиновских Андрей Викторович, 2016. 107 с.

12. Кривоногов П. С. Получение и свойства новых материалов на основе лигноцеллюлозных аграрных отходов : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» : дис. ... канд. техн. наук / Кривоногов Павел Сергеевич, 2020. 130 с.

13. Структура и биомедицинские свойства лигнинов (обзор) / А. П. Карманов, А. В. Ермакова, О. В. Раскоша, Л. А. Башлыкова, Н. Г. Рачкова, Л. С. Кочева // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 5–28. DOI: 10.14258/jcprm.20230412560

14. Valorization of lignin into phenolic compounds via fast pyrolysis: Impact of lignin structure / J. M. Yuan, H. Li, L. P. Xiao, T. P. Wang, W. F. Ren, Q. Lu, R. C. Sun // Fuel. 2022. Vol. 319. Article 123758.

15. Wang J., Wang S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 227. Pp. 1002–1022.

16. Резников В. М. Реакционная способность лигнина и его превращения в процессах делигнификации древесины // Химия древесины. 1977. № 3. С. 3–23.

17. Yan, L. Lignin polymerization: towards high-performance materials / L. Yan, A. J. Huertas-Alonso, H. Liu, L. Dai, C. Si, M. H. Sipponen // Chemical Society Reviews. 2025. № 54. Pp. 6634–6651. DOI: 10.1039/d4cs01044b.

18. Urbaniak A., Molski M., Szlag M. Quantum-chemical calculations of the antioxidant properties of trans-p-coumaric acid and trans-sinapinic acid // Computational methods in science and technology. 2012; 18(2):117–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.12921/cmst.2012.18.02.117-128>

19. Kumar N., Pruthi V., Goel N. Structural, thermal and quantum chemical studies of p-coumaric and caffeic acids // Journal of Molecular Structure. 2015; 1085:242–248. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.12.064>

20. Исследование реакционной способности производных коричной кислоты – предшественников лигнина / О. Х. Каримов, Г. Ю. Колчина, Г. А. Тептерева [и др.] // Тонкие химические технологии. 2020. Т. 15, № 4. С. 7–13. DOI 10.32362/2410-6593-2020-15-4-7-13

21. Akman F. A density functional theory study based on monolignols: molecular structure, HOMO-LUMO analysis, molecular electrostatic potential // Cellulose chemistry and technology. 2019. 53. 243–250. 10.35812/cellulosechemtechnol.2019.53.24

22. Lignin polymerization: towards high-performance materials / L. Yan, A. J. Huertas-Alonso, H. Liu, L. Dai, C. Si, M. H. Sipponen // Chemical Society Reviews. 2025. 54(14):6634–6651. Doi: 10.1039/d4cs01044b

23. Open Babel: An open chemical toolbox / N. M. O'Boyle, M. Banck, C. A. James, C. Morley, T. Vandermeersch, G. R. Hutchison // Journal of cheminformatics. 2011. 3:33. Doi: 10.1186/1758-2946-3-33

24. Neese F. The SHARK integral generation and digestion system // Journal of Computational Chemistry. 2023. 44(3). P. 381–396. DOI: 10.1002/jcc.26942

25. Neese F. Software update: The ORCA program system – Version 5.0 // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science. 2022. DOI: 10.1002/wcms.1606

26. Efficient, approximate and parallel Hartree-Fock and hybrid DFT calculations. A 'chain-of-spheres' algorithm for the Hartree-Fock exchange / F. Neese, F. Wennmo, A. Hansen, U. Becker // Chemical Physics. 2009. Vol. 356. No. 1-3. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.chemphys.2008.10.036

27. Механизмы и кинетика деструкции органического вещества в водной среде / Б. М. Долгонос, Т. Н. Губернаторова, Б. М. Долгонос, Т. Н. Губернаторова ; Российская академия наук, Институт водных проблем. М. : URSS, 2010. 5 с.

28. Electronic Spectra of ortho-Substituted Phenols: An Experimental and DFT Study / S. Tetteh, R. Zugle, J. P. K. Adotey, A. Quashie // Journal of Spectroscopy, (2018). 1, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4193657>

29. DFT Based Electrophilicity Index and QSAR study of Phenols as AntiLeukaemia Agent / F. A. Pasha, H. K. Srivastava, Y. Beg, P. P. Singh // American Journal of Immunology, 2(1), 23–28 (2006). <https://thescpub.com/pdf/ajisp.2006.23.28.pdf>

30. Евстигнеев Э. И. Электрохимические реакции лигнина (обзор) // Химия растительного сырья. 2014. № 3. С. 5–42.

REFERENCES

1. Pen R. Z., Karetnikova N. V., Shapiro I. L. Kataliziruemaya delignifikaciya rastitel'nogo sy'r'ya peroksidom vodoroda i peroksisiklotami (obzor) // Ximiya rastitel'nogo sy'r'ya. 2020. № 4. S. 331–349. DOI 10.14258/jcprm.2020048119

2. Pérez A. D., Fiskari J., Schuur B. Delignification of Low-Energy Mechanical Pulp (Asplund Fibers) in a Deep Eutectic Solvent System of Choline Chloride and Lactic Acid // Frontiers in Chemistry. 2021. 9:688291. Doi: 10.3389/fchem.2021.688291

3. Poluchenie cellyulozy` shhelochno-okislitel'no-organosol'ventny'm sposobom / A. V. Vurasko, B. N. Drinker, E'. V. Mertin, G. V. Astratova // Fundamental'ny'e issledovaniya. 2012. № 11-3. S. 586–592.

4. Denisova M. N., Kukhlenko A. A., Orlov S. E. Investigation into the Process of Hydrotropic Delignification of Oat Straw in the Universal Thermobaric Unit // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. Vol. 52, No. 4. P. 661–663. DOI: 10.1134/S0040579518040073

5. Zhang D., Zhang A., L. Xue A. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism // Wood Science and Technology. 2015. 49: 661–679. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00222-015-0728-6>

6. Skury'din Yu. G., Skury'dina E. M. Vliyanie predgidroliticheskoy obrabotki drevesiny` berezy` na fiziko-mexanicheskie xarakteristiki kompozitnogo materiala, poluchaemogo na ee osnove // Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin, 2022. T. 26, № 4. S. 103–112. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-103-112

7. Bazarnova N. G., Galochkin A. I., Krest'yannikov V. S. Vliyanie mocheviny na svoystva pressovannykh materialov iz drevesiny, podvergnutoj gidrotermicheskoy obrabotke // *Ximiya rastitel'nogo syr'ya*. 1997. № 1. S. 17–21.
8. Modificirovanny'e drevesny'e plastiki bez dobavleniya svyazuyushhix / V. G. Dedyuxin, V. G. Buryndin, N. M. Muxin, O. U. Gajnutdinova // *Novy'e dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: Materialy Vserossiyskogo seminara, Barnaul, 28–29 marta 2002 goda. Barnaul: Altajskiy gosudarstvennyy universitet*, 2002. S. 258–263.
9. Bayandin M. A. Povyshenie deformativnosti xvojnoj drevesiny s cel'yu gnut'ya: special'nost' 05.21.05 Drevesinovedenie, tekhnologiya i oborudovanie derevopererabotki: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskix nauk / Bayandin Mixail Andreevich. Krasnoyarsk, 2010. 16 s.
10. Artemov A. V. Razrabotka tekhnologii polucheniya izdelij e'kstruziej iz drevesny'x otxodov bez dobavleniya sinteticheskix svyazuyushhix: special'nost' 05.21.03 Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy drevya; ximiya drevesiny: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk / Artemov Artyom Vyacheslavovich. Ekaterinburg, 2010. 16 s.
11. Savinovskix A. V. Poluchenie plastikov iz drevesny'x rastitel'ny'x otxodov v zakry'ty'x press-formax: special'nost' 05.21.03 Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy drevya; ximiya drevesiny: dis. ... kand. texn. nauk / Savinovskix Andrej Viktorovich, 2016. 107 s.
12. Krivonogov P. S. Poluchenie i svoystva novy'x materialov na osnove lignocellyulozny'x agrarny'x otxodov: special'nost' 05.21.03 Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy drevya; ximiya drevesiny: dis. ... kand. texn. nauk / Krivonogov Pavel Sergeevich, 2020. 130 s.
13. Struktura i biomedicinskie svoystva ligninov (obzor) / A. P. Karmanov, A. V. Ernakova, O. V. Raskosha, L. A. Bashlykova, N. G. Rachkova, L. C. Kocheva // *Ximiya rastitel'nogo syr'ya*. 2023. № 4. S. 5–28. DOI: 10.14258/jcprm.20230412560
14. Valorization of lignin into phenolic compounds via fast pyrolysis: Impact of lignin structure / J. M. Yuan, H. Li, L. P. Xiao, T. P. Wang, W. F. Ren, Q. Lu, R. C. Sun // *Fuel*. 2022. Vol. 319. Article 123758.
15. Wang J., Wang S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 227. Pp. 1002–1022.
16. Reznikov V. M. Reakcionnaya sposobnost' lignina i ego prevrashheniya v processax delignifikatsii drevesiny // *Ximiya drevesiny*. 1977, № 3. S. 3–23.
17. Yan, L. Lignin polymerization: towards high-performance materials / L. Yan, A. J. Huertas-Alonso, H. Liu, L. Dai, C. Si, M. H. Sipponen // *Chemical Society Reviews*. 2025. № 54. Pp. 6634–6651. DOI: 10.1039/d4cs01044b
18. Urbaniak A., Molski M., Szelag M. Quantum-chemical calculations of the antioxidant properties of trans-p-coumaric acid and trans-sinapinic acid // *Computational methods in science and technology*. 2012; 18(2):117–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.12921/cmst.2012.18.02.117-128>
19. Kumar N., Pruthi V., Goel N. Structural, thermal and quantum chemical studies of p-coumaric and caffeic acids // *Journal of Molecular Structure*. 2015; 1085:242–248. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.12.064>
20. Issledovanie reakcionnoj sposobnosti proizvodny'x korichnoj kisloty – predshestvennikov lignina / O. X. Karimov, G. Yu. Kolchina, G. A. Teptereva [i dr.] // *Tonkie khimicheskie tekhnologii*. 2020. T. 15, № 4. S. 7–13. DOI: 10.32362/2410-6593-2020-15-4-7-13
21. Akman F. A density functional theory study based on monolignols: molecular structure, HOMO-LUMO analysis, molecular electrostatic potential // *Cellulose chemistry and technology*. 2019. 53. 243–250. 10.35812/cellulosechemtechnol.2019.53.24
22. Lignin polymerization: towards high-performance materials / L. Yan, A. J. Huertas-Alonso, H. Liu, L. Dai, C. Si, M. H. Sipponen // *Chemical Society Reviews*. 2025. 54(14):6634–6651. Doi: 10.1039/d4cs01044b
23. Open Babel: An open chemical toolbox / N. M. OBoyle, M. Banck, C. A. James, C. Morley, T. Vandermeersch, G. R. Hutchison // *Journal of cheminformatics*. 2011. 3:33. Doi: 10.1186/1758-2946-3-33
24. Neese F. The SHARK integral generation and digestion system // *Journal of Computational Chemistry*. 2023. 44(3). P. 381–396. DOI: 10.1002/jcc.26942
25. Neese F. Software update: The ORCA program system – Version 5.0 // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*. 2022. DOI: 10.1002/wcms.1606
26. Efficient, approximate and parallel Hartree-Fock and hybrid DFT calculations. A chain-of-spheres algorithm for the Hartree-Fock exchange / F. Neese, F. Wennmohs, A. Hansen, U. Becker // *Chemical Physics*. 2009. Vol. 356. No. 1-3. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.chemphys.2008.10.036
27. Mexanizmy i kinetika destrukcii organicheskogo veshhestva v vodnoj srede / B. M. Dolgonosov, T. N. Gubernatorova; B. M. Dolgonosov, T. N. Gubernatorova; Rossiyskaya akademiya nauk, Institut vodny'x problem. M.: URSS, 2010. 205 s.
28. Electronic Spectra of ortho-Substituted Phenols: An Experimental and DFT Study / S. Tetteh, R. Zugle, J. P. K. Adotey, A. Quashie // *Journal of Spectroscopy*, (2018). 1, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4193657>
29. DFT Based Electrophilicity Index and QSAR study of Phenols as AntiLeukaemia Agent / F. A. Pasha, H. K. Srivastava, Y. Beg, P. P. Singh // *American Journal of Immunology*, 2(1), 23–28 (2006). <https://thescupub.com/pdf/ajisp.2006.23.28.pdf>
30. Evstigneev E'. I. E'lektroximicheskie reakcii lignina (obzor) // *Ximiya rastitel'nogo syr'ya*. 2014. № 3. S. 5–42.

© Артёмов А. В., Бурындин В. Г., Ершова А. С., Шкуро А. Е., Юрьев Ю. Л., Пазникова С. Н., 2026

АВТОРСКАЯ ССЫЛКА

Алашкевич Ю. Д. Гидродинамика потока волокнистой суспензии в ячейках статора и ротора дисковой мельницы при размоле хвойной целлюлозы, с. 128–134

Артёмов А. В. Квантово-химическое исследование механизмов образования лигноцеллюлозных пластиков без связующих, с. 135–144

Байгильдеева Е. И., см. Сафина А. В.

Барышникова О. Н. Реконструкция ареала основных лесов и перспективы их восстановления в Порозихинской ложбине стока, с. 16–23

Бурындин В. Г., см. Артёмов А. В.

Гаврилова О. И. Сравнительный состав живого напочвенного покрова под пологом сосняков и на гари, с. 93–98

Грязькин А. В., см. Гаврилова О. И.

Ершова А. С., см. Артёмов А. В.

Залывская О. С., см. Сурин Д. А.

Исаева Л. Г., см. Рябов Н. С.

Кази И. А., см. Гаврилова О. И.

Камашев А. А. Естественное лесовосстановление на нарушенных лесных участках в различных типах леса и типах лесорастительных условий подзоны Северной тайги, с. 107–119

Карпухов Д. Д. Оценка организационной структуры лесного хозяйства России, с. 83–92

Маленко А. А., см. Барышникова О. Н.

Пазникова С. Н., см. Артёмов А. В.

Пак М. Э., см. Помыткин Н. С.

Плюха Н. И., см. Усольцев В. А.

Помыткин Н. С. Инициация соматического эмбриогенеза лиственницы Чеканоского, с. 71–74

Почёмин Н. М., см. Барышникова О. Н.

Решетова Н. С., см. Алашкевич Ю. Д.

Рябов Н. С. Структура и состояние еловых фитоценозов в зоне влияния медно-никелевого производства, с. 7–15

Савченкова В. А., см. Камашев А. А.

Савченкова В. А., см. Карпухов Д. Д.

Сафина А. В. Обзор современных методов извлечения биологически активных веществ из древесной биомассы хвойных пород с учетом морфологической неоднородности сырья, с. 24–33

Сентемов А. А. Оценка воздействия режима эксплуатации кустовых площадок на санитарное состояние насаждений в зоне лесотундры, с. 75–82

Сурин Д. А. Зависимость энергии прорастания семян *Pinus sylvestris* L. от температуры водяного ложа в условиях стандартизированного лабораторного проращивания, с. 120–127

Танцырев Н. В. Проблемы естественного лесовозобновления на вырубках в травяных типах леса Горного Урала, с. 99–106

Третьякова И. Н., см. Помыткин Н. С.

Тюкавина О. Н., см. Сентемов А. А.

Усольцев В. А. Оценка архитектоники и биомассы корней деревьев с помощью георадара (обзор зарубежной литературы), с. 34–70

Хорькова М. И., см. Камашев А. А.

Чичкарев А. С., см. Барышникова О. Н.

Шемберг А. М., см. Помыткин Н. С.

Шкуро А. Е., см. Артёмов А. В.

Юрьев Ю. Л., см. Артёмов А. В.

AUTHOR'S LINK

Alashkevich Yu. D. Hydrodynamics of fiber suspension flow in stator and rotor cells of a disc refiner during softwood pulp refining, p. 128–134

Artyomov A. V. Quantum-chemical study of the mechanisms of lignocellulose plastics formation without resins, p. 135–144

Baigildeeva E. I., see Safina A. V.

Baryshnikova O. N. Reconstruction of the areas of pine forests and prospects for their restoration in the Porozikhinskaya runoff downstream, p. 16–23

Buryndin V. G., see Artyomov A. V.

Chichkarev A. S., see Baryshnikova O. N.

Gavrilova O. I. Comparative composition of the living subsoil cover under the canopy of pine forests and on the fire-raised land, p. 93–98

Gryazkin A. V., see Gavrilova O. I.

Isaeva L. G., see Ryabov N. S.

Kamashev A. A. Natural reforestation in disturbed forest areas in various types of forest and types of forest-growing conditions of the Northern taiga subzone, p. 107–119

Karpukhov D. D. Assessment of the organizational structure of forestry in Russia, p. 83–92

Kazi I. A., see Gavrilova O. I.

Khorkova M. I., see Kamashev A. A.

Malenko A. A., see Baryshnikova O. N.

Park M. E., see Pomytkin N. S.

Paznikova S. N., see Artyomov A. V.

Plyukha N. I., see Usoltsev V. A.

Pochyomin N. M., see Baryshnikova O. N.

Pomytkin N. S. Initiation of somatic embryogenesis in czekanowski's larch, p. 71–74

Reshetova N. S., see Alashkevich Yu. D.

Ryabov N. S. The structure and condition of spruce phytocenoses in the zone of influence of copper-nickel production, p. 7–15

Safina A. V. Review of modern methods for extracting biologically active substances from coniferous wood biomass, taking into account the morphological heterogeneity of the raw material, p. 24–33

Savchenkova V. A., see Kamashev A. A.

Savchenkova V. A., see Karpukhov D. D.

Sentemov A. A. Assessment of the impact of well pad operational mode on the sanitary condition of forest-tundra stands, p. 75–82

Shemberg A. M., see Pomytkin N. S.

Shkuro A. E., see Artyomov A. V.

Surin D. A. Dependence of germination energy of *Pinus sylvestris* L. seeds on water bath temperature under standardized laboratory germination conditions, p. 120–127

Tantsyrev N. V. Problems of natural reforestation in clearings in grass forest types of the Ural mountain, p. 99–106

Tretyakova I. N., see Pomytkin N. S.

Tyukavina O. N., see Sentemov A. A.

Usoltsev V. A. Estimating the architecture and biomass of tree roots using ground-penetrating radar (review of foreign literature), p. 34–70

Yershova A. S., see Artyomov A. V.

Yuryev Yu. L., see Artyomov A. V.

Zalyvskaya O. S., see Surin D. A.