

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1833 г.
Издается в серии ИВУЗ с 1958 г.
Выходит 6 раз в год

5/383

2021

ИЗДАТЕЛЬ – СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

МЕЛЕХОВ В.И. – гл. редактор, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БАБИЧ Н.А. – зам. гл. редактора, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БОГОЛИЦЫН К.Г. – зам. гл. редактора, д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
АНГЕЛЬСТАМ П. – зам. гл. редактора по европейскому направлению, д-р наук, проф. (Швеция, Скиннскаттеберг)
КОМАРОВА А.М. – отв. секретарь, канд. с.-х. наук (Россия, Архангельск)

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф., акад. РАЕ (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёрensen У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Тельшшева Г.М., д-р хим. наук, проф. (Латвия, Рига)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Царев А.П., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Воронеж)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

NORTHERN (ARCTIC) FEDERAL UNIVERSITY
NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833
Issued as part of the
“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958
Published 6 times a year

5/383

2021

PUBLISHER: NORTHERN (ARCTIC)
FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

EDITORIAL BOARD:

MELEKHOV V.I. – Editor-in-Chief, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BABICH N.A. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BOGOLITSYN K.G. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
ANGELSTAM P. – Deputy Editor-in-Chief of the European Department, PhD, Prof. (Sweden, Skinnskatteberg)
KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof., Academician of the Russian Academy of Natural History (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Telysheva G.M., Doctor of Chemistry, Prof. (Latvia, Riga)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Tsarev A.P., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Voronezh)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Фан Чонг Хуан, В.Ф. Ковязин, С.С. Звонарёва, Нгуен Тхи Хай Тхань, Нгуен Тхи Лан. Физико-химические свойства почв мангровых лесов Вьетнама.. 9
- Ю.В. Заринов, С.В. Залесов, Е.С. Залесова, А.С. Попов, Е.П. Платонов, Н.И. Стародубцева. Подрост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на отвалах месторождения хризотил-асбеста..... 22
- Н.Ф. Овчинникова. Особенности пространственно-временной структуры сонового древостоя на южном склоне Восточного Саяна..... 34
- Н.Н. Бессчетнова, П.В. Бессчетнов. Дифференциация пылезадерживающей способности кроны тополей..... 48
- Нгуен Тхи Иен, Данг Ван Ха, Т.А. Паринаова. Видовое разнообразие и декоративные особенности растений в озеленении города Ханой..... 65
- Ю.И. Чевердин, В.А. Беспалов, М.Ю. Сауткина, Т.В. Титова. Эколого-агрохимическая оценка почв Каменной Степи под лесным ценозом .. 76

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- A.S. Plintsev, E.N. Nakvasina, L. Högbom. Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review)..... 92
- И.М. Бартенева, М.В. Драпалюк. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов..... 117

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.М. Буглаев. Электроискровое упрочнение дереворежущего инструмента.. 134
- А.Е. Алексеев, И.О. Думанский, А.В. Прохоров. Пластинчатые амортизаторы-демпферы в натяжных устройствах ленточнопильных станков..... 142

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- И.А. Хадыко, Е.В. Новожилов, Д.Г. Чухчин. Влияние предварительной подготовки картона на определение крахмала ферментативным методом..... 150

-
- Л.А. Мингазова, Е.В. Крякунова, З.А. Канарская, А.В. Канарский.* Применение сульфитных щелоков в качестве питательной среды для культивирования продуцента молочной кислоты *Rhizopus oryzae F-1030*... 163
- D. Rech, A.N. Potasheva, Ya.V. Kazakov.* Regulating the Deformation Properties of Paper by Varying the Degree of Its Anisotropy..... 174

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- R.N. Babaev.* Application of the Adobe Photoshop Software Package in Leaf Blade Area Measurement of Woody Plants..... 185
- Н.М. Дебков.* Опыт создания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой..... 192
- И.В. Евдокимов, А.П. Добрынин, Н.А. Армеева.* Древовидная форма можжевельника (*Juniperus communis* L.) в лесах Вологодской области..... 201
-



CONTENTS

FORESTRY

- T.H. Phan, V.F. Kovyazin, S.S. Zvonareva, T.H.T. Nguyen, T.L. Nguyen.* Physical and Chemical Soil Properties of Mangrove Forests in Vietnam..... 9
- Yu.V. Zaripov, S.V. Zalesov, E.S. Zalesova, A.S. Popov, E.P. Platonov, N.I. Starodubtseva.* Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Undergrowth on the Dumps of the Chrysotile Asbestos Deposit..... 22
- N.F. Ovchinnikova.* Spatiotemporal Structure Features of a Pine Stand on the South Slope of the Eastern Sayan Mountains..... 34
- N.N. Besschetnova, P.V. Besschetnov.* Differentiation of Dust Holding Capacity of Poplar Crowns..... 48
- T.Y. Nguyen, V.H. Dang, T.A. Parinova.* Species Diversity and Decorative Features of Plants Used in the Landscaping of Hanoi..... 65
- Yu.I. Cheverdin, V.A. Besspalov, M.Yu. Sautkina, T.V. Titova.* Ecological and Agrochemical Assessment of the Kamennaya Steppe Soils under Forest Cenosis..... 76

LOGGING TECHNOLOGIES

- A.S. Ilintsev, E.N. Nakvasina, L. Högbom.* Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review)..... 92
- I.M. Bartenev, M.V. Drapalyuk.* Improving the Technology of Reforestation in Cuttings with the Use of Energy-Efficient Tractors..... 117

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- A.M. Buglaev.* Device for Wood-Cutting Tool Hardening..... 134
- A.E. Alekseev, I.O. Dumanskij, A.V. Prokhorov.* Plate Dampers in the Tensioning Units of Bandsaw Machines..... 142

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- I.A. Khadyko, E.V. Novozhilov, D.G. Chukhchin.* Influence of Cardboard Pretreatment on the Determination of Starch Content by the Enzymatic Method..... 150

-
- L.A. Mingazova, E.V. Kryakunova, Z.A. Kanarskaya, A.V. Kanarsky.* Applying Sulfite Liquors as a Nutrient Medium for Cultivation of Lactic Acid Producer *Rhizopus oryzae F-1030*..... 163
- D. Rech, A.N. Potasheva, Ya.V. Kazakov.* Regulating the Deformation Properties of Paper by Varying the Degree of Its Anisotropy..... 174

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- R.N. Babaev.* Application of the Adobe Photoshop Software Package in Leaf Blade Area Measurement of Woody Plants..... 185
- N.M. Debkov.* Experience in the Creation of Forest Plantations Using Container Seedlings..... 192
- I.V. Evdokimov, A.P. Dobrynin, N.A. Armeeva.* Tree Form of Juniper (*Juniperus communis* L.) in the Forests of the Vologda Region..... 201
-



УДК 630*114

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-9-21

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ МАНГРОВЫХ ЛЕСОВ ВЬЕТНАМА

Фан Чонг Хуан¹, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [ABA-6501-2020](https://orcid.org/0000-0002-0471-0443),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-0443>

В.Ф. Ковязин², д-р биол. наук, проф.; *ResearcherID*: [Y-5917-2018](https://orcid.org/0000-0002-3118-8515),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-8515>

С.С. Звонарёва³, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [E-8159-2019](https://orcid.org/0000-0002-0372-9919),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0372-9919>

Нгуен Тхи Хай Тхань¹, мл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAX-4866-2021](https://orcid.org/0000-0001-7716-6859),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7716-6859>

Нгуен Тхи Лан¹, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [ABA-6990-2020](https://orcid.org/0000-0001-5869-3936),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5869-3936>

¹Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, Приморское отделение, Департамент по экологии, ул. Нгуен Тхьен Тхуат, д. 30, Нячанг, Социалистическая Республика Вьетнам, 57127; e-mail: tronghuan1369@yahoo.com

²Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия Васильевского острова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106; e-mail: vfkedr@mail.ru

³Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский просп., д. 33, Москва, Россия, 119071

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 25.02.20 / Принята к печати 14.05.20

Аннотация. В последнее время под влиянием осознания экологической роли и экономического значения мангровых (вечнозеленых) лесов, произрастающих в приливо-отливной полосе морского побережья Вьетнама, их площадь начали увеличивать путем создания искусственных посадок растений. Наиболее обширны по территории защитные мангровые леса. Они способны предотвращать смыв почвы и уничтожение береговой линии приливами и отливами, ослаблять разрушительные действия ураганов и цунами. Однако роль мангровых лесов в почвообразовательном процессе еще слабо изучена. В таких лесах на него влияет множество факторов: древесная растительность, приливные соленые воды, атмосферные осадки и горные стоки. Способность почвы сохранять воду, биогенные элементы, ионы и ряд других физико-химических свойств почвы тесно связаны с ее гранулометрическим составом. Многолетний мониторинг гранулометрического состава и концентрации биогенных элементов в почве мангровых лесов в районе Дам Бай залива Нячанг позволил нам выделить две группы почвенных разностей: типичная латтеритовая почва в естественных мангровых лесах и в посадках ризофор 2004 г. и слабо развитая латтеритовая в культурных ценозах 2007, 2013 гг. и на литорали. Почвы этих групп отличаются гранулометрическим составом в зависимости от времени формирования древостоев. Общее содержание гравия, алевролита и ила в почвах 1-й группы выше, чем в почвах 2-й. Концентрации биогенных элементов (содержание фосфора и азота) в почве мангровых лесов довольно высокие, но постепенно снижающиеся от почвы естественных мангровых лесов до литорали. В целях эффективной

борьбы с водной эрозией почв и улучшения их физико-химических свойств рекомендуется продолжить создание искусственных мангровых лесов на берегах залива Нячанг в провинции Кханьхоа Вьетнама.

Для цитирования: Фан Чонг Хуан, Ковязин В.Ф., Звонарёва С.С., Нгуен Тхи Хай Тхань, Нгуен Тхи Лан. Физико-химические свойства почв мангровых лесов Вьетнама // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 9–21. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-9-21

Благодарность: Авторы выражают благодарность Приморскому отделению Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра за всестороннюю научную поддержку в рамках проекта «Эколан 3.1.15».

Ключевые слова: залив Нячанг, почвы мангровых лесов, гранулометрический состав, содержание биогенных элементов, посадка ризофор.

PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL PROPERTIES OF MANGROVE FORESTS IN VIETNAM

*Phan Trong Huan*¹, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [ABA-6501-2020](https://orcid.org/0000-0002-0471-0443),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-0443>

*Vasily F. Kovyazin*², Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [Y-5917-2018](https://orcid.org/0000-0002-3118-8515),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-8515>

*Sofya S. Zvonareva*³, Candidate of Biology; ResearcherID: [E-8159-2019](https://orcid.org/0000-0002-0372-9919),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0372-9919>

*Nguyen Thi Hai Thanh*¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAX-4866-2021](https://orcid.org/0000-0001-7716-6859),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7716-6859>

*Nguyen Thi Lan*¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [ABA-6990-2020](https://orcid.org/0000-0001-5869-3936),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5869-3936>

¹Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center, Coastal Branch, Department of Ecology, Nguyen Thien Thuat st., 30, Nha Trang, Khanh Hoa Province, 57127, Socialist Republic of Vietnam; e-mail: tronghuan1369@yahoo.com

²Saint Petersburg Mining University, Vasilyevsky Ostrov, 21 liniya, 2, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation; e-mail: vkedr@mail.ru

³A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Leninskiy prosp., 33, Moscow, 119071, Russian Federation

Original article / Received on February 25, 2020 / Accepted on May 14, 2020

Abstract. Recently the area of mangrove (evergreen) forests growing along the coast of Vietnam has been significantly increased by artificial afforestation under the recognition of their ecological role and economic importance. Protection mangrove forests are the largest among all mangrove forests in Vietnam. They act as a belt to prevent coastal roads from erosion and damage due to tides, storms, and tsunamis. However, their role in coastal soil formation is still poorly studied. Soil formation in mangrove forests is influenced by many factors including the following: woody vegetation, tidal saltwater, precipitation, and mountain runoff. The ability of soil to retain water, nutrients, ions, and some other physical and chemical properties is closely related to the soil texture. Long-term monitoring of the soil texture and the content of nutrients in the soil of mangrove forests in the Dam Bay area of the Nha Trang Bay allowed us to distinguish 2 groups of soil phases: typical laterite soil in natural mangrove forests and in rhizophore plantings of 2004 and poorly developed laterite soil in cultural cenoses of 2007 and 2013 and in the littoral zone. These two groups have differences in the soil texture depending on the time of stand formation. The total amount of

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

gravel, aleurite, and silt in the first group of soils is higher than that in the second group. The concentrations of nutrients (phosphorus and nitrogen content) in the soil of mangrove forests is quite high, though it gradually decreases from the soil of natural mangrove forests to the littoral zone. In order to effectively prevent erosion of soils and improve their physical and chemical properties, artificial mangrove forests should continuously be grown along the coast lines of the Nha Trang Bay in the Khanh Hoa province, Vietnam.

For citation: Phan T.H., Kovyazin V.F., Zvonareva S.S., Nguyen T.H.T., Nguyen T.L. Physical and Chemical Soil Properties of Mangrove Forests in Vietnam. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 9–21. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-9-21

Acknowledgements: The authors are grateful to the Coastal Branch of the Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center for comprehensive academic support. The research was carried out as part of the project “Ecolan 3.1.15” of the Russian-Vietnamese Tropical Center.

Keywords: Nha Trang Bay, soils of mangrove forests, soil texture, content of nutrients, rhizophore planting.

Введение

Мангровые леса, морские травы и коралловые рифы часто произрастают в одном сообществе и влияют друг на друга. Мангровые леса имеют высокую сомкнутость (8–15 м). Они задерживают атмосферные осадки и загрязняющие вещества, проникающие по поверхности почвы в залив Нячанг. Морские травы создают дополнительный барьер для ила и грязи, представляющих угрозу коралловым рифам. Коралловые рифы, в свою очередь, защищают травостой и мангровые леса от сильных океанских волн. То есть мангровые леса вместе с травами и коралловыми рифами образуют единый барьер, который «закрывает» прибрежные районы страны от неблагоприятных природных явлений.

Исторической родиной мангровых лесов считается Юго-Восточная Азия, однако они встречаются также в Западной Америке и на африканском континенте. Не менее известны мангровые леса Австралии и Новой Зеландии. Площадь таких лесов в Юго-Восточной Азии достигает 63,2×105,0 га, что составляет 34,9 % от общей площади лесов материка [5]. Распределение мангровых лесов в Юго-Восточной Азии приведено на рис. 1.

Несмотря на пограничное расположение мангровые леса являются сложной экосистемой, имеющей экологическое и экономическое значение [7, 8, 10]. Велика их роль и в почвообразовании [7]. Они способны предотвращать смыв грунта и уничтожение береговых линий приливами и отливами. Корневые системы мангровых лесов задерживают сток атмосферных осадков и укрепляют почву, тем самым снижая ее эрозию. Мангровые леса ослабляют разрушительные действия ураганов и цунами, постоянной эрозии. Установлено, что такие леса защищают почву от стихийных бедствий более эффективно, чем искусственные сооружения [3, 4, 14].

Мангровые леса обуславливают накопление ила и песка с остатками листьев, ветвей и стволов деревьев, способствуя образованию почвы. В них часто отсутствует подстилка, вымываемая отливами и сезонными паводками.

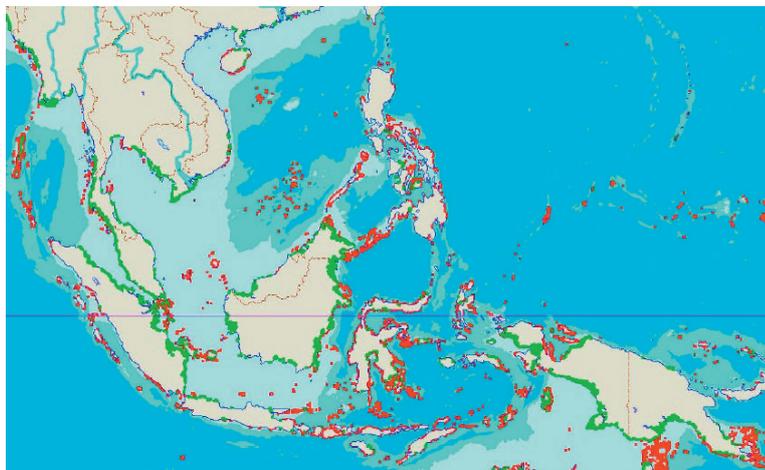


Рис. 1. Распределение мангровых лесов в Юго-Восточной Азии [5]

Fig. 1. Map of Southeast Asian mangrove areas [5]

Гранулометрический состав почвы мангровых лесов является важной физической характеристикой. С ним связаны способность сохранения воды, концентрации биогенных элементов, ионов и другие особенности [6, 11]. По гранулометрическому составу почвы мангровые леса можно классифицировать [12, 15, 17, 19]. Растения на разных типах почв неодинаковы по таксационным показателям, которые позволяют провести зонирование лесной территории. На типичных латеритовых почвах Юго-Восточной Азии хорошо развиваются представители семейства ризофоровые (*Rhizophoraceae*) – *Rhizophora mucronata* и *Avicennia marina*. Некоторые виды растений, такие как *Rhizophorastylosa*, хорошо себя чувствуют на песках и даже на коралловых островах, субстрат почв которых состоит из кораллового мусора, раковин и фрагментов известковых водорослей вида *Aragones* и др. На коралловых пляжах Филиппин, как известно из [5], и вдоль каналов встречаются виды *Rhizophoramangl*, *Bruguierasexangula*, *Sonneratiaalba* и *Ceriptagal*, правда *Sonneratiaalba* чаще произрастает в открытых заливах, а *Xylocarpusgranatum*, *Lumnitzeraracemosau*, *Aegicerascjrniculatum* адаптировались вдоль берегов внутренних водоемов.

При изучении сохранности, восстановления и устойчивого развития экосистем мангровых лесов необходимо исследовать физико-химические свойства почв, от качества которых зависит состояние и темпы роста растений.

Цель исследований – изучение физико-химических свойств почв мангровых лесов на морском побережье Вьетнама.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований служил мангровый лес в районе Дам Бай, вдоль залива Нячанг в близиг. Нячанг. Этот лесной массив имеет свою историю. В начале XX в. здесь произрастал естественный мангровый лес, но в 90-е гг. потребовалось место для строительства пристани. Лес вырубил, сохранив лишь часть: узкую полосу шириной 10 м. Впоследствии экологическая ситуация в районе исследования ухудшилась, и администрация провинции Кханьхоа приняла решение формировать искусственные мангровые леса в районе Дам Бай и на прилегающей территории.

Работы начались в 2004 г. и продолжались до декабря 2019 г. Высаживались растения, характеризующиеся разными способами опыления, относящиеся к двум семействам: ризофоровые (*Rhizophoraceae*) – опыляющаяся ветром *Rhizophorastylosa*, птицами и бабочками *Bruguierasexangula*; акантовые (*Acanthactae*) – *Avicennia marina* и *Aegicerascjrniculatum*, опыляющиеся пчелами. По периферии мангровых лесов встречаются представители таких семейств, как мальвовые (*Malvaceae*), молочайные (*Euphorbiaceae*), дербенниковые (*Lythraceae*), первоцветные (*Primulaceae*) и миртовые (*Myrtaceae*).

В характерных местах лесорастительных условий в 2006–2019 гг. брались образцы почвы: в естественных мангровых лесах, в искусственных посадках 2004, 2007 и 2013 гг., а также в литорали, расположенной вблизи посадок [4].

Размер части гранулометрического слоя почвы является наиболее важной характеристикой обломочных осадочных отложений в мангровых лесах Вьетнама. В полевых условиях для установления размера гранул обломочных осадочных пород использовалась шкала Частера К. Вентворта [16, 18]. Он видоизменил шкалу Йохана А. Уддена и дополнил шкалу Уильяма Крумберна. Размер гранул (диаметры частиц) Вентворт указывает в простых целых числах в виде шкалы, названной ФИ, которая представляет вычисленное по специальному уравнению миллиметровое число частицы в отрицательный алгоритм с основанием 2 (табл. 1).

Таблица 1

Шкала ФИ Вентворта и названия фракций осадочных пород

| >4 мм | 4–2 мм | 1,9– 1,0 мм | 0,9– 0,5 мм | 0,49–0,25 мм | 0,249–0,124 мм | 0,125–0,063 мм | <0,063 мм |
|--------|--------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Галька | Гравий | Грубый песок | Крупный песок | Средний песок | Мелкий песок | Тонкий песок | Алевро- лит |

Песок представлен песчаником, ил – мелкозернистым алевролитом, глина – аргиллитом. Сформированы гранулы из крупно-, средне- и тонкообломочных отложений. Образцы почвы высушивали в лабораторных условиях и просеивали через сито машины AS200 с помощью вибропривода. Массу просеянной почвы определяли при помощи лабораторных весов с точностью до 0,01 г. Затем рассчитывали содержание гранулометрических фракций. Долю каждой из них выражали в процентах от массы сухой почвы:

$$A = \frac{G_f}{G_1} \cdot 100,$$

где A – доля фракции, %; G_f – масса фракции, г; G_1 – общая масса пробы, г.

Классификация фракций по размерам и их наименования соответствовали шкале Вентворта. Количество общего азота в почве находили по методу Йохана Кьельдаля [13]. Определение подвижного фосфора выполнено в вытяжке Кирсанова по методу Дениже, в модификации Труога и Мейера [9].

Результаты физико-химического анализа по каждому почвенному разрезу лесного участка в дальнейшем были объединены в сайт для проведения дисперсионного анализа (ANOVA) и характеристики различий свойств почвы, собранной в естественных и искусственных мангровых лесах, а также на литорали (без растительности), расположенной рядом с посадками. При этом был

использован метод скользящей средней для прогнозирования изменения гранулометрического состава почв мангровых лесов, произрастающих в различных лесорастительных условиях. Анализ результатов исследований проведен с использованием программы Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Гранулометрический состав почвы, который исследовали в разные годы в мангровых лесах с различными лесорастительными условиями, представлен в табл. 2–6 и на рис. 2.

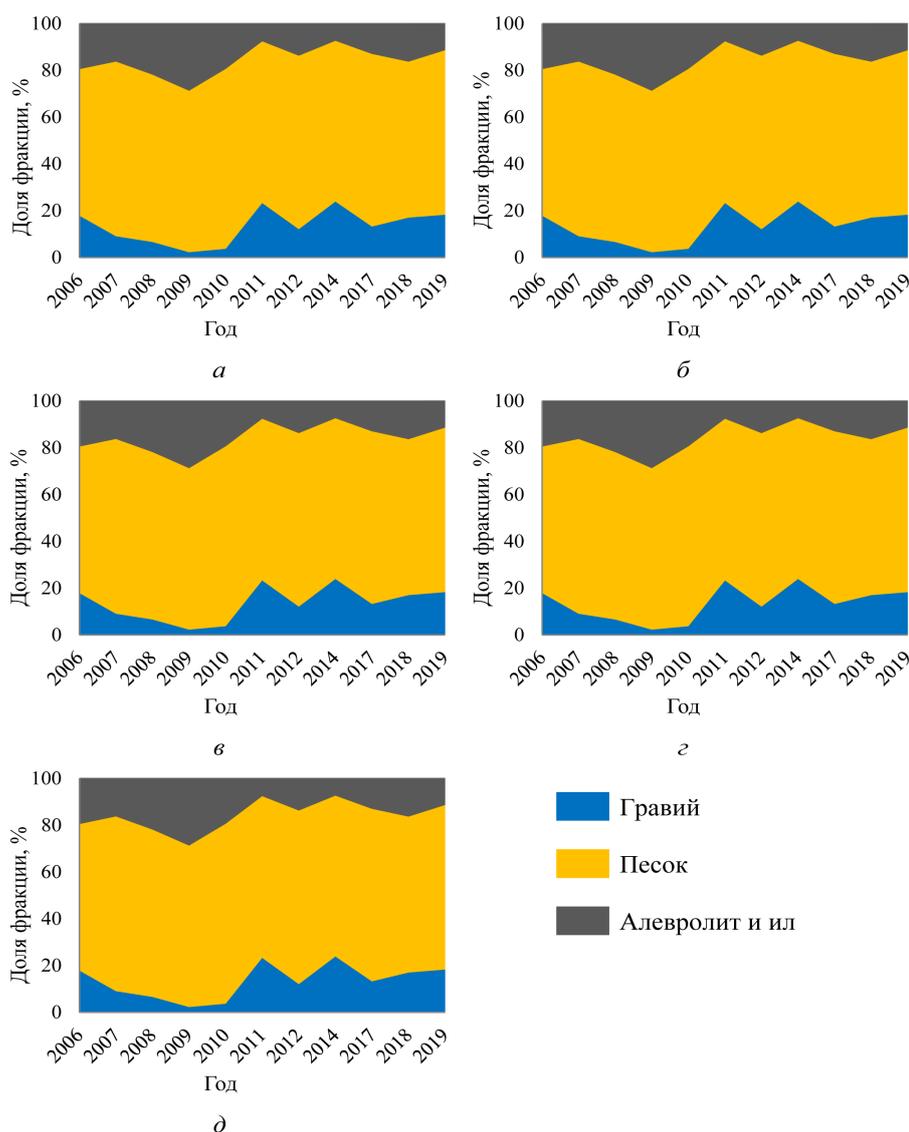


Рис. 2. Динамика по годам гранулометрического состава почвы мангровых лесов, сформированных естественным путем (а), посадками 2004 (б), 2007 (в), 2013 г. (г) и на литорали без растений (д)

Fig. 2. Dynamics by years of soil texture of mangrove forests formed naturally (a), by plantings in 2004 (б), 2007 (в), 2013 (г) and in the littoral zone without plants (д)

Таблица 2

Гранулометрический состав почвы естественных мангровых лесов

| Год | Доля фракции, % | | | | | | | |
|------|-----------------|--------|----------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | >4 мм | 4–2 мм | 1,9– 1,0 мм | 0,9– 0,5 мм | 0,49– 0,25 мм | 0,249– 0,124 мм | 0,125– 0,063 мм | <0,063 мм |
| 2006 | 7,69 | 10,17 | 9,81 | 6,75 | 6,48 | 15,31 | 24,31 | 19,48 |
| 2007 | 4,33 | 4,73 | 8,12 | 6,74 | 6,74 | 17,97 | 35,14 | 16,23 |
| 2008 | 2,62 | 3,98 | 6,97 | 8,59 | 7,43 | 11,85 | 36,71 | 21,85 |
| 2009 | 0,25 | 2,02 | 4,82 | 5,43 | 6,38 | 14,95 | 37,46 | 28,69 |
| 2010 | 0,75 | 2,94 | 7,78 | 8,73 | 6,47 | 12,45 | 41,51 | 19,37 |
| 2011 | 7,91 | 15,39 | 19,91 | 13,88 | 7,28 | 10,69 | 17,35 | 7,59 |
| 2012 | 1,91 | 10,16 | 17,72 | 14,60 | 9,96 | 12,11 | 19,81 | 13,73 |
| 2014 | 6,21 | 17,71 | 24,31 | 16,84 | 9,43 | 9,39 | 8,76 | 7,35 |
| 2017 | 3,52 | 9,71 | 18,22 | 14,42 | 9,95 | 13,63 | 17,57 | 12,98 |
| 2018 | 6,02 | 11,00 | 18,65 | 15,22 | 9,63 | 9,65 | 13,52 | 16,31 |
| 2019 | 5,77 | 12,52 | 13,21 | 12,92 | 11,22 | 12,70 | 20,30 | 11,36 |

Таблица 3

Гранулометрический состав почвы мангровых лесов, высаженных в 2004 г.

| Год | Доля фракции, % | | | | | | | |
|------|-----------------|--------|----------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | >4 мм | 4–2 мм | 1,9– 1,0 мм | 0,9– 0,5 мм | 0,49– 0,25 мм | 0,249– 0,124 мм | 0,125– 0,063 мм | <0,063 мм |
| 2006 | 5,39 | 16,56 | 25,65 | 14,81 | 8,64 | 9,01 | 11,51 | 8,43 |
| 2007 | 6,53 | 12,54 | 22,51 | 15,47 | 9,65 | 9,52 | 16,21 | 7,57 |
| 2008 | 5,95 | 21,64 | 33,83 | 10,26 | 3,25 | 3,56 | 12,01 | 9,50 |
| 2009 | 5,64 | 19,06 | 25,13 | 13,02 | 6,29 | 9,39 | 12,14 | 9,33 |
| 2010 | 1,12 | 6,96 | 23,84 | 15,94 | 8,46 | 13,09 | 18,29 | 12,30 |
| 2011 | 4,54 | 9,02 | 25,09 | 20,18 | 11,70 | 9,59 | 11,28 | 8,60 |
| 2012 | 4,91 | 14,65 | 17,64 | 13,34 | 10,71 | 10,14 | 14,71 | 13,91 |
| 2014 | 4,45 | 15,54 | 25,24 | 15,16 | 7,81 | 8,90 | 9,76 | 13,15 |
| 2017 | 6,75 | 21,40 | 25,48 | 13,13 | 6,48 | 6,36 | 8,09 | 12,33 |
| 2018 | 3,49 | 7,02 | 15,32 | 14,72 | 7,27 | 7,28 | 10,41 | 34,50 |
| 2019 | 2,16 | 9,55 | 18,48 | 13,11 | 12,47 | 10,71 | 10,82 | 22,70 |

Из приведенных в табл. 2–6 данных видно, что в мангровых лесах Дам Бая песчаные почвы занимают большую долю: в естественных мангровых лесах – 70,70 %, в посадках 2004 г. – 67,53 %, 2007 г. – 85,57 %, 2013 г. – 83,59 % и в литорали, расположенной рядом с посадками, – 86,94 %.

Нами проведен дисперсионный анализ влияния возраста мангровых лесов на гранулометрический состав почвы. Выявлено, что существуют статистические различия между исследованными группами почв по содержанию песка в них: все многообразие почв поделено на две группы. К 1-й можно отнести почвы естественных мангровых лесов и посадки мангров 2004 г., ко 2-й – почвы посадок мангровых лесов, заложенных в 2007, 2013 гг., и литорали. Каждая группа почв по содержанию песчаных фракций характеризуется статистическим различием. Содержание песчаных фракций в почве 1-й группы ниже по сравнению с почвой 2-й группы.

Таблица 4

Гранулометрический состав почвы мангровых лесов, высаженных в 2007 г.

| Год | Доля фракции, % | | | | | | | |
|------|-----------------|--------|----------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | >4 мм | 4–2 мм | 1,9– 1,0 мм | 0,9– 0,5 мм | 0,49– 0,25 мм | 0,249– 0,124 мм | 0,125– 0,063 мм | <0,063 мм |
| 2006 | 0 | 7,89 | 36,39 | 33,53 | 13,65 | 5,19 | 3,35 | 0 |
| 2007 | 7,38 | 25,35 | 27,56 | 12,40 | 9,95 | 10,96 | 6,40 | 0 |
| 2008 | 1,46 | 6,12 | 19,03 | 20,26 | 15,97 | 18,79 | 16,19 | 2,18 |
| 2009 | 0,91 | 10,19 | 22,19 | 19,03 | 15,35 | 19,25 | 10,75 | 2,33 |
| 2010 | 0,44 | 3,82 | 13,44 | 20,05 | 19,09 | 24,35 | 18,81 | 0 |
| 2011 | 1,02 | 3,74 | 12,83 | 20,18 | 18,42 | 19,36 | 20,61 | 3,84 |
| 2012 | 1,85 | 5,71 | 17,23 | 26,75 | 19,97 | 12,99 | 12,14 | 3,36 |
| 2014 | 1,20 | 7,46 | 23,46 | 29,50 | 16,94 | 8,90 | 7,41 | 5,13 |
| 2017 | 1,66 | 8,05 | 24,8 | 28,53 | 15,79 | 8,77 | 7,29 | 5,11 |
| 2018 | 1,73 | 4,72 | 14,56 | 14,13 | 9,81 | 11,85 | 21,10 | 22,10 |
| 2019 | 2,17 | 8,20 | 24,62 | 23,88 | 13,35 | 9,84 | 14,31 | 3,63 |

Таблица 5

Гранулометрический состав почвы мангровых лесов, высаженных в 2013 г.

| Год | Доля фракции, % | | | | | | | |
|------|-----------------|--------|----------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | >4 мм | 4–2 мм | 1,9– 1,0 мм | 0,9– 0,5 мм | 0,49– 0,25 мм | 0,249– 0,124 мм | 0,125– 0,063 мм | <0,063 мм |
| 2011 | 1,88 | 7,70 | 22,65 | 27,32 | 16,78 | 10,36 | 9,42 | 3,90 |
| 2012 | 0,58 | 2,39 | 18,41 | 35,61 | 26,79 | 11,34 | 4,88 | 0 |
| 2014 | 2,14 | 2,10 | 10,58 | 20,64 | 16,90 | 17,16 | 17,23 | 13,25 |
| 2017 | 2,76 | 2,89 | 14,93 | 24,87 | 14,37 | 12,88 | 12,37 | 14,93 |
| 2018 | 1,42 | 6,11 | 17,73 | 15,17 | 10,03 | 9,01 | 15,31 | 25,22 |
| 2019 | 2,30 | 3,62 | 24,23 | 27,38 | 16,07 | 10,09 | 11,04 | 5,27 |

Таблица 6

Гранулометрический состав почв литорали без растений

| Год | Доля фракции, % | | | | | | | |
|------|-----------------|--------|----------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | >4 мм | 4–2 мм | 1,9– 1,0 мм | 0,9– 0,5 мм | 0,49– 0,25 мм | 0,249– 0,124 мм | 0,125– 0,063 мм | <0,063 мм |
| 2006 | 0 | 7,89 | 36,39 | 33,53 | 13,65 | 5,19 | 3,35 | 0 |
| 2007 | 7,38 | 25,35 | 27,56 | 12,40 | 9,95 | 10,96 | 6,40 | 0 |
| 2011 | 1,88 | 7,70 | 22,65 | 27,32 | 16,78 | 10,36 | 9,42 | 3,90 |
| 2012 | 0,58 | 2,39 | 18,41 | 35,61 | 26,79 | 11,34 | 4,88 | 0 |
| 2019 | 2,38 | 5,11 | 22,13 | 32,08 | 20,26 | 10,82 | 6,49 | 0,74 |

По содержанию гравия почвы тоже можно разделить на две группы: содержание фракции гравия в почве 1-й группы выше, чем во 2-й. Гравия в почве естественных мангровых лесов 13,39 %, в посадке 2004 г. – 18,62 %, 2007 г. – 10,10 %, 2013 г. – 5,98 %, в литорали – 12,13 %. Такой же результат для алевролита и ила в почвах показывает дисперсионный анализ. Среднее значение содержания этих пород в почве 1-й группы выше по сравнению со 2-й: доля алевролита и ила в почве естественных мангровых лесов составляет 15,90 %, в посадках 2004 г. – 13,84 %, 2007 г. – 6,09 %, 2013 г. – 10,43 %, на литорали – 0,93 %.

Метод скользящей средней позволил спрогнозировать изменение гранулометрического состава почвы мангровых лесов с учетом осадочных пород. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Прогнозирование содержания фракций осадочных пород в почве мангровых лесов

| Место взятия образца почвы | Порода | Содержание различных фракций в почве, % | |
|-----------------------------|----------------|---|-------------------------|
| | | фактическое среднее значение | прогнозируемое значение |
| Естественный мангровый лес | Гравий | 13,39 | 16,91 |
| | Песок | 70,70 | 69,88 |
| | Алевролит и ил | 15,90 | 12,35 |
| Посадки мангров 2004 г. | Гравий | 18,62 | 17,98 |
| | Песок | 67,53 | 61,75 |
| | Алевролит и ил | 13,84 | 20,67 |
| Посадки мангров 2007 г. | Гравий | 10,10 | 8,55 |
| | Песок | 85,57 | 82,21 |
| | Алевролит и ил | 6,09 | 13,87 |
| Посадки мангров 2013 г. | Гравий | 5,98 | 6,37 |
| | Песок | 83,59 | 78,03 |
| | Алевролит и ил | 10,43 | 15,25 |
| Литораль без растительности | Гравий | 12,13 | 6,68 |
| | Песок | 86,94 | 91,78 |
| | Алевролит и ил | 0,93 | 1,55 |

По результатам исследований можно заключить, что гранулометрический состав почв в естественных мангровых лесах и в посадках мангров 2004 г. останется схожим в течение 10–20 лет. Аналогичная картина будет наблюдаться у почв более поздних посадок мангровых лесов и в литорали.

Почвы естественных мангровых лесов формируются под влиянием древесной растительности, морских приливов, осадков и вод, стекающих с континента. С увеличением возраста мангровых древостоев отмечается повышенное содержание в почве алевролита и ила. Анализы, проведенные в марте 2018 г., показали резкий рост содержания этих пород в почвах посадок 2004 г. и естественных мангровых лесов. Это связано, по нашему мнению, с действием тайфуна «Дамри»,

который прошел в провинции Кханьхоа в ноябре 2017 г. Содержание алевролита и ила в естественных мангровых лесах возросло в меньшей степени по сравнению с посадками 2004 г., что свидетельствует о способности мангрового древостоя противостоять водной эрозии почвы.

Общая биомасса мангровых растений достаточно велика, она почти вдвое превосходит биомассу формирующейся под саванной растительности и составляет 1273 ц/га. При этом на корни приходится от 11 до 40 %. Опавшие листья обладают высокой зольностью (до 10 %). В составе золы кроме биогенных элементов встречаются оксиды серы, кальция, алюминия, калия: SO_3 , CaO , MgO , Al_2O_3 , K_2O . В опаде содержится довольно много азота, что создает благоприятные условия для гумусообразования [2]. По данным исследований В.Д. Мухи, на глубине 0–19 см в мангровой слаборазвитой почве доля общего азота равна 0,09 %, а в мангровой типичной почве – 0,15 %. Уровень фосфора в мангровых почвах сильно варьирует [1].

В 2019 г. образцы почвы отбирались не только для оценки гранулометрического состава, но и для анализа содержания биогенных элементов (табл. 8 и рис. 3). Сравнивая наши данные с результатами В.Д. Мухи, можно отметить большое содержание фосфора и азота в почвах мангровых лесов в районе Дам Бай. Общее содержание фосфора также сильно варьирует из-за разницы почвенных условий: в естественных мангровых лесах оно составляет 13,07 %, а в почве посадок 2004 г. – 10,04 %. В слаборазвитой почве насаждений, заложенных в 2007 и 2013 гг., участие азота соответственно 9,04 и 7,38 %, самая низкая его доля в литорали (6,35 %). Общий азот постепенно снижается от почвы естественных мангровых лесов до литорали: 22,68 % – для естественных мангровых лесов, 18,29 % – для посадок 2004 г., 15,17 % – 2007 г., 12,67 % – 2013 г. и 11,23 % – для литорали. Полученные в разные годы результаты исследований биогенных элементов в почве мангровых лесов приведены в табл. 8 и на рис. 3.

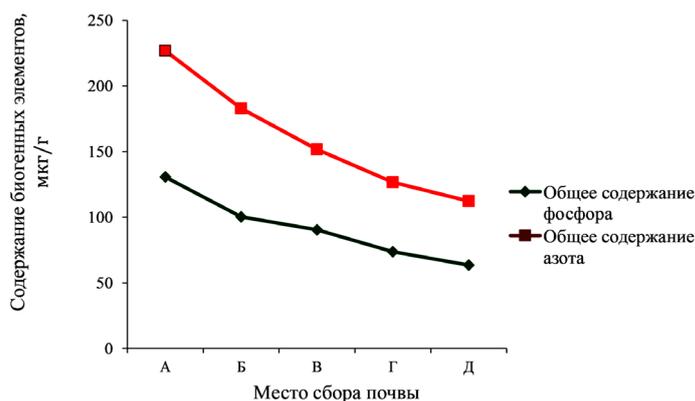


Рис. 3. Содержание биогенных элементов в почве мангровых лесов: в естественной полосе (А); в посадках 2004 (Б); 2007 (В); 2013 гг. (Г); в литорали (Д)

Fig. 3. The content of nutrients in the soil of mangrove forests: in the natural forest belt (A); in the plantings of 2004 (B); 2007 (B); 2013 (Г); in the littoral zone (Д)

Таблица 8

Концентрация биогенных элементов в почвах мангровых лесов

| Место взятия почвы | № разреза | Фосфор | | Азот | |
|-----------------------------|----------------|--------|-------|--------|-------|
| | | мкг/г | % | мкг/г | % |
| Естественные мангровые леса | Л.1.1 | 150,3 | 15,03 | 251,0 | 25,10 |
| | Л.2.1 | 142,8 | 14,28 | 227,0 | 22,70 |
| | Л.3.1 | 136,8 | 13,68 | 227,9 | 22,79 |
| | Л.4.1 | 92,7 | 9,27 | 201,4 | 20,14 |
| | <i>Среднее</i> | 130,70 | 13,07 | 226,80 | 22,68 |
| Посадки мангров 2004 г. | Л.1.2 | 74,2 | 7,42 | 125,4 | 12,45 |
| | Л.2.2 | 110,8 | 11,08 | 205,1 | 20,51 |
| | Л.3.2 | 120,9 | 12,09 | 212,7 | 21,27 |
| | Л.4.2 | 95,5 | 9,55 | 188,3 | 18,83 |
| | <i>Среднее</i> | 100,40 | 10,04 | 182,90 | 18,29 |
| Посадки мангров 2007 г. | Л.1.3 | 63,9 | 6,39 | 105,4 | 10,54 |
| | Л.2.3 | 112,7 | 11,27 | 196,1 | 19,61 |
| | Л.3.3 | 116,5 | 11,65 | 184,0 | 18,40 |
| | Л.4.3 | 68,6 | 6,86 | 121,1 | 12,10 |
| | <i>Среднее</i> | 90,40 | 9,04 | 151,70 | 15,17 |
| Посадки мангров 2013 г. | Л.1.4 | 56,4 | 5,64 | 104,3 | 10,43 |
| | Л.2.4 | 62,0 | 6,20 | 101,1 | 10,11 |
| | Л.3.4 | 109,0 | 10,90 | 189,6 | 18,96 |
| | Л.4.4 | 67,6 | 6,76 | 111,6 | 11,16 |
| | <i>Среднее</i> | 73,80 | 7,38 | 126,70 | 12,67 |
| Литораль | Л.1.5 | 39,5 | 3,95 | 70,2 | 7,02 |
| | Л.2.5 | 61,1 | 6,11 | 114,2 | 11,42 |
| | Л.3.5 | 96,2 | 9,62 | 159,3 | 15,93 |
| | Л.4.5 | 57,3 | 5,73 | 105,4 | 10,54 |
| | <i>Среднее</i> | 63,53 | 6,35 | 112,28 | 11,23 |

Выводы

1. Исследования почв мангровых лесов (естественные и искусственные посадки 2004, 2007 и 2013 гг.), произрастающих в провинции Дам Бай Вьетнама, показали, что леса играют значительную роль в почвообразовании и защищают прибрежные районы страны от неблагоприятных природных условий, в т. ч. от водной эрозии. Почвообразовательный процесс происходит под влиянием мангровой растительности, морских приливов, а также пресных осадков и вод, стекающих с гор и холмов.

2. Гранулометрический состав почв мангровых лесов различается в зависимости от времени формирования древостоев и условий их произрастания. Достоверность статистического различия позволила классифицировать почвы по гранулометрическому составу, разделив их на две группы: типичные латтеритовые почвы (естественные насаждения и посадки 2004 г.) и слабо развитые

латтеритовые почвы (посадки 2007 и 2013 гг.). Обе группы отличаются по зернистости (крупности) фракций.

3. Общее содержание гравия, алевролита и ила в почвах 1-й группы выше, чем в почвах 2-й, т. к. процесс почвообразования в искусственных посадках мангров происходит медленнее по сравнению со старыми естественными древостоями. Почвы 1-й группы содержат песка и глины больше, чем почвы 2-й. Содержание фракций осадочных пород в почвах обеих групп, предположительно, сохранится в течение 10–20 лет, пока искусственные древесные ценозы не достигнут высокой сомкнутости полога и средневозрастной структуры.

4. Выявлена тенденция к снижению содержания биогенных элементов от почв естественных мангровых лесов к их посадкам и до литорали.

5. В целях стабилизации экологической обстановки, эффективной борьбы с водной эрозией и улучшения физико-химических свойств почв рекомендуется продолжить создание искусственных мангровых лесов на берегах залива Нячанг в районе Дам Бай Вьетнама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Муха В.Д. О показателях, отражающих интенсивность и направленность почвенных процессов // Плодородие почв и эффективность удобрений: сб. ст. Харьков. с.-х. ин-та. Харьков, 1980. С. 13–16. Mukha V.D. On Indicators Showing the Intensity and Direction of Soil Processes. *Soil Fertility and Fertilizers Efficiency: Collection of Academic Papers of the Kharkov Agricultural Institute*. Kharkov, 1980, pp. 13–16.
2. Наумов В.Д. Почвы тропиков и субтропиков и их сельскохозяйственное использование. М.: Колос, 2010. 361 с. Naumov V.D. *Soils of the Tropics and Subtropics and Their Agricultural Use*. Moscow, Kolos Publ., 2010. 361 p.
3. Bird E.C.F., Barson M.M. Measurement of Physiographic Changes on Mangrove-Fringed Estuaries Coastlines. *Marine Research in Indonesia*, 1977, vol. 18, pp. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.14203/mri.v18i0.362>
4. Ellison J.C. Impacts of Sediment Burial on Mangroves. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, vol. 37, iss. 8-12, pp. 420–426. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(98\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(98)00122-2)
5. Giesen W., Wulffraat S., Zieren M., Scholten L. *Mangrove Guidebook for Southeast Asia*. FAO and Wetlands International, 2007. 769 p.
6. Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Boston, Pearson, 2014. 516 p.
7. Hogarth P.J. *The Biology of Mangroves and Seagrasses*. Oxford, Oxford University Press, 2007. 280 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198568704.001.0001>
8. Kathiresan K., Bingham B.L. Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 2001, vol. 40, pp. 81–251. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(01\)40003-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(01)40003-4)
9. Kovar J.L., Pierzynski G.M. *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Virginia Tech University, 2009. 122 p.
10. Phan Trong Huan, Nguyen Thi Lan. A Study of Mangrove Forests in the Khanh Hoa Province of Vietnam. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.64>
11. Salmo III S.G., Lovelock C., Duke N.C. Vegetation and Soil Characteristics as Indicators of Restoration Trajectories in Restored Mangroves. *Hydrobiologia*, 2013, vol. 720, iss. 1, pp. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1617-3>
12. Sherman E.R., Fahey T.J., Martinez P. Spatial Patterns of Biomass and Aboveground Net Primary Productivity in a Mangrove Ecosystem in the Dominican Republic. *Ecosystems*, 2003, vol. 6, iss. 4, pp. 384–398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0191-8>

13. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Ed. by E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton, L.S. Clesceri. Washington, DC, APHA, 2012. 1360 p.
14. Twilley R.R., Chen R.H., Hargis T. Carbon Sinks in Mangrove Forests and Their Implications to the Carbon Budget of Tropical Coastal Ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, vol. 64, pp. 265–288. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00477106>
15. Twilley R.R., Day Jr. J.W. Mangrove Wetlands. *Estuarine Ecology*. Ed. by J.W. Day Jr., B.C. Crump, W.M. Kemp, A. Yáñez-Arancibia. New Jersey, Wiley-Blackwell, 2012, pp. 165–202. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118412787.ch7>
16. Udden J.A. Mechanical Composition of Clastic Sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 1914, vol. 25(1), pp. 655–744. DOI: <https://doi.org/10.1130/GSAB-25-655>
17. Vilarrubia T.V. Zonation Pattern of an Isolated Mangrove Community at Playa Medina, Venezuela. *Wetlands Ecology and Management*, 2000, vol. 8, pp. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008458409143>
18. Wentworth C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 1922, vol. 30, no. 5, pp. 377–392. DOI: <https://doi.org/10.1086/622910>
19. *World Mangrove Atlas*. Ed. by M. Spalding, F. Blasco, C. Field. Okinawa, ISME, 1997. 178 p.

УДК 630.231:553.676

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-22-33

ПОДРОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*Pinus sylvestris* L.) НА ОТВАЛАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА

Ю.В. Зарипов, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6174-4001>

С.В. Залесов, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Е.С. Залесова, канд. с.-х. наук, доц.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4403-8118>

А.С. Попов, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAN-6020-2021](https://orcid.org/0000-0002-3060-9461),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3060-9461>

Е.П. Платонов, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8502-1350>

Н.И. Стародубцева, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8251-8537>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37,
г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: zalesov@usfeu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 25.02.20 / Принята к печати 20.05.20

Аннотация. Исследования выполнены на отвалах вскрышных пород и отходов обогащения бедных руд месторождения хризотил-асбеста. Согласно схеме лесорастительного районирования, территорию проведения работ отнесли к округу предлесостепных сосново-березовых лесов Зауральской равнинной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области. Закладывали учетные площадки на террасах отвала по ходовым линиям. На каждой учетной площадке подсчитывали подрост. Его распределяли по категориям жизнеспособности, крупности (мелкий, средний, крупный) и жизненной форме (дерево, куст, стланец). Установлена обеспеченность подростом указанного вида нарушенных земель и даны рекомендации по проведению мероприятий, направленных на ускорение процесса лесовосстановления. Подрост на отвалах представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березой повислой (*Betula pendula* Roth.), тополем дрожащим (осиной) (*Populus tremula* L.) и ивой козьей (*Salix caprea* L.). При этом доминируют сосна обыкновенная и береза повислая. Специфической особенностью формирующегося молодняка является высокая доля сосны обыкновенной стелющейся и кустарниковой формы. Указанные экземпляры зафиксированы среди мелкого и среднего подроста. Именно подрост данных групп высот становится отпадом, не переходя в категорию крупного. Последнее обуславливает необходимость ускорения перевода отвалов в покрытую лесной растительностью площадь, увеличения доли глинистых частиц в верхнем 50-сантиметровом слое отвала или покрытия его поверхности слоем нетрадиционных удобрений, в частности осадков сточных вод. Лесохозяйственное направление рекультивации отвалов на месторождении хризотил-асбеста является наиболее предпочтительным. В качестве главной породы при планировании данных работ следует выбрать сосну обыкновенную.

Для цитирования: Зарипов Ю.В., Залесов С.В., Залесова Е.С., Попов А.С., Платонов Е.П., Стародубцева Н.И. Подрост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на отвалах месторождения хризотил-асбеста // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 22–33. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-22-33

Финансирование: Исследования проведены в рамках научной темы «Экологические аспекты рационального природопользования» № FEUG-2020-0013, по заданию Минобрнауки.

Ключевые слова: нарушенные земли, рекультивация, лесовозобновление, подрост, сосна обыкновенная, месторождения хризотил-асбеста, отвалы.

SCOTS PINE (*Pinus sylvestris* L.) UNDERGROWTH ON THE DUMPS OF THE CHRYSOTILE ASBESTOS DEPOSIT

Yuriy V. Zaripov, Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6174-4001>

Sergey V. Zalesov, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Evgeniia S. Zalesova, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4403-8118>

Artem S. Popov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAN-6020-2021](https://orcid.org/0000-0002-3060-9461),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3060-9461>

Evgeniy P. Platonov, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8502-1350>

Natal'ya I. Starodubtseva, Candidate of Agriculture;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8251-8537>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: zalesov@usfeu.ru

Original article / Received on February 25, 2020 / Accepted on May 20, 2020

Abstract. The studies were carried out on the dumps of overburden rocks and tailings of poor ores of the chrysotile asbestos deposit. According to the scheme of forest site zoning, the studying area belongs to the pre-forest steppe district of pine and birch forests of the Zabaikal'ye plain province of the West Siberian plain forest site area. The survey sites were laid out on the terraces of the dump along the running lines. Undergrowth was counted at each survey site. It was classified by viability, size (small, medium, large), and life form (tree, bush, scrub). The provision with undergrowth of the indicated type of disturbed soils was defined and recommendations for measures aimed at accelerating the process of reforestation were given. Undergrowth on the dumps is represented by Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.), aspen (*Populus tremula* L.), and goat willow (*Salix caprea* L.). Scots pine and silver birch are the dominant species in the undergrowth composition. Large share of Scots pine of scrub and bush form is the specific feature of the developing young growth. These specimens were found among small- and medium-sized undergrowth. It is the undergrowth of these heights that becomes an annual attrition without passing into the large-sized category. The latter is the main reason for faster conversion of the dumps into forest-covered area, for increasing the share of clay particles in the upper 50 cm thick dump layer, or for coating the dump surface by non-traditional fertilizers, in particular sewage sludge. It was noted that silvicultural trend in the dump reclamation on the chrysotile asbestos deposit is the most preferable. Scots pine should be preferred as the primary species for reclamation planning.

For citation: Zaripov Yu.V., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Popov A.S., Platonov E.P., Starodubtseva N.I. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Undergrowth on the Dumps of the Chrysotile Asbestos Deposit. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 22–33. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-22-33

Funding: The research was carried out within the framework of the scientific topic “Ecological Aspects of Rational Use of Natural Resources” No. FEUG-2020-0013 according to the assignment of the Ministry of Education and Science.

Keywords: disturbed soils, reclamation, reforestation, undergrowth, Scots pine, chrysotile asbestos deposit, dumps.

Введение

Добыча полезных ископаемых и их переработка неразрывно связаны с изъятием земель для размещения отвалов вскрышных пород и отходов обогащения бедных руд [16, 17, 19]. После завершения складирования отвалы представляют собой рукотворные сооружения различной величины, ухудшающие существующий природный ландшафт и нередко представляющие угрозу для природы и населения [8, 13, 18, 23, 24]. Форма, высота и степень опасности для окружающей среды будут существенно различаться в зависимости от механического и химического состава содержащегося в отвалах. Последнее обуславливает сложность проведения рекультивационных работ, поскольку они предусматривают учет потенциального плодородия земель, химического состава почв и природно-экономических условий конкретного региона [4, 15, 20, 21].

В научной литературе широко освещен опыт рекультивационных работ как в нашей стране, так и за ее пределами [11, 22, 25, 27, 28]. Особое внимание при этом уделено результатам таких работ и методам их оценки [12, 14, 26].

На Урале, уже много лет являющемся поставщиком самых различных полезных ископаемых, накоплен значительный опыт рекультивации нарушенных земель, см. например [2, 3, 7]. Однако в научной литературе крайне мало работ, посвященных рекультивации отвалов вскрышных пород и отходов обогащения бедных руд на месторождениях хризотил-асбеста. Последнее в сочетании со значительными объемами добычи на Урале данных минеральных руд обусловило направление наших исследований.

Целью исследований стал анализ успешности естественного зарастания древесной растительностью отвалов вскрышных пород и отходов обогащения бедных руд на месторождении хризотил-асбеста и разработка на этой основе предложений по ускорению процесса естественной рекультивации.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены на территории округа предлесостепных сосново-березовых лесов Зауральской равнинной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области [6].

Объектом изучения является древесная растительность, естественно сформировавшаяся на отвале № 3 (Восточный отвал) Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Отвал образовался в результате сухого складирования вскрышных пород и отходов обогащения бедных руд. Он имеет площадь 188 га и представляет собой трехуровневый полигон. Схема расположения Восточного отвала приведена на рис. 1.

Отвал начал формироваться в 1951 г., а его отсыпка завершилась в 1979 г. При общем объеме 453,1 млн т отвал содержит 36,1 млн т вскрышных пород, 53,0 млн т отходов обогащения и 38,8 млн т бедных асбестосодержащих руд. Террикон отвала имеет 3 уровня (яруса). Первый уровень находится на высоте 45–50 м, второй – 70–75 м и третий, верхний – на высоте 105–110 м от поверхности почвы.

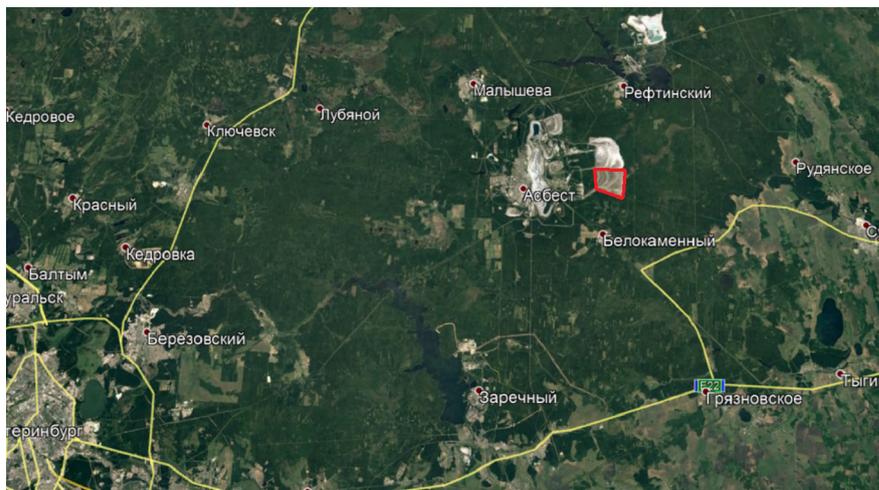


Рис. 1. Схема расположения отвала № 3 (Восточный отвал)

Fig. 1. Layout of dump No. 3 (Vostochny dump)

Содержимое отвала представлено обломками: перидотитов – 45 %, серпентинитов – 40 %, дунитов – 7 %, габбро – 5 %, диоритов – 1 % и глинистыми породами – 2 %. Указанные породы имеют устойчивое состояние и характеризуются следующей крупностью кусков, слагающих отвал: менее 5 см – 25 %, 5–10 см – 31 %, 11–20 см – 28 %, 21–50 см – 6 % и более 50 см – 11 %.

Особо следует отметить, что в содержащихся в отвале породах практически нет опасных (в экологическом плане) химических элементов, таких как медь, цинк, свинец, сера, фтор, бор, селен.

Определение количественных и качественных показателей подроста производили на основании общеизвестных апробированных методик [9, 10]. В основу исследований положен метод учетных площадок размером 2×2 м, которые закладывались на заранее обозначенных трансектах через равные расстояния. Трансекты располагали параллельно друг другу на каждом из уровней отвала на расстоянии 15, 100, 200 и 300 м от его края (откоса). На каждой трансекте выделено по 20 учетных площадок.

При пересчете подроста на экспериментальных площадках его распределяли по видам, категориям жизнеспособности и группам высоты: до 0,5 м – мелкий; 0,5–1,5 м – средний; выше 1,5 м – крупный. Полученные показатели пересчитывали на 1 га. Дополнительно устанавливали количество подроста в пересчете на крупный. При этом полученное число мелкого подроста умножали на коэффициент 0,5; среднего – на 0,8; крупного – на 1,0. По данным о густоте определяли состав подроста, а выраженное в процентах отношение количества учетных площадок с наличием конкретного древесного вида подроста к общему количеству заложенных площадок свидетельствовало о встречаемости вида.

Кроме того, все жизнеспособные экземпляры подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) относили к одной из трех жизнеспособных форм. Форма «дерево» представляет собой экземпляры нормального развития (рис. 2, а); куст – с несколькими стволиками (рис. 2, б); стелющаяся – с наклоненными к поверхности субстрата стволиками (рис. 2, в).



а



б



в

Рис. 2. Подрост формы: а – дерево, или нормальное развитие; б – куст; в – стелющаяся

Fig. 2. Undergrowth forms: а – tree, or normal development; б – bush; в – scrub

Сравнение данных о составе и густоте подроста с действующими нормативными документами [10] позволило определить обеспеченность подростом и наметить пути ускорения процесса естественного зарастания отвалов древесной растительностью.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные нами исследования показали, что подрост, формирующийся на отвалах месторождений хризотил-асбеста, представлен четырьмя видами: сосна обыкновенная, береза повислая (*Betula pendula* Roth.), тополь дрожащий (осина) (*Populus tremula* L.) и ива козья (*Salix caprea* L.).

Состав подроста, его густота и встречаемость зависят не только от уровня отвала, но и от расстояния до его откоса (края) (табл. 1).

Материалы табл. 1 свидетельствуют о том, что на большинстве трансект густота подроста в пересчете на крупный значительно превышает показатели, необходимые для перевода нарушенных земель в покрытую лесной растительностью площадь [10]. При этом в составе подроста доминируют сосна обыкновенная и береза повислая, густота которых в пересчете на крупный подрост варьируется по трансектам от 3,7 до 20,7 и от 4,1 до 14,1 тыс. шт./га соответственно. Худшие условия для накопления подроста при этом создаются у кромки откоса (рис. 3).

Особо следует отметить высокие показатели встречаемости подроста как сосны, так и березы. Для сосны этот показатель составляет по трансектам 47...77 %, для березы – 40...86 %.

Таблица 1

Характеристика жизнеспособных экземпляров подроста на отвалах вскрышных пород и отходов обогащения бедных руд месторождения хризотил-асбеста

| Расстояние до откоса, м | Состав подроста в перерасчете на крупный | Количество подроста по группам высот, тыс. шт./га | | | | | Встречаемость, % |
|-------------------------|--|---|---------|---------|-------|------------------------|------------------|
| | | мелкий | средний | крупный | итого | в пересчете на крупный | |
| <i>Первый уровень</i> | | | | | | | |
| 15 | 5,9С | 10,0 | 1,7 | 0 | 11,7 | 6,4 | 50 |
| | 3,9Б | 4,0 | 2,7 | 0 | 6,7 | 4,1 | 50 |
| | 0,2ИВ | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | <i>Итого</i> | 10,4 | 4,7 | 0 | 19,0 | 10,7 | |
| 100 | 6,8Б | 14,7 | 7,3 | 0 | 22,0 | 13,2 | 77 |
| | 2,9С | 3,0 | 4,3 | 0,7 | 8,0 | 5,6 | 47 |
| | 0,3Ос | 0,7 | 0,3 | 0 | 1,0 | 0,6 | 7 |
| | <i>Итого</i> | 18,4 | 11,9 | 0,7 | 31,0 | 19,4 | |
| 200 | 6,5Б | 16,0 | 4,0 | 0,3 | 20,3 | 11,5 | 67 |
| | 2,4С | 3,3 | 3,3 | 0 | 6,6 | 4,3 | 53 |
| | 1,1Ос | 0 | 2,3 | 0 | 2,3 | 1,9 | 13 |
| | <i>Итого</i> | 19,3 | 9,6 | 0,3 | 29,3 | 17,7 | |
| 300 | 4,6Б | 6,0 | 3,6 | 1,7 | 11,3 | 7,6 | 53 |
| | 3,7С | 7,0 | 2,6 | 0,3 | 9,9 | 6,0 | 67 |
| | 1,7Ос | 4,0 | 1,0 | 0 | 5,0 | 2,8 | 33 |
| | <i>Итого</i> | 17,0 | 7,2 | 2,0 | 26,2 | 16,4 | |
| <i>Второй уровень</i> | | | | | | | |
| 15 | 5,0С | 13,0 | 0,7 | 0 | 13,7 | 7,0 | 73 |
| | 4,7Б | 12,0 | 0 | 0,7 | 12,7 | 6,7 | 53 |
| | 0,3ИВ | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 0,5 | 10 |
| | <i>Итого</i> | 26,0 | 0,7 | 0,7 | 27,4 | 14,2 | |
| 100 | 4,8Б | 9,0 | 1,3 | 0,3 | 10,6 | 5,9 | 63 |
| | 4,0С | 4,7 | 2,3 | 0,7 | 7,7 | 4,8 | 47 |
| | 1,2Ос | 2,0 | 0,7 | 0 | 2,7 | 1,5 | 20 |
| | <i>Итого</i> | 15,7 | 4,3 | 1,0 | 21,0 | 12,2 | |
| 200 | 5,8С | 31,3 | 1,3 | 4,0 | 36,6 | 20,7 | 63 |
| | 4,0Б | 17,7 | 5,3 | 1,0 | 24,0 | 14,1 | 86 |
| | 0,1Ос | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,3 | 3 |
| | 0,1ИВ | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| <i>Итого</i> | 49,0 | 7,2 | 5,0 | 61,2 | 35,3 | | |
| <i>Третий уровень</i> | | | | | | | |
| 15 | 5,2Б | 5,3 | 1,3 | 0,3 | 6,9 | 4,0 | 43 |
| | 4,8С | 4,7 | 1,3 | 0,3 | 6,3 | 3,7 | 63 |
| | <i>Итого</i> | 10,0 | 2,6 | 0,6 | 13,2 | 7,7 | |
| 100 | 5,4С | 9,3 | 4,0 | 0 | 13,3 | 7,8 | 73 |
| | 4,2Б | 3,0 | 5,0 | 0,7 | 8,7 | 6,2 | 40 |
| | 0,3Ос | 0,3 | 0,3 | 0 | 0,6 | 0,4 | 7 |
| | 0,1ИВ | 0,3 | 0 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | <i>Итого</i> | 12,9 | 9,3 | 0,7 | 22,9 | 14,6 | |
| 200 | 6,2С | 17,3 | 0,7 | 0,3 | 18,3 | 9,5 | 77 |
| | 3,5Б | 0,7 | 3,7 | 2,0 | 6,4 | 5,3 | 40 |
| | 0,2Ос | 0 | 0 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 3 |
| | 0,1ИВ | 0,3 | 0 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | <i>Итого</i> | 18,3 | 4,4 | 2,6 | 25,3 | 15,3 | |

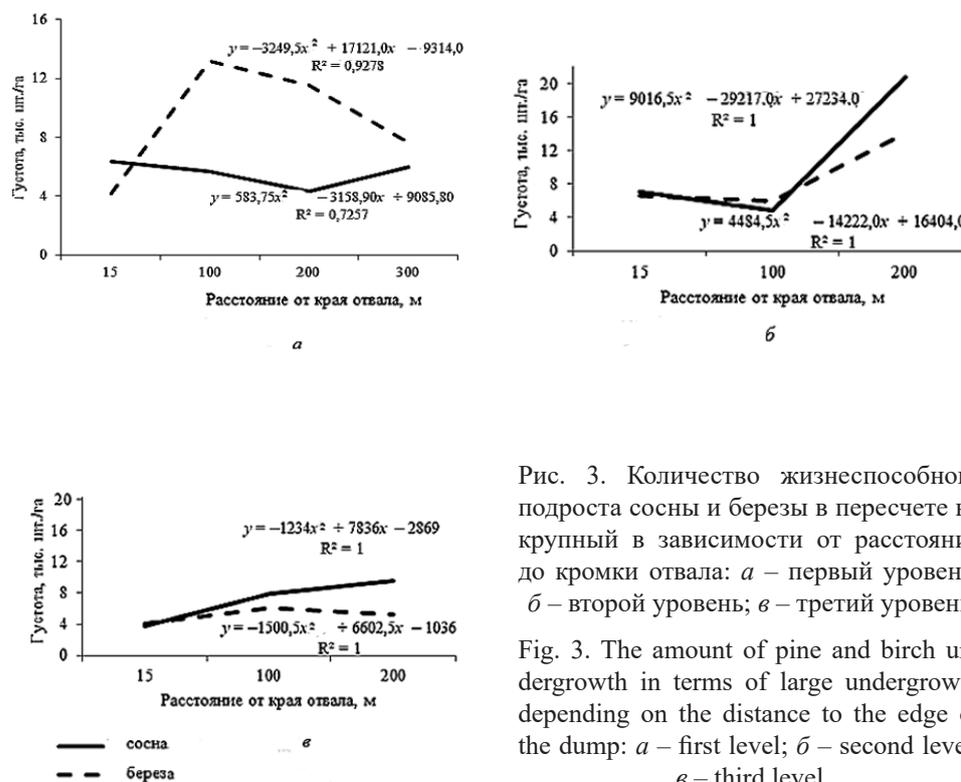


Рис. 3. Количество жизнеспособного подроста сосны и березы в пересчете на крупный в зависимости от расстояния до кромки отвала: а – первый уровень; б – второй уровень; в – третий уровень

Fig. 3. The amount of pine and birch undergrowth in terms of large undergrowth depending on the distance to the edge of the dump: а – first level; б – second level; в – third level

В то же время, несмотря на завершение отсыпки отвала 39 лет назад, количество крупного подроста сосны не превышает 4,0, а березы 2,0 тыс. шт./га. При этом указанное максимальное количество подроста зафиксировано в 200 м от кромки отвала, а на большинстве трансект крупный подрост сосны и березы либо отсутствует, либо его густота не превышает 0,7 тыс. шт./га. Причина заключается в интенсивном отпаде мелкого и среднего подроста (табл. 2).

Данные табл. 2 показывают, что в отпад переходит преимущественно подрост сосны. Другими словами, на отвале происходит смена поколений мелкого и среднего подроста, а не формирование молодняков.

Жесткими лесорастительными условиями объясняется присутствие на отвале подроста сосны обыкновенной разных жизненных форм (табл. 3).

Худшие условия для формирования подроста сосны обыкновенной, как видно из табл. 3, наблюдаются у откоса отвала. С увеличением крупности молодняка возрастает доля экземпляров нормальной формы – дерево. В частности, указанную форму имеют все экземпляры крупного подроста. В то же время значительная доля мелкого и среднего подроста форм стелющейся и кустовой позволяет прогнозировать интенсивный отпад.

Таблица 2

**Гибель подроста на отвале вскрышных пород
и отходов обогащения бедных руд месторождения хризотил-асбеста**

| Расстояние до откоса, м | Состав погибшего подроста в пересчете на крупный | Количество погибшего подроста по группам высот, тыс. шт./га | | | | Встречаемость, % |
|-------------------------|--|---|---------|-------|------------------------|------------------|
| | | мелкий | средний | итого | в пересчете на крупный | |
| <i>Первый уровень</i> | | | | | | |
| 15 | 10,0С | 9,3 | 0 | 9,3 | 4,7 | 50 |
| 100 | 10,0С | 7,0 | 1,0 | 8,0 | 4,3 | 57 |
| 200 | 8,5С | 8,7 | 0,3 | 9,0 | 4,6 | 60 |
| | 1,50с | 0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 10 |
| | <i>Итого</i> | 8,7 | 1,3 | 10,0 | 5,4 | |
| 300 | 0,3Б | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | 9,2С | 9,0 | 1,0 | 10,0 | 5,3 | 50 |
| | 0,5Ив | 0 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | <i>Итого</i> | 9,3 | 1,3 | 10,6 | 5,7 | |
| <i>Второй уровень</i> | | | | | | |
| 15 | 8,7С | 1,7 | 0,3 | 2,0 | 1,1 | 20 |
| | 1,3Б | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | <i>Итого</i> | 2,0 | 0,3 | 2,3 | 1,3 | |
| 100 | 10,0С | 15,0 | 0,7 | 15,7 | 8,0 | 90 |
| 200 | 9,4С | 22,3 | 0 | 22,3 | 11,1 | 67 |
| | 0,4Б | 1,0 | 0 | 1,0 | 0,5 | 10 |
| | 0,20с | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,2 | 3 |
| | <i>Итого</i> | 23,6 | 0 | 23,6 | 11,8 | |
| <i>Третий уровень</i> | | | | | | |
| 15 | 10,0С | 5,0 | 0 | 5,0 | 2,5 | 37 |
| 100 | 10,0С | 6,0 | 0 | 6,0 | 3,0 | 37 |
| 200 | 8,9С | 8,7 | 0 | 8,7 | 4,3 | 50 |
| | 1,1Б | 0 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 6 |
| | <i>Итого</i> | 8,7 | 0,7 | 9,4 | 4,9 | |

Известно [1], что подрост при систематическом объедании его животными приобретает форму куста. На отвалах животные не пасутся, поэтому предполагаем, что экземпляры подроста форм стелющейся и кустовой имеют такие очертания из-за жестких лесорастительных условий.

Таблица 3

Распределение подроста сосны обыкновенной по жизненным формам, %

| Расстояние до откоса, м | Мелкий подрост | | | Средний подрост | | | Крупный подрост |
|-------------------------|----------------|------|------------|-----------------|------|------------|-----------------|
| | Дерево | Куст | Стелющаяся | Дерево | Куст | Стелющаяся | Дерево |
| <i>Первый уровень</i> | | | | | | | |
| 15 | 12,8 | 15,4 | 71,8 | 61,2 | 26,3 | 12,5 | 0 |
| 100 | 20,0 | 5,0 | 75,0 | 68,0 | 26,2 | 5,8 | 0 |
| 200 | 66,7 | 2,0 | 31,3 | 73,2 | 10,2 | 16,6 | 100 |
| 300 | 66,6 | 16,7 | 16,7 | 86,7 | 9,4 | 3,9 | 100 |
| <i>Второй уровень</i> | | | | | | | |
| 15 | 35,9 | 18,4 | 45,7 | 73,2 | 15,6 | 11,2 | 0 |
| 100 | 69,4 | 22,1 | 8,5 | 74,2 | 19,9 | 5,9 | 100 |
| 200 | 72,3 | 18,3 | 9,4 | 83,1 | 10,7 | 6,2 | 100 |
| <i>Третий уровень</i> | | | | | | | |
| 15 | 22,4 | 15,3 | 62,3 | 82,0 | 9,8 | 8,2 | 100 |
| 100 | 25,3 | 15,8 | 58,9 | 84,3 | 11,8 | 3,9 | 0 |
| 200 | 71,2 | 8,7 | 20,1 | 78,2 | 20,6 | 1,2 | 100 |

Выполненные нами ранее исследования показали, что ускорить процесс зарастания отвалов на месторождениях хризотил-асбеста можно увеличением до 50 % доли глинистых частиц в верхнем слое отвала при техническом этапе рекультивации или нанесением на поверхность отвала нетрадиционных удобрений, в частности осадка сточных вод [5].

Выводы

1. На отвалах вскрышных пород и отходов обогащения асбестосодержащих руд естественно формируется подрост сосны обыкновенной, березы повислой, осины и ивы козьей. При этом в его составе доминируют сосна обыкновенная и береза повислая.

2. На всех уровнях отвала общая густота подроста является высокой. Однако процесс накопления крупного подроста сильно растянут во времени из-за отпада мелкого и среднего подроста.

3. Жесткие лесорастительные условия, складывающиеся на отвале, обусловили высокую долю среди мелкого и среднего подроста экземпляров сосны обыкновенной стелющейся и кустовой формы.

4. Худшие условия для накопления подроста на всех уровнях складываются вблизи откоса отвала.

5. В районе исследований лесохозяйственное направление рекультивации является наиболее приемлемым.

6. Ускорить процесс естественной рекультивации отвалов на месторождениях хризотил-асбеста можно увеличением доли глинистых частиц в верхнем слое отвала или нанесением на его поверхность нетрадиционных удобрений, например осадка сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ермакова М.В. Особенности посттравматического формирования и роста деревьев в молодняках сосны Зауралья: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Уфа, 2016. 44 с. Ermakova M.V. *Features of Post-Traumatic Formation and Growth of Trees in Young Pine Growth of Zaural'ye*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Ufa, 2016. 44 p.
2. Залесов С.В., Залесова Е.С., Зарипов Ю.В., Оплетаев А.С., Толкач О.В. Рекультивация нарушенных земель на месторождении тантал-бериллия // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22, № 12. С. 63–67. Zalesov S.V., Zalesova E.S., Zaripov Yu.V., Opletaev A.S., Tolkach O.V. Reclamation of Damaged Soils on Tantal-Berill Deposit. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, vol. 22, no. 12, pp. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-63-67>
3. Залесов С.В., Залесова Е.С., Зверев А.А., Оплетаев А.С., Терин А.А. Формирование искусственных насаждений на золоотвале Рефтинской ГРЭС // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 66–73. Zalesov S.V., Zalesova E.S., Zverev A.A., Opletaev A.S., Terin A.A. The Method of Growing Artificial Pine Stands at the Ash Dumps of the Refinskaya Power Plant. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 66–73. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/068/lh7.pdf>
4. Зарипов Ю.В. Эффективность лесной рекультивации нарушенных земель на месторождениях хризотил-асбеста и тантал-бериллия: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук, Екатеринбург, 2018. 19 с. Zaripov Yu.V. *Efficiency of Forest Reclamation of Disturbed Lands at Chrysotile Asbestos and Tantalum-Beryllium Deposits*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, 2018. 19 p.
5. Зарипов Ю.В., Залесов С.В., Залесова Е.С., Крюк В.И., Фрейберг И.А. Опыт рекультивации отвалов хризотил-асбеста // Биологическая рекультивация нарушенных земель: материалы X всерос. науч. конф. с междунар. участием. Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 124–131. Zaripov U.V., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Kruk V.I., Freiberg I.A. The Experience of Recultivation of Dumps of Chrysotile-Asbestos. *Biological Recultivation of Disturbed Lands: Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2017, pp. 124–131.
6. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с. Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Forest Growth Conditions and Forest Types in Sverdlovsk Region*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1973. 176 p.
7. Михеев А.Н. Лесная рекультивация нарушенных земель горных склонов в зоне влияния медеплавильного производства (на примере ЗАО «Карабашмедь»): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2013. 20 с. Mikheyev A.N. *Forest Reclamation of Disturbed Lands of Mountain Slopes in the Zone of Influence of Copper-Smelting Production (Case Study of Karabashmed)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, 2013. 20 p.
8. Моторина Л.В., Овчинников В.А. Промышленность и рекультивация земель. М.: Мысль, 1975. 240 с. Motorina L.V., Ovchinnikov V.A. *Industry and Land Reclamation*. Moscow, Mysl' Publ., 1975. 240 p.
9. ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. М.: Экология, 1992. 17 с. *Industry Standard. OST 56-69-83. Forest Inventory Test Areas. Method of Laying out*. Moscow, Ekologiya Publ., 1992. 17 p.
10. Правила лесовосстановления: утв. приказом Минприроды России от 25.03.2019 г. № 188. *Rules for Reforestation: Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of Russia Dated March 25, 2019 No. 188*.

11. Dentoni V., Grosso B., Massacci G., Pinna F. Validation of a Wind Erosion Model for Tailings Basins: Wind Tunnel Design and Atmospheric Boundary Layer Simulation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2020, vol. 34, iss. 8, pp. 562–572. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1678226>
12. Edraki M., Baumgartl T., Mulligan D., Fegan W., Munawar A. Geochemical Characteristics of Rehabilitated Tailings and Associated Seepages at Kidston Gold Mine, Queensland, Australia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2019, vol. 33, iss. 2, pp. 133–147. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1362542>
13. Gautam S., Patra A.K., Sahu S.P., Hitch M. Particulate Matter Pollution in Open-cast Coal Mining Areas: A Threat to Human Health and Environment. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2018, vol. 32, iss. 2, pp. 75–92. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1218110>
14. Hao G., Yun F., Fangfang L., Yang L., WenLi Y., Yin Y. Soil Diagnosis and Land Suitability Assessment for Vegetation Restoration on Coal Waste Piles in Liupanshui, Guizhou, China. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30, pp. 209–216. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1036519>
15. Hogberg J.I., Pinno B.D., MacKenzie M.D. Evaluating Foliar Nutrient Concentration as an Indicator of Soil Nutrients in Reclaimed and Natural Forests in Alberta, Canada. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2020, vol. 34, pp. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1516330>
16. Hu Z. Special Issue on Land Reclamation in Ecological Fragile Areas. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2018, vol. 5, iss. 1, pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0206-5>
17. Lehmann D., Brinkmann K., Diogo R.V.C., Buerkert A. Temporal and Spatial Changes of Land Use in Rare Metal Mining Areas of Rwanda. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017, vol. 31, iss. 8, pp. 519–529. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1160490>
18. Maiti S.K., Kumar A., Ahirwal J. Bioaccumulation of Metals in Timber and Edible Fruit Trees Growing on Reclaimed Coal Mine Overburden Dumps. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30, iss. 3, pp. 231–244. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1038864>
19. Moomen A.-W., Dewan A. Assessing the Spatial Relationships between Mining and Land Degradation: Evidence from Ghana. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017, vol. 31, iss. 7, pp. 505–518. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1188253>
20. Nurtjahya E., Franklin J.A. Some Physiological Characteristics to Estimate Species Potential as a Mine Reclamation Ground Cover. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2019, vol. 33, pp. 75–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1333296>
21. Sears A.E., Hopkinson L.C., Quaranta J.D. Predicting Erosion at Valley Fills with Two Reclamation Techniques in Mountainous Terrain. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2020, vol. 34, iss. 4, pp. 223–237. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1516938>
22. Sedivec K., Piper C., Printz J., Wick A., Daigh A., Limb R. *Successful Reclamation of Lands Disturbed by Oil and Gas Development and Infrastructure Construction*. R1728. Fargo, NDSU, 2014. 16 p.
23. Stanturf J.A. Future Landscapes: Opportunities and Challenges. *New Forests*, 2015, vol. 46, pp. 615–644. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9500-x>

24. Yang K., Cattle S.R. Contemporary Sources and Levels of Heavy Metal Contamination in Urban Soil of Broken Hill, Australia after *ad hoc* Land Remediation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2018, vol. 32, iss. 1, pp. 18–34. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1208859>

25. Yeiser J.M., Baxley D.L., Robinson B.A., Morgan J.J., Stewart J.N., Barnard J.O. A Comparison of Coal Mine Reclamation Seed Mixes in Kentucky: Implications for Grassland Establishment in Appalachia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30, pp. 257–267. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1041682>

26. Zhang Q.J., Lu J.N. Suitability Evaluation on Land Reclamation in Hebei Fanshan Phosphate Mine. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1010-1012, pp. 1291–1296. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1010-1012.1291>

27. Zhao S., Zhang L. The Current Policy and Problems about Land Reclamation of Chinese Mainland. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation*, 2015, vol. 4, iss. 1, pp. 117–136. DOI: <https://doi.org/10.21000/JASMR15010114>

28. Zhou W., Yin W., Peng X., Liu F., Yang F. Comprehensive Evaluation of Land Reclamation and Utilisation Schemes Based on a Modified VIKOR Method for Surface Mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2018, vol. 32, iss. 2, pp. 93–108. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1228031>

УДК 630*181.1:630*228.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-34-47

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СОСНОВОГО ДРЕВОСТОЯ НА ЮЖНОМ СКЛОНЕ ВОСТОЧНОГО САЯНА

Н.Ф. Овчинникова, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAE-2105-2020](https://orcid.org/0000-0002-2417-3796).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2417-3796>

Институт леса им. В.Н. Сукачёва Сибирского отделения РАН – Красноярский научный центр СО РАН, Академгородок, 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: nf@ksc.krasn.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 05.03.20 / Принята к печати 11.05.20

Аннотация. Из-за относительно длительного развития и большой продолжительности жизни лесообразующих видов значительная часть выводов о динамике насаждений основана на данных, собранных косвенными методами сравнительного изучения, анализа сообществ, составляющих гипотетически временные или пространственные сукцессионные ряды, и нуждается в проверке и уточнении. Наиболее достоверные сведения о динамике древостоев могут быть получены на стационарных объектах – постоянных пробных площадях. Представлены результаты анализа материалов многолетнего мониторинга (1968–2012 гг.) соснового (*Pinus sylvestris* L.) древостоя в низкогорной части Восточного Саяна на южном склоне крутизной 7–8°. Использован метод периодических замеров морфометрических показателей закартированных на постоянной пробной площади деревьев. Показано, что сумма площадей сечения стволов деревьев на высоте 1,3 м и запасы древесины на нижнем, центральном и верхнем равновеликих участках пробной площади за весь период наблюдений отличались не более чем на 10 %. В то же время неоднородность экологических условий, имеющая место даже на небольшом отрезке пологого склона, сказывается на интенсивности самоизреживания насаждения. Уже в 42-летнем древостое отношение густоты на нижнем, центральном и верхнем участках составляло 1:1,5:2,1. Разница в густоте древостоя по склону со временем постепенно снижалась, но и во время его последнего учета оставалась около 30 %. За годы наблюдений на нижнем участке сохранилось 53 % сосен, на центральном – 47 %, на верхнем – всего 32 %. Вычисленный средний возраст усохших деревьев показал, что во всех группах естественных ступеней толщины наблюдалось более раннее отмирание сосен внизу склона с постепенным увеличением возраста усыхания вверх по склону. Деревья с большим диаметром ствола (первый учет) погибали позднее. Все это приводило к перестройке горизонтальной структуры насаждения, снижению среднего диаметра и среднего объема деревьев вверх по склону. Характерный для горных лесов клинальный тип размещения деревьев, влияющий на их морфологические показатели, необходимо учитывать при исследовании и моделировании лесных экосистем, а также при проведении лесохозяйственных мероприятий.

Для цитирования: Овчинникова Н.Ф. Особенности пространственно-временной структуры соснового древостоя на южном склоне Восточного Саяна // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 34–47. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-34-47

Благодарность: Автор признателен д-ру биол. наук, проф. В.В. Кузьмичеву за предоставленные архивные материалы, а также канд. физ.-мат. наук О.П. Секретенко и студентам Сибирского федерального университета А. Кравченко и Е. Мельниковой за помощь в получении новых данных в 2012 г.

Ключевые слова: древостой, сосна обыкновенная, постоянная пробная площадь, динамика роста и пространственной структуры, клинальное размещение, Восточный Саян.

SPATIOTEMPORAL STRUCTURE FEATURES OF A PINE STAND ON THE SOUTH SLOPE OF THE EASTERN SAYAN MOUNTAINS

Natalya F. Ovchinnikova, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAE-2105-2020](https://orcid.org/0000-0002-2417-3796),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2417-3796>

V.N. Sukachev Institute of Forest of the Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: nf@ksc.krasn.ru

Original article / Received on March 5, 2020 / Accepted on May 11, 2020

Abstract. Due to relatively long development and long life of forest-forming species most of the conclusions on stand dynamics are based on the data collected by indirect methods of comparative research and analysis of cenosis forming theoretically temporal and spatial succession sequences and need to be verified and clarified. The most reliable results on the stand dynamics can be received on stationary objects such as permanent sample areas. The article presents the analysis results of long-term monitoring (1968–2012) of a pine (*Pinus sylvestris* L.) stand in low-mountain Eastern Sayan on the south slope with a steepness of 7–8°. The intermittent test of morphometric indicators of trees mapped on the permanent sample area was used. It is shown that the sum of tree trunk cross-section areas at breast height (1.3 m) varied by no more than 10 % with timber reserves on the lower, central and upper equal sites of the sample area during the entire observation period. At the same time heterogeneity of ecological conditions, taking place even on a small section of a smooth slope, influences the plantation self-thinning intensity. In the 42-year-old stand density ratio at lower, central and upper sites was 1:1.5:2.1. Stand density difference along the slope had been decreasing gradually over time, although it remained around 30 % at the time of the last observation. Over the years of observation, 53, 47, and 32 % of pines on the lower, central, and upper sites, respectively, have survived. The calculated average age of the died trees showed that in all groups of natural diameter classes, there was an earlier die-off of pines at the bottom of the slope with an increase in dying age up to the slope. Trees with larger trunk diameter (first telling) died later. All this led to a rearrangement of the horizontal structure of the plantation, a decrease in the average diameter and average volume of trees up to the slope. Typical for mountain forests clinal tree distribution, which affects their morphological indicators, is important to consider when studying and modeling forest ecosystems, as well as when implementing forest management measures.

For citation: Ovchinnikova N.F. Spatiotemporal Structure Features of a Pine Stand on the South Slope of the Eastern Sayan Mountains. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 34–47. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-34-47

Acknowledgements: The author is grateful to Doctor of Biology, Professor V.V. Kuzmichev for the provided archival materials and Candidate of Physics and Mathematics O.P. Sekretenko, and students of the Siberian Federal University A. Kravchenko and E. Melnikova for their help in obtaining new data in 2012.

Keywords: forest stand, Scots pine, permanent sample area, stand structure and growth dynamics, clinal tree distribution, Eastern Sayan.

Введение

Рациональное лесопользование и улучшение качественного состава лесов должны базироваться на знании определяющих продуктивность древостоев и всю фитоценоотическую структуру лесных экосистем закономерностей формирования и строения естественных насаждений [6, 7, 14, 20, 24]. Сложность вопроса состоит в том, что, приспосабливаясь к условиям среды, деревья соответственно генотипическим особенностям, размерам и состоянию вырабатывают специфический тип роста, от которого зависят внутривидовая изменчивость и дифференциация [6, 9, 16, 24], формирующая в каждом древесном ценозе свою пространственную структуру [18–20].

Для изучения пространственной структуры древостоев используются различные методы [2, 3, 5, 6, 12, 13, 21–23, 26, 27 и др.]. Статистически сопоставляются фактическое распределение особей в формируемых ими сообществах и ожидаемое случайное распределение. Принято выделять 3 типа размещения деревьев: случайное, равномерное (регулярное, разреженное) и групповое (агрегированное, контагиозное).

Изучение горизонтальной структуры древостоев позволяет углубить знания о биологической устойчивости лесов, усовершенствовать методики научных исследований и повысить эффективность методов лесной таксации, учета и оценки естественного возобновления древесных ценозов, разработать теорию, методы рубок ухода и главного пользования [2, 3, 6, 7, 17, 24].

Горные леса отличаются от равнинных. За счет разнообразности, контрастности и мозаичности условий произрастания в горах биогеоценозы с разной структурой территориально сближены [27], в то время как такие древостои на равнине расположены за тысячи километров друг от друга [14]. Отсюда вытекает необходимость учета при решении исследовательских и прикладных задач специфики природного разнообразия горных лесов, в первую очередь их горизонтальной структуры как основного эдификатора биогеоценозов. Причем влияние высотно-климатических поясов и экспозиции склона на лесорастительные условия общепризнано [9, 14, 17], а воздействие самого склона на древостой практически не учитывается.

Из-за относительно длительного развития и значительной продолжительности жизни деревьев большинство выводов о динамике лесной растительности основаны на сведениях, собранных косвенными методами сравнительного изучения, анализа сообществ, составляющих гипотетически временные или пространственные сукцессионные ряды, и нуждаются в проверке и уточнении [6]. Самые достоверные данные о динамике растительности получают на стационарных объектах – постоянных пробных площадях, число которых ограничено. Длительных рядов наблюдений, фактических сведений относительно мало [2, 3, 6, 14].

Анализ многолетних данных (1976–2008 гг.) пространственной структуры производного осинового древостоя и динамики возобновительного процесса в Западном Саяне [10] показал, что на постоянной пробной площадке (30×40 м) при крутизне склона менее 5° различие в распределении и росте древесной растительности статистически достоверно [11].

Цель настоящей работы – на фактическом материале длительных стационарных наблюдений за лесной растительностью выявить влияние склона

на рост и пространственно-временную структуру древостоя. Задача – проследить рост и динамику структуры естественного сосняка, отметить неравномерность этих показателей по склону на сравнительно небольших площадях. Считаю нужным обратить внимание исследователей горных лесов на необходимость изучения и учета рассмотренного явления.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на постоянной пробной площади, заложенной в 1968 г. на территории Караульного учебно-опытного лесничества Сибирского технологического института. Пробная площадь расположена с южной стороны (уклон 7–8°) в низкогорной части Восточного Саяна (56°01' с. ш., 92°39' в. д.) в естественном одновозрастном сосняке разнотравном I класса бонитета. При закладке пробы все деревья были пронумерованы и закартированы. В 1968, 1972, 1977, 1984, 1990 и 1997 гг. у каждого экземпляра мерной вилкой в направлениях С–Ю и З–В измеряли диаметр ствола на уровне 1,3 м от земли, а с помощью высотомера-эклиметра и базисной мерной ленты – высоту. За весь период наблюдений повреждений древостоя по причине воздействия природных или антропогенных факторов не обнаружено.

В 2011 г. для проведения дальнейшего мониторинга результаты инвентаризации пробной площади за 1968–1997 гг. были переданы автору данной статьи. В 2012 г. средний диаметр дерева определяли измерением окружности ствола на расстоянии 1,3 м от земли рулеткой EXECUTIVE, а высоту – лазерным высотомером FORESTRY 550.

Поскольку при закладке постоянной пробной площади сетка координат была ориентирована по направлению С–Ю, а не по склону местности, принято решение о перекартировке деревьев посредством увязывания одной из осей координат с направлением склона. Для подготовки к картированию примерно через середину пробной площади вдоль склона проложили визир и в обе стороны от него наметили перпендикулярную линию. Таким образом, полученные визиры увязаны с рельефом местности. От места пересечения прямых с интервалом 5 м установили колья двух размеров, для лучшей ориентации чередуя их. Местоположение других опорных линий, проложенных по просветам в обе стороны от визира вдоль склона, определяли методом засечек из 2–3 точек лазерными дальномерами INFINITER 80 и DLE 70. На всех опорных линиях также установили колья с интервалом 5 м.

Расстояние до деревьев, находящихся в определенной полосе, измеряли дальномером от двух кольев, располагающихся по пограничным опорным линиям, и заносили в специальную ведомость. Местоположение деревьев, отмеченных на картосхеме 1968 г. и отсутствующих в 2012 г., определяли по пням или (в камеральный период) методом подobia выполненных в масштабе 1:100 картосхем 1968 и 2012 гг. По отмеченным в 2012 г. основаниям стволов приняли точку начала координат, относительно которой установили координаты каждого дерева (рис. 1).

Для определения типа размещения деревьев на основе планов их картирования использовали критерий относительной дисперсии, характеризующий отклонение от случайного распределения при заданном размере учетных площадок. Признаком случайного распределения растений является равенство средней плотности (N) и дисперсии (σ^2), то есть $\sigma^2/N = 1$; при равномерном типе $\sigma^2/N < 1$, а при групповом размещении $\sigma^2/N > 1$ [12].

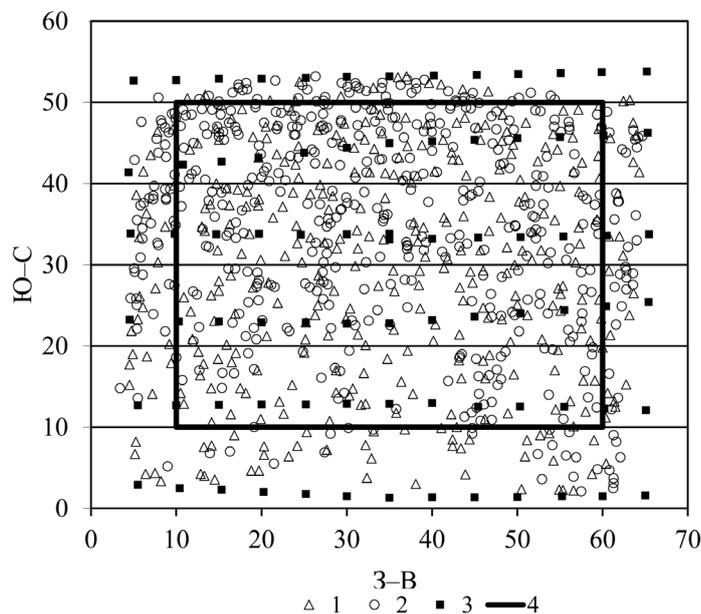


Рис. 1. План-схема размещения деревьев и разметки на постоянной пробной площади, м: 1 – деревья, растущие в 2012 г.; 2 – отпад в 1968–2012 гг.; 3 – опорные точки; 4 – границы участка площадью 0,2 га

Fig. 1. Schematic diagram of trees distribution and marking on the permanent sample area, m: 1 – alive trees in 2012; 2 – dead trees in 1968–2012; 3 – reference points; 4 – 0.2 ha site borders

Для каждого дерева по диаметру рассчитывали площадь поперечного сечения ствола, а по его высоте при помощи таблицы М.М. Орлова [1] определяли «условный» класс бонитета. Средний бонитет древостоя вычисляли как частное от деления суммы произведений площадей сечения деревьев и их условных бонитетов на сумму площадей сечения.

Объем ствола дерева находили по формуле: $V = gHf$, где g – площадь поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м, м²; H – высота ствола (дерева), м; f – видовое число. Для деревьев сосны $f = 0,40 + 1,4H^{-1}$, для лиственницы $f = 0,37 + 1,95H^{-1}$, для березы $f = 0,394 + 1,15H^{-1}$ [4]. Вычисление таксационных показателей пробной площади по всем учетам проводили при помощи общепринятых в лесной таксации методик с получением средневзвешенной площади поперечного сечения и высоты дерева [1].

Для понимания процесса самоизреживания древостоя устанавливали связь сохранности и роста дерева с рангом естественной ступени толщины (ЕСТ), рассчитываемым путем деления диаметра каждого экземпляра на средний диаметр данной породы на пробе [1]. Для удобства изложения материала ЕСТ были объединены в 3 группы: тонкие (до 0,8), средние (0,9–1,1) и крупные (1,2 и более).

Средний возраст перехода деревьев в сухостой находили как частное от деления суммы произведений количества усохших деревьев в межучетный период и среднего возраста древостоя в середине этого периода на сумму усохших деревьев.

Запас древесины определяли суммированием объемов стволов. Все остальные морфометрические параметры рассчитывали как среднеарифметические.

Всю информацию о пробной площади с бумажных носителей переносили в электронную базу данных [15]. Результаты экспериментов обрабатывали с помощью программы MS Excel и получали статистические параметры. Достоверность данных на уровне значимости $\alpha = 0,05$ [8]. Из-за малой представленности в древостое лиственницы и березы достоверность значений для них не определяли.

Результаты исследования и их обсуждение

Подробный анализ динамики ростовых процессов в древостое на рассматриваемой постоянной пробной площади за период 1968–1997 гг. приведен в монографии А.А. Вайса [2]. В 1968 г. было учтено 851 дерево, в т. ч. живых – 742 и отпавших – 109 шт. Состав живого яруса – 90С8Л2Б, сухостоя и валежа – 90С10Л.

В 2012 г. даже визуальное обследование указывало на неоднородность таксационных показателей древостоя по территории. Особенно наглядно различие прослеживалось в нижней (по склону) части пробной площади. Обработка данных полевых исследований выявила разницу (сохранялась в течение всего периода мониторинга) таксационных показателей древостоев в этой части пробы (0,05 га) и на остальной ее территории (0,25 га). В 1968 г. густота древостоя внизу склона составляла 1,4 тыс. шт./га, а на остальной части пробы – 2,7 тыс. шт./га. Разница густоты древостоя – 48 %. К 2012 г. из-за несходства в темпах естественного изреживания, она снизилась до 18,2 %. Средние высоты древостоев на этих частях пробы были практически равны: в первый учет – 13,8 и 13,9 м, в последний – 24,7 и 25,5 м. Сильнее различались средние диаметры – 16,8 и 13,0 см в 1968 г.; 28,7 и 25,1 см в 2012 г. соответственно.

Обращает на себя внимание малочисленность деревьев в периферийной части пробы (см. рис. 1). Это не связано со снижением густоты древостоя, а объясняется тем, что в 2012 г. учитывали только закартированные в 1968 г. деревья и не учитывали экземпляры, оказавшиеся в пределах постоянной пробной площади после переориентации сетки координат. На основании этого было принято решение использовать первичный материал только части постоянной пробной площади, представленной прямоугольником с координатами углов X10Y10, X10Y50, X60Y50, X60Y10. Общий размер включающей в себя 100 элементарных площадок 4×5 м территории – 0,2 га. Элементарные площадки объединены в 10 ленточных трансект вдоль и поперек склона (табл. 1). На них в первый учет зафиксировано 601 дерево, в том числе усохших сосен – 73 шт.

Таксационная характеристика древостоя на выделенном участке представлена в табл. 2. Видно, что в составе насаждения преобладает сосна, ее доля по числу стволов за 44 года наблюдений снизилась с 89 до 85 %, а доля лиственницы возросла на 4 %. По запасу стволовой древесины за время мониторинга процент двух этих видов практически не менялся. Отмечено малое (1–2 %), но стабильное участие березы. Отпад наблюдался среди всех пород, в том числе лиственницы и березы – не более 13 %.

Таблица 1

Матрица распределения деревьев по элементарным площадкам на постоянной пробной площади в 1968 г.

| Координаты, м | X10– X15 | X15– X20 | X20– X25 | X25– X30 | X30– X35 | X35– X40 | X40– X45 | X45– X50 | X50– X55 | X55– X60 | Сумма, шт. |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| Y46–Y50 | 12 | 11 | 14 | 12 | 13 | 11 | 8 | 12 | 6 | 11 | 110 |
| Y42–Y46 | 6 | 6 | 9 | 9 | 7 | 6 | 6 | 9 | 4 | 4 | 66 |
| Y38–Y42 | 7 | 9 | 8 | 6 | 7 | 9 | 6 | 5 | 6 | 8 | 71 |
| Y34–Y38 | 8 | 8 | 3 | 10 | 9 | 5 | 4 | 5 | 11 | 6 | 69 |
| Y30–Y34 | 3 | 7 | 3 | 9 | 5 | 10 | 8 | 3 | 8 | 5 | 61 |
| Y26–Y30 | 5 | 9 | 3 | 10 | 3 | 7 | 4 | 7 | 3 | 6 | 57 |
| Y22–Y26 | 4 | 6 | 3 | 7 | 5 | 3 | 3 | 9 | 5 | 7 | 52 |
| Y18–Y22 | 4 | 5 | 4 | 2 | 4 | 2 | 6 | 6 | 5 | 7 | 45 |
| Y14–Y18 | 6 | 8 | 1 | 6 | 2 | 2 | 2 | 8 | 1 | 3 | 39 |
| Y10–Y14 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 7 | 2 | 6 | 31 |
| Сумма, шт. | 57 | 71 | 50 | 73 | 58 | 57 | 50 | 71 | 51 | 63 | 601 |

Таблица 2

Динамика таксационных параметров древостоя на постоянной пробной площади

| Год учета | Густота, тыс. шт./га | Состав по густоте, % | Средние показатели | | | Площадь сечений, м ² | Запас, м ³ /га | Состав по запасу, % |
|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| | | | возраст, лет | диаметр, см | высота, м | | | |
| 1968 | $\frac{2,64}{0,36}$ | $\frac{89С9Л2Б}{100С}$ | 42 | $\frac{13,0}{6,7}$ | $\frac{13,8}{7,5}$ | $\frac{35,3}{1,3}$ | $\frac{243,1}{5,7}$ | 92С6Л2Б |
| 1977 | $\frac{2,15}{0,49}$ | $\frac{88С10Л2Б}{95С2Л3Б}$ | 51 | $\frac{15,7}{8,9}$ | $\frac{18,4}{11,8}$ | $\frac{41,6}{3,0}$ | $\frac{363,1}{18,3}$ | 92С6Л2Б |
| 1990 | $\frac{1,63}{0,52}$ | $\frac{86С12Л2Б}{94С4Л2Б}$ | 64 | $\frac{19,0}{10,7}$ | $\frac{22,3}{15,2}$ | $\frac{46,2}{4,8}$ | $\frac{473,0}{35,5}$ | 92С6Л2Б |
| 1997 | $\frac{1,48}{0,15}$ | $\frac{85С13Л2Б}{87С3Л10Б}$ | 71 | $\frac{20,9}{11,3}$ | $\frac{23,5}{15,4}$ | $\frac{50,6}{1,6}$ | $\frac{543,2}{11,7}$ | 92С7Л1Б |
| 2012 | $\frac{1,15}{0,33}$ | $\frac{85С13Л2Б}{88С11Л1Б}$ | 86 | $\frac{24,7}{14,4}$ | $\frac{25,4}{19,0}$ | $\frac{55,1}{5,3}$ | $\frac{631,6}{47,8}$ | 92С7Л1Б |

Примечание: В числителе – живые деревья; в знаменателе – отпад.

Общие таксационные характеристики древостоя не отражают его горизонтальную структуру, изучение которой позволяет выявить: степень равномерности размещения деревьев на пробной площади; вариацию запаса древесины на разных участках; естественное изреживание насаждения, меняющее его густоту и запас; влияние склона на эти показатели. Для рассмотрения динамики естественного изреживания древостоя с увеличением возраста и изменения объема стволовой древесины провели статистическую обработку матриц густоты деревьев и запаса древесины на выделенных ленточных трансектах.

Из табл. 3 видно, что средние густота и запас (M) в пределах трансекты меняются с возрастом древостоя. Стандартные отклонения (σ), указывающие на разбросанность значений рядов распределения числа деревьев и суммы объемов их стволов на участках, расположенных вдоль и поперек склона, имели существенные различия: вдоль склона в 2,3–2,5 раза (в последний учет – в 1,8 раза) меньше, чем в расположенных поперек.

Таблица 3

Динамика густоты и запаса и их статистических показателей в зависимости от расположения древостоя на склоне

| Год | Густота | | | Запас | | |
|------|---------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------|
| | N , шт., в трансекте | $\sigma(t)^*$ по склону | | M , м ³ в трансекте | $\sigma(t)$ по склону | |
| | | вдоль | поперек | | вдоль | поперек |
| 1968 | 60,1 | 9,23 (20,59) | 21,69 (8,76) | 4,97 | 0,64 (24,69) | 0,49 (32,06) |
| 1977 | 52,8 | 7,51 (22,23) | 18,68 (8,94) | 7,57 | 0,99 (24,44) | 0,81 (29,54) |
| 1990 | 43,1 | 5,82 (23,42) | 13,68 (9,96) | 10,14 | 1,28 (22,22) | 1,26 (25,44) |
| 1997 | 32,6 | 3,10 (33,27) | 7,49 (13,77) | 11,10 | 1,60 (22,03) | 1,38 (25,42) |
| 2012 | 29,5 | 2,76 (33,81) | 4,99 (18,68) | 13,56 | 1,57 (23,30) | 1,74 (24,72) |

*Критерий Стьюдента, табличное значение t при уровне значимости 0,01 и числе степеней свободы 9 составляет 2,82.

Можно предположить, что различие статистического показателя густоты древостоя в трансектах, расположенных вдоль и поперек склона, обусловлено влиянием рельефа на размещение деревьев на пробной площади, как ранее было выявлено в структуре осинового древостоя в черневом поясе Западного Саяна [11].

Статистическая обработка матрицы распределения деревьев по 100 элементарным площадкам в 1968 г. (см. табл. 1) показала: при среднем числе деревьев 6,01 шт. на площадке дисперсия составляет 8,9. Так как $\sigma^2/N > 1$, тип размещения деревьев – групповой. Однако данные расчетов, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что на одной и той же пробной площади, расположенной на склоне, один и тот же метод определения типа размещения деревьев может дать противоречивые результаты: устойчивый групповой тип – по данным 10 ленточных трансект, вытянутых поперек склона, и равномерный – по данным 10 трансект, идущих вдоль склона. Тип пространственного размещения деревьев при одинаковых условиях отражает сложные взаимоотношения между особями в насаждении [16, 18, 19, 21, 25].

Можно предположить, что склон – мощный абиотический фактор среды – влияя на перераспределение атмосферных осадков, водный и тепловой режимы почвы, ее перемещение, движение питательных веществ, оказывает существенное воздействие на пространственную структуру древостоя, постепенно и направленно изменяет плотность популяции. Она, в свою очередь, влияет на рост растений, их биомассу. Для таких условий В.С. Ипатов и Л.А. Кирикова [5] используют термин «клинальное размещение».

Таблица 4

Тип размещения деревьев верхнего яруса на постоянной пробной площади поперек и вдоль склона

| Средний возраст древостоя, лет | Трансекты поперек склона | | | | | Трансекты вдоль склона | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|------------|--------------|----------------|------------------------|---------|------------|--------------|---------------------|
| | N , шт. | $\pm m^*$ | σ^2 | σ^2/N | Тип размещения | N , шт. | $\pm m$ | σ^2 | σ^2/N | Тип размещения |
| 42 | 60,1 | 6,86 | 470,5 | 7,83 | Групповой | 60,1 | 2,92 | 85,2 | 1,42 | Групповой |
| 51 | 52,8 | 5,91 | 348,9 | 6,61 | Групповой | 52,8 | 2,37 | 56,4 | 1,07 | Близко к случайному |
| 64 | 43,1 | 4,33 | 187,1 | 4,34 | Групповой | 43,1 | 1,84 | 33,9 | 0,79 | Равномерный |
| 71 | 32,6 | 2,37 | 56,1 | 1,72 | Групповой | 32,6 | 0,98 | 9,6 | 0,29 | Равномерный |
| 86 | 29,5 | 1,58 | 24,9 | 0,84 | Равномерный | 29,5 | 0,87 | 7,6 | 0,26 | Равномерный |

* $\pm m$ – ошибка средней густоты.

Для проверки гипотезы проба была разбита на 3 вытянутых вдоль склона равных по площади участка. Обработка данных показала, что уже к периоду закладки постоянной пробной площади древостой представлял собой неоднородное по густоте насаждение (рис. 2, а).

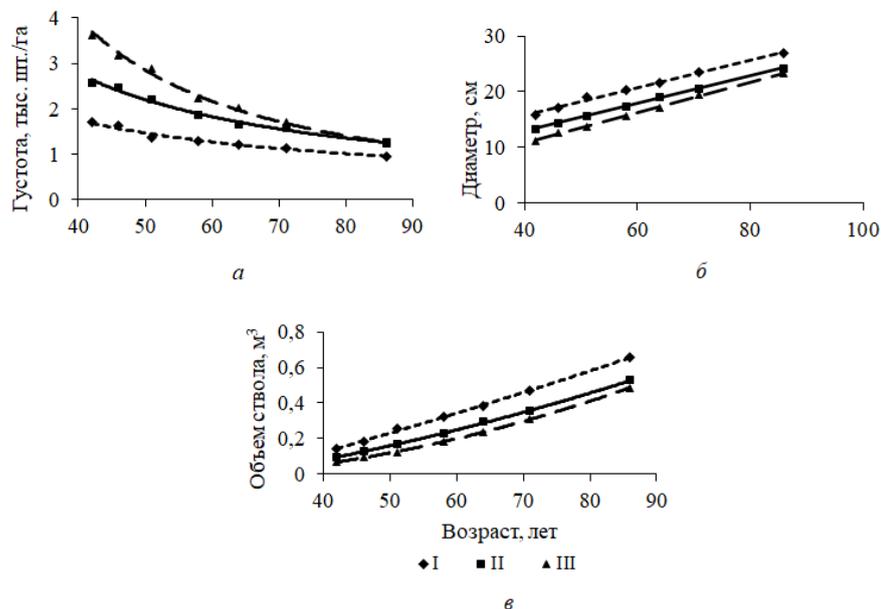


Рис. 2. Динамика густоты (а), среднего диаметра (б) и объема ствола (в) древостоя на разных участках постоянной пробной площади по склону: I – нижний; II – центральный; III – верхний

Fig. 2. Dynamics of density (а), mean diameter (б), and trunk volume (в) of the stand on different sites of the permanent sample area along the slope: I – lower; II – central; III – upper

Если густоту древостоя на нижнем по склону участке пробной площади принять за единицу, то на центральном участке этот показатель в 42-летнем древостое составлял 1,5, а на верхнем – 2,1. Разница в густоте по склону наблюдалась и в последующие годы: на центральном участке в возрасте 51 года – 1,6; в 64 и в 71 год – 1,4; а на верхнем – соответственно, 2,1, 1,7 и 1,5. В 2012 г., несмотря на общее снижение густоты древостоя в 2,3 раза, различие по этому показателю вдоль склона у нижнего и других участков хотя и сократилось, но оставалось около 30 %.

Повышенная густота на центральном и верхнем участках в наибольшей степени сказалась на росте деревьев в толщину. Это различие наблюдалось на протяжении почти 30 лет. И только к последнему учету, когда густота древостоев на центральном и верхнем участках выровнялась, средние диаметры стали иметь близкие значения (рис. 2, б). Влияние склона отражалось и на среднем объеме ствола дерева (рис. 2, в). В 42-летнем древостое этот показатель на нижнем участке был на 40 %, а на верхнем в 2 раза выше, чем на центральном. С увеличением возраста древостоя данное различие сглаживалось до 20–26 %.

Анализ динамики морфолого-таксационных признаков хвойных пород показал, что наибольшее различие по склону в росте деревьев наблюдалось в молодом возрасте. У сосны диаметр среднего дерева в 42 года на участках вверх по склону составлял 16,0; 13,4; 11,5 см, а у лиственницы – 14,8; 11,8; 9,0 см. К последнему учету в 86-летнем древостое средний диаметр сосны достиг на нижнем участке 27,7 см, а на центральном и верхнем практически сравнялся – 24,7 и 24,5 см. У лиственницы по среднему диаметру отличие между участками сохранялось – 22,2; 20,7; 15,6 см. Примечательно, что, несмотря на неоднородность насаждений по густоте и средним морфологическим показателям деревьев в разных частях склона, различия по сумме площадей сечений стволов деревьев на высоте 1,3 м и запасу древесины на всех участках составили не более 10 %.

Как видно из рис. 3, больше всего деревьев сосны с ЕСТ до 0,8, на которые в 1968 г. приходилось более 44 % численности этого вида на пробе, росло на верхнем участке (27,5 %). Все сосны, относящиеся к группе тонких, к последнему учету в нижней и центральной частях территории погибли. Жизнеспособность крупных деревьев колебалась от 85,4 до 95,0 %.

На всех участках у части деревьев наблюдалось ослабление роста в толщину, они сначала переходили в нижние естественные ступени толщины, а затем и погибали. Это приводило к перестройке горизонтальной структуры древостоя. К 2012 г. на нижнем участке осталось 53 % деревьев сосны, на центральном – 47 %, на верхнем – всего 32 % (табл. 5).

Доля сохранившейся лиственницы на пробной площади существенно больше, чем сосны, – 71 %. При этом на нижнем участке она составляла 89 %, а на центральном и верхнем – 65 и 63 %. Усыхали, как правило, тонкие деревья.

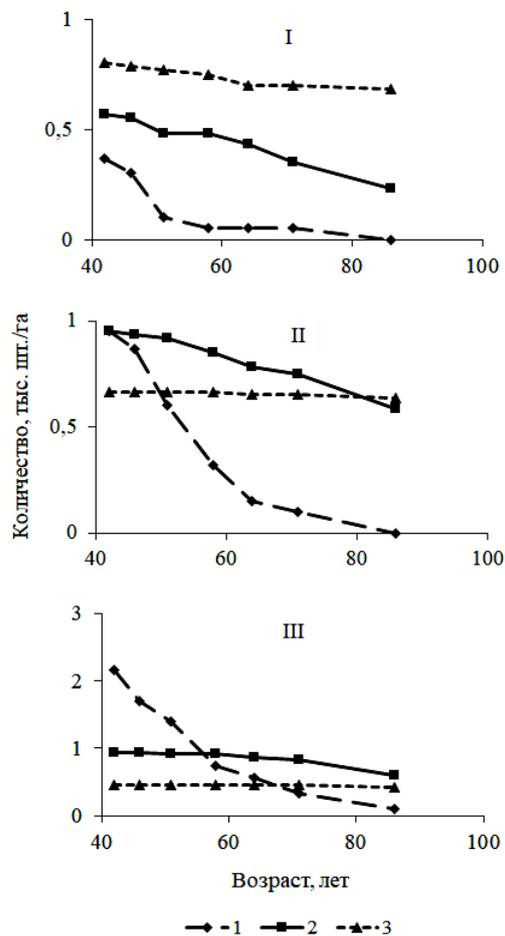


Рис. 3. Динамика количества сосны на нижнем (I), центральном (II) и верхнем (III) участках постоянной пробной площади по склону в разных группах естественных ступеней толщины: 1 – тонкие; 2 – средние; 3 – крупные

Fig. 3. Dynamics of the number of pines on the lower (I), central (II), and upper (III) sites of the permanent sample area on the slope in different groups of natural diameter classes: 1 – thin; 2 – medium; 3 – large

Таблица 5

Влияние ранга естественных ступеней толщины сосны на ее сохранность и средний возраст гибели деревьев на разных участках постоянной пробной площади по склону

| Участок | Всего | ЕСТ в 1968 г. | | |
|---|-------|---------------|---------|---------|
| | | тонкие | средние | крупные |
| <i>Сохранность на 2012 г., %</i> | | | | |
| Нижний | 53 | 0 | 41,2 | 85,4 |
| Центральный | 47 | 0 | 61,4 | 95,0 |
| Верхний | 32 | 4,7 | 64,3 | 92,6 |
| Вся проба | 41 | 2,9 | 57,8 | 90,4 |
| <i>Средний возраст погибших деревьев, лет</i> | | | | |
| Нижний | – | 52,6 | 62,2 | 57,9 |
| Центральный | – | 56,1 | 66,8 | 69,2 |
| Верхний | – | 56,3 | 72,6 | 78,5 |

Следует отметить, в течение всего периода наблюдений условный бонитет древостоя в нижней части склона был на 0,2–0,1 единицы бонитета выше, чем в средней, и на 0,4–0,1 больше, чем в верхней.

Заключение

Анализ материалов многолетнего мониторинга одновозрастного соснового древостоя на постоянной пробной площади, расположенной с южной стороны в низкогорной части Восточного Саяна, показал, что неодинаковость экологических условий на склоне, имеющая место даже на небольшом его отрезке, в первую очередь влияет на интенсивность самоизреживания древостоя по склону.

Более сильная конкуренция растений в лучших условиях проявляется в большей скорости отпада отставших в росте деревьев. На разных участках одновозрастного сосняка, что показали данные о среднем возрасте усохших экземпляров, деревья отмирают раньше внизу склона и позднее вверх по склону. Это приводит к постепенному и направленному повышению густоты древостоя, снижению среднего диаметра и среднего объема стволов вверх по склону.

За счет естественной дифференциации роста сосны при разной густоте на склоне сумма площадей сечения стволов и запасы древесины отличаются не более чем на 10 % в разных частях территории. С развитием древостоя происходит перестройка его пространственной структуры. При общем снижении густоты в 2,3 раза различия по этому показателю сглаживаются, но остаются около 30 % на участках по склону.

Клиновое размещение и неравномерный рост деревьев на склонах необходимо учитывать при исследовании лесных экосистем, моделировании и проведении лесохозяйственных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ануцин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.
2. Вайс А.А. Динамика ростовых процессов в сосновом древостое: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2007. 198 с. Weis A.A. *Dynamics of Growth Processes in Pine Stands: Monograph*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2007. 198 p.
3. Грабарник П.Я., Шанин В.Н., Чертов О.Г., Припутина И.В., Быховец С.С., Петропавловский Б.С., Фролов П.В., Зубкова Е.В., Шашков М.П., Фролова Г.Г. Моделирование динамики лесных экосистем как инструмент прогнозирования и управления лесами // Лесоведение. 2019. № 6. С. 488–500. Grabarnik P.Ya., Shanin V.N., Chertov O.G., Pripulina I.V., Bykhovets S.S., Petropavlovskii B.S., Frolov P.V., Zubkova E.V., Shashkov M.P., Frolova G.G. Modelling of Forest Ecosystem Dynamics: An Instrument for Forest Prediction and Management. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 6, pp. 488–500. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819030033>
4. Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с. Zagreyev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkaleva A.G. *All-Union Standards for Forest Inventory*. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p.
5. Ипатов В.С., Кирикова Л.А. Фитоценология. СПб.: СПбГУ, 1997. 316 с. Ipatov V.S., Kirikova L.A. *Phytocenology*. Saint Petersburg, SPbU Publ., 1997. 316 p.

6. Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели: моногр. Новосибирск: Наука. 2013. 208 с. Kuz'michev V.V. *Forest Stands Dynamics Regularities: Principles and Models*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 208 p.
7. Мелехов И.С. Лесоводство. М.: МГУЛ, 2003. 320 с. Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, MGUL Publ., 2003. 320 p.
8. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с. Mitropol'skiy A.K. *Statistical Calculations Technique*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 576 p.
9. Морозов Г.Ф. Отрывочные заметки из лекций по Общему Лесоводству // Изв. вузов. Лесн. журн. 1918. Вып. 6-8. С. 154–184. Morozov G.F. Fragmentary Notes from the Lectures on General Forestry. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1918, no. 6-8, pp. 154–184.
10. Овчинникова Н.Ф. Возобновительные процессы в производных лесах черневого пояса Западного Саяна: дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2005. 205 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16053372>. Ovchinnikova N.F. *Recovery Processes in Secondary Forests in the Taiga Belt of Western Sayan*: Cand. Biol. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2005. 205 p.
11. Овчинникова Н.Ф., Овчинников А.Е. Динамика структуры осинового древостоя в черневом поясе Западного Саяна // Лесоведение, 2016. № 6. С. 418–425. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27486991>. Ovchinnikova N.F., Ovchinnikov A.E. Structural Dynamics of Aspen Stand in Dark Taiga Domain in Western Sayan. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2016, no. 6, pp. 418–425.
12. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с. Odum Yu. *Fundamentals of Ecology*. Moscow, Mir Publ., 1975. 740 p.
13. Рогозин М.В., Красильников П.А. Леса-долгожители вблизи города Перми и их структура // Антропогенная трансформация природной среды. 2017. Вып. 3. С. 165–168. Rogozin M.V., Krasilnikov P.A. Long-Winding Forests near the City of Perm and Their Structure). *Antropogennaya transformatsiya prirodnoy sredy* [Anthropogenic Transformation of Nature], 2017, iss. 3, pp. 165–168.
14. Рысин Л.П. Биогеоэкологические аспекты изучения леса. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2013. 290 с. Rysin L.P. *Biogeocenology Aspects in Forest Studies*. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2013. 290 p.
15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Учеты деревьев на постоянных пробных площадях Красноярского края: № 2011620706, зарег. 30.09.2011 / Н.Ф. Овчинникова, А.Е. Овчинников. Ovchinnikova N.F., Ovchinnikov A.E. *Database State Registration Certificate. Telling of Trees on the Permanent Sample Areas of Krasnoyarsk Krai: No. 2011620706*. 2011.
16. Сеннов С.Н. О перспективах роста деревьев разного размера и методах рубок ухода // Лесн. хоз-во. 2002. № 4. С. 28–29. Sennov S.N. On the Growth Prospects of Trees of Different Sizes and Improvement Thinning Methods. *Lesnoye khozyaystvo*, 2002, no. 4, pp. 28–29.
17. Сукачев В.Н. Избр. тр.: в 3 т. / под ред. Е.М. Лавренко. Т. I: Основы лесной типологии и биогеоэкологии. Л.: Наука, 1972. 418 с. Sukachev V.N. *Selected Papers: In 3 Vol. Ed. by E.M. Lavrenko. Vol. I: Forest Typology and Biogeocenology Basics*. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 418 p.
18. Филенкова Н.В., Суховольский В.Г., Захаров Ю.В., Овчинникова Н.Ф. Кластерная модель ветроустойчивости деревьев с учетом ближайших соседей // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28, № 1-2. С. 91–97. Filenkova N.V., Sukhovolsky V.G., Zakharov Yu.V., Ovchinnikova N.F. Model of Trees Wind Stability with Effect of Interactions between Neighbours. *Hvoynye boreal'noj* [Conifers of the boreal area], vol. 28, no. 1-2, pp. 91–97.
19. Erfanifard Y., Nguyen H.H., Schmidt J.P., Rayburn A. Fine-Scale Intraspecific Interactions and Environmental Heterogeneity Drive the Spatial Structure in Old-Growth

Stands of a Dioecious Plant. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 425, pp. 92–99.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.041>

20. Erfanifard Y., Stereńczak K. Intra- and Interspecific Interactions of Scots Pine and European Beech in Mixed Secondary Forests. *Acta Oecologica*, 2017, vol. 78, pp. 15–25.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2016.12.002>

21. Erfanifard Y., Stereńczak K., Miścicki S. Management Strategies Alter Competitive Interactions and Structural Properties of Norway Spruce in Mixed Stands of Białowieża Forest, Poland. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 437, pp. 87–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.035>

22. Illian J., Penttinen A., Stoyan H., Stoyan D. *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. Chichester, UK, Wiley, 2008. 560 p.

23. Perry G.L.W., Miller B.P., Enright N.J. A Comparison of Methods for the Statistical Analysis of Spatial Point Patterns in Plant Ecology. *Plant Ecology*, 2006, vol. 187, iss. 1, pp. 59–82. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9133-4>

24. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin, Springer, 2009. 664 p.

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>

25. Strimbu B.M., Petritan I.C., Montes C., Biris I.A. An Assessment of the O-Ring Methodology Using Virgin Stands of Mixed European Beech – Sessile Oak. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 384, pp. 378–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.055>

26. Xiang W., Liu S., Lei X., Frank S.C., Tian D., Wang G., Deng X. Secondary Forest Floristic Composition, Structure, and Spatial Pattern in Subtropical China. *Journal of Forest Research*, 2013, vol. 18, iss. 1, pp. 111–120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10310-011-0329-7>

27. Zhang Z.-H., Hu G., Zhu J.-D., Luo D.-H., Ni J. Spatial Patterns and Interspecific Associations of Dominant Tree Species in Two Old-Growth Karst Forests, SW China. *Ecological Research*, 2010, vol. 25, iss. 6, pp. 1151–1160. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-010-0740-0>

УДК 630*18+630*165.61

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-48-64

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПЫЛЕЗАДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРОНЫ ТОПОЛЕЙ

Н.Н. Бессчетнова, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

П.В. Бессчетнов, *аспирант*; *ResearcherID*: [AAAV-5411-2020](https://orcid.org/0000-0002-0673-0616),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0673-0616>

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; e-mail: besschetnova1966@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 05.03.20 / Принята к печати 20.05.20

Аннотация. Для городов одним из ключевых показателей комфортности и соответствия санитарным нормам выступает запыленность атмосферы. Насаждения из представителей рода тополь (*Populus* L.) становятся надежным средством оптимизации данного показателя. Исследована эффективность применения различных видов тополей в городских посадках с учетом дифференциации участков кроны по способности осажать пыль на поверхности листового аппарата. Объект исследования – 8 видов из разных секций рода тополь, наиболее часто встречающиеся в городских посадках и других искусственных насаждениях на территории Нижегородской области. Учено влияние на дисперсию пылездерживающей способности трех независимых друг от друга факторов: видоспецифичности тополей (8 градаций); условий освещенности кроны, определяемых ее ориентацией относительно сторон света; высотных характеристик расположения яруса кроны. Смывы пыли производили со 100 листьев каждого вида тополя при их фиксированной площади. Наибольшее количество пыли в листовых смывах отмечено у типичного тополя белого ($257,60 \pm 5,05$ мг), а наименьшее – у тополя черного осокоря ($117,69 \pm 3,65$ мг) и тополя итальянского ($105,69 \pm 2,90$ мг). Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил существенность различий между видами по всем показателям пылездерживающей способности. Трехфакторный дисперсионный анализ доказал влияние мест расположения листовой поверхности в частях кроны на эффективность осаждения пыли представителями разных видов. Наиболее важной в распределении пыли, осевшей на листовой поверхности побегов в разных частях кроны, оказалась видовая принадлежность деревьев – $37,65 \pm 0,51$ %. Эффект от условий освещенности кроны также хорошо ощутим – $20,45 \pm 0,28$ %. Влияние высоты яруса кроны было заметно меньше – $7,19 \pm 0,21$ %. Перечисленные факторы мало связаны между собой, их взаимодействие не играет значительной роли: $6,67 \pm 4,54$ %, $F_{11}^2 = 1,47$, достоверно на 5 %-м уровне ($F_{05} = 1,41$) и недостоверно – на 1 %-м ($F_{01} = 1,61$).

Для цитирования: Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов П.В. Дифференциация пылездерживающей способности кроны тополей // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 48–64. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-48-64

Ключевые слова: тополь, пылездерживающая способность, морфология листа, плотность листорасположения, зонирование кроны.

DIFFERENTIATION OF DUST HOLDING CAPACITY OF POPLAR CROWNS

Natalia N. Besschetnova, *Doctor of Agriculture*; *ResearcherID*: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

Piter V. Besschetnov, *Postgraduate Student*; *ResearcherID*: [AAAV-5411-2020](https://orcid.org/0000-0002-0673-0616),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0673-0616>

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: besschetnova1966@mail.ru

Original article / Received on March 5, 2020 / Accepted on May 20, 2020

Abstract. One of the key parameters of comfort and compliance with sanitary standards for cities is dustiness of atmosphere. Plantings of representatives of the Poplar genus (*Populus* L.) become a reliable means of optimizing this parameter. We have studied the effectiveness of using different types of poplars in urban plantings, taking into account the differentiation of crown sections by the ability to deposit dust on the surface of the leaf apparatus. The object of research is 8 species from different sections of the poplar genus, typically found in urban plantings of the Nizhny Novgorod region. We considered the influence of three independently of one another factors on the dispersion of dust holding capacity: species-specificity of poplars (8 gradations); lighting conditions of crown due to its orientation relative to the cardinal directions (4 gradations); height characteristics of the crown tier location (3 gradations). Dust was washed off from 100 leaves of each poplar species with their fixed area. The highest amount of dust in the flushes was observed for silver poplar (257.60 ± 5.05 mg), and the lowest – for black poplar (117.69 ± 3.65 mg) and *Populus nigra* var. *italica* (105.69 ± 2.90 mg). One-way ANOVA confirmed the significance of differences between the species for all parameters of dust holding capacity. Three-way ANOVA showed the influence of leaf surface locations in different parts of the crown on the efficiency of dust deposition by representatives of different species. Species appeared to be the most important in the distribution of dust deposited on the leaf surface of shoots in different parts of the crown; the share of its influence was 37.65 ± 0.51 %. The effect of crown lighting conditions was also well measurable; its share was equal to 20.45 ± 0.28 %. The influence of the crown tier height was noticeably less; its share reached 7.19 ± 0.21 %. The listed factors are little related to each other, and their interaction generated a negligible effect: 6.67 ± 4.54 %, $F_h^2 = 1.47$, significance is reliable at 5 % level ($F_{05} = 1.41$) and unreliable at 1 % level ($F_{01} = 1.61$).

For citation: Besschetnova N.N., Besschetnov P.V. Differentiation of Dust Holding Capacity of Poplar Crowns. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 48–64. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-48-64

Keywords: poplar, dust holding capacity, leaf morphology, density of leaf arrangement, crown zoning.

Введение

Проблемы экологии во многих современных российских городах в настоящее время стоят особенно остро, определяя потребность в принятии безотлагательных мер по стабилизации и приведению к нормативным санитарно-гигиеническим показателям [4, 20, 25, 31]. Этому немало причин, которые, имея объективный и субъективный характер, приобрели на сегодняшний день глобальные масштабы [23, 31, 57, 64]. Одним из важнейших параметров городской среды выступает запыленность воздушного бассейна, тем более что урбанизированные территории пока еще не избавлены и в обозримой перспективе не будут избавлены от многочисленных источников пыли [2, 4–6, 20, 23, 36, 38]. Предпринимаются усилия по снижению запыленности воздушного бассейна, опирающиеся на технические, технологические, организационные и логистические решения. Однако их эффективность пока недостаточно высока [26, 27, 30, 31, 33].

На этом фоне надежным средством решения указанных задач выступают насаждения из деревьев и кустарников, способные аккумулировать на своей листовой поверхности значительное количество пылевых частиц. Эффективность применения и рациональность использования таких насаждений как средств снижения запыленности в городах во многом определяется корректным выбором видов для включения их в состав подобных посадок [2, 4–6, 12, 14, 20, 23, 36–38]. Достаточно перспективными в контексте поставленных задач представляются тополя, широко распространенные по всему северному полушарию [39, 41, 43, 46, 48, 52, 66] и повсеместно встречающиеся в Нижегородском Поволжье как аборигенные виды естественных лесов и интродуценты в составе разнообразных по форме и выполняемым функциям искусственных насаждений [1, 3, 10–14, 29, 34]. Вместе с тем сведений о сравнительной оценке эффективности применения тополей для реализации ими санитарно-гигиенических функций, в части обеспечения пылезадерживающей способности, немного, а для Нижегородской области они и вовсе отсутствуют.

Цель исследований – определение эффективности применения различных видов тополей в городских посадках с учетом дифференциации участков кроны по способности осаждать пыль на поверхности листового аппарата.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований выступали репродуктивно зрелые деревья 8 видов из разных секций рода тополь (*Populus L.*), наиболее часто встречающиеся в городских посадках и других искусственных насаждениях на территории Нижегородской области [10–14, 29]: тополь белый пирамидальный (*Populus alba L., f. pyramidalis*); тополь черный, или осокорь (*Populus nigra L.*); тополь китайский (*Populus Simonii Carr.*); тополь белый, типичная форма (*Populus alba L.*); тополь лавролистный (*Populus laurifolia Ledeb.*); тополь черный пирамидальный, или итальянский (*Populus nigra, var. italica Münchh.*); тополь бальзамический (*Populus balsamifera L.*); осина, или тополь дрожащий (*Populus tremula L.*). Они представляли следующие таксономические подразделения рода: секция черные, или дельтовидные тополя (*Aigeiros*), – тополь черный, тополь итальянский; секция настоящие, или белые тополя (*Populus*), – тополь белый пирамидальный, тополь белый типичный, осина; секция бальзамические тополя (*Tacamahaca*) – тополь китайский, тополь бальзамический, тополь лавролистный. Место проведения исследований входит в район хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации, который отнесен к третьей лесорастительной зоне – зоне хвойно-широколиственных лесов.

Методологической основой построения рабочих методик выступали главные аспекты всеобщего и общенаучных методов, а также важнейшие требования к организации опыта: типичность, пригодность, целесообразность и надежность, соблюдение принципа единственного логического различия и рандомизированного размещения объектов в экспериментальном поле [19, 32, 49, 58, 61, 67]. Элиминация влияния неорганизованных внешних факторов достигалась одновременным отбором биологических проб у всех деревьев, включенных в схему опыта, привлечением для этого только одновозрастных растений, произрастающих в равных экологических условиях и характеризующихся оди-

наковым фенологическим состоянием. Нормально развитые облиственные побеги отбирались дифференцированно – как типичные для различных участков кроны. Образцы с признаками повреждения биотическими и абиотическими факторами отбраковывались.

Кроме признаков непосредственного учета (прямых признаков) принимали во внимание производные признаки (индексы, коэффициенты, удельные и относительные величины и т. д.), наиболее информативно описывающие линейные и удельные параметры, массу и форму, а также физиологическое и санитарное состояние изучаемых частей и органов деревьев. Эти данные широко используют в биологических и лесоводственных исследованиях для получения значений параметров, недоступных для непосредственного биометрирования, и оценок разнообразных качественных показателей в количественном выражении [7–9, 15–17, 28]. Обозначенное выше относится и к тополям [42, 44, 54, 55, 59, 60, 63, 65], в частности позволяет адекватно описать пропорции и форму листовых пластинок, характер их размещения на стебле [18, 40, 45], определить устьичную плотность и удельную площадь [56]. Внимание к многочисленным характеристикам листового аппарата тополей сохраняется у нас в стране [18, 21, 22, 35, 36] и за рубежом [42, 44, 45, 47, 50, 51, 54–56, 59, 60, 63]. Разработке методического аппарата изучения пылезадерживающей способности древесных и кустарниковых пород посвящено немало исследований отечественных специалистов [2, 4, 20, 23, 36], в том числе в отношении тополей [11, 24].

Построение опыта по определению пылезадерживающей способности и формирующих ее характеристик изучаемых видов тополей предполагало организацию 1- и 3-факторных (при независимых факторах) дисперсионных комплексов. В организационно-методической схеме учтено влияние на итоговый показатель – дисперсию пылезадерживающей способности – трех независимых друг от друга факторов опыта: фактора А – видоспецифичности тополей (всего выделено 8 градаций); В – различий в условиях освещенности кроны, обусловленных ее ориентацией относительно сторон света: север, юг, восток, запад (т. е. 4 градации); фактора С – различий в высотных характеристиках расположения яруса кроны относительно поверхности почвы (верхний, средний, нижний), которые влияют как на условия освещенности, так и на характеристики подвижности воздушных потоков, переносящих пылеватые частицы (3 градации). Остаточная дисперсия анализируемого дисперсионного комплекса (фактор Z) вызывается случайными не учитываемыми в опыте факторами, как правило, микроразностями экологического фона и неизбежной неоднородностью эндогенных условий формирования метамеров. Она рассматривается как различия в значениях того или иного признака, фиксируемые у тестируемых первичных единиц выборки (п. е. в.), для дисперсионного комплекса в целом.

Поскольку каждый из 8 видов тополей был представлен 10 учетными деревьями, с каждого из которых отбиралось по 12 модельных ветвей, итоговое число п. е. в. по каждому признаку составило 960. В дисперсионных комплексах образцы были сгруппированы в 80 подеревных значений следующих признаков: суммарная площадь 100 учетных листьев; масса пыли на 1 м² листовой поверхности; площадь листовой поверхности на 1 побеге; масса пыли на листьях 1 побега; количество облиственных побегов на 1 дереве; количество листьев на 1 дереве; площадь листовой поверхности 1 дерева; масса пыли на

1 дереве; длина облиственного побега; количество листьев на 1 облиственном побеге; плотность облиствения побегов.

Репрезентативность выборки листьев обеспечивалась методикой их отбора. Крона каждого экземпляра была разделена на сегменты относительно сторон света, что учитывало неодинаковые условия освещенности разных ее участков; каждый сегмент – на три яруса: верхний, средний и нижний – для учета различий в условиях освещенности, температуры, газообмена (в нижних ярусах больше углекислоты, худший газообмен). В конечном итоге выделено 12 частей в пределах одного учетного растения. Из каждой части отбиралось по модельной ветви. Со срезанных модельных ветвей собирали все листья, ксерокопиями фиксировали их линейные параметры и профили. Контуры листьев переносили на миллиметровую бумагу и рассчитывали площади листовых пластинок, после чего находили среднюю площадь одной листовой пластинки для модельной ветви каждого вида. На следующем этапе вычисляли площадь листовой поверхности каждой части кроны как сумму площадей всех ветвей в ее пределах и интегральный показатель отдельного учетного дерева как сумму значений по секторам и ярусам. Это было осуществлено путем предварительного подсчета ветвей по секторам и ярусам кроны в безлиственном состоянии. Количество ветвей по каждой части кроны умножалось на площадь листовой поверхности модельной ветви, соответствующей этой части кроны.

Смывы с листьев древесно-кустарниковых пород, взятых для исследования, производили в следующем порядке. С каждого вида тополей было собрано 100 листовых пластинок, по 25 листьев с каждой стороны света. В лаборатории готовили по 3 стакана для каждого анализируемого вида. Посуду промывали в дистиллированной воде, высушивали и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,001 г. Емкости заполняли 150 мл дистиллированной воды, в которой поочередно промывали листья пробы по видам, один лист отмывали от пыли в трех водах. После промывки образцов стаканы ставили в вытяжной шкаф для выпаривания жидкости на песчаной бане и по завершении процесса повторно взвешивали. Количество пыли, осевшей на 100 листьях каждого вида, рассчитывали как разницу массы стакана после выпаривания воды и массы чистого стакана. По площади 100 листьев и массе пыли, задержанной их поверхностью, выполняли пересчет массы пыли на 1 м² листовой поверхности кроны каждого вида тополей. Целесообразность привлечения такого методического инструментария вполне обоснована [53]. Нахождение описательных статистик и выполнение дисперсионного анализа проведено с учетом существующих теоретических разработок [19, 49, 62, 68]. Вычисления реализованы в электронных таблицах Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Среднестатистическая масса смыва с поверхности 100 листовых пластинок у представителей различных видов тополей оказалась неодинаковой (рис. 1, а). Наибольшее количество пыли в листовых смывах отмечено у типичного тополя белого, $257,60 \pm 5,05$ мг, а наименьшее – у тополя черного осокоря, $117,69 \pm 3,65$ мг, и тополя итальянского, $105,69 \pm 2,90$ мг. Достаточно большие значения показал тополь бальзамический, $223,90 \pm 3,70$ мг. Обобщенное среднее при этом составило $166,45 \pm 5,92$ мг. Наибольшая оценка превосходила наименьшую

в 2,44 раза, или на 152,21 мг. Притом что именно данный валовый показатель определяет в конечном итоге пылезадерживающую способность листового аппарата, зависящую и от площади листовых пластинок (рис. 1, б). В этом случае характеристики более выровнены, и основная часть исследуемых тополей имеет оценки, близкие к обобщенному среднему (обобщ. ср.), которое составило $2687,81 \pm 75,53 \text{ см}^2$.

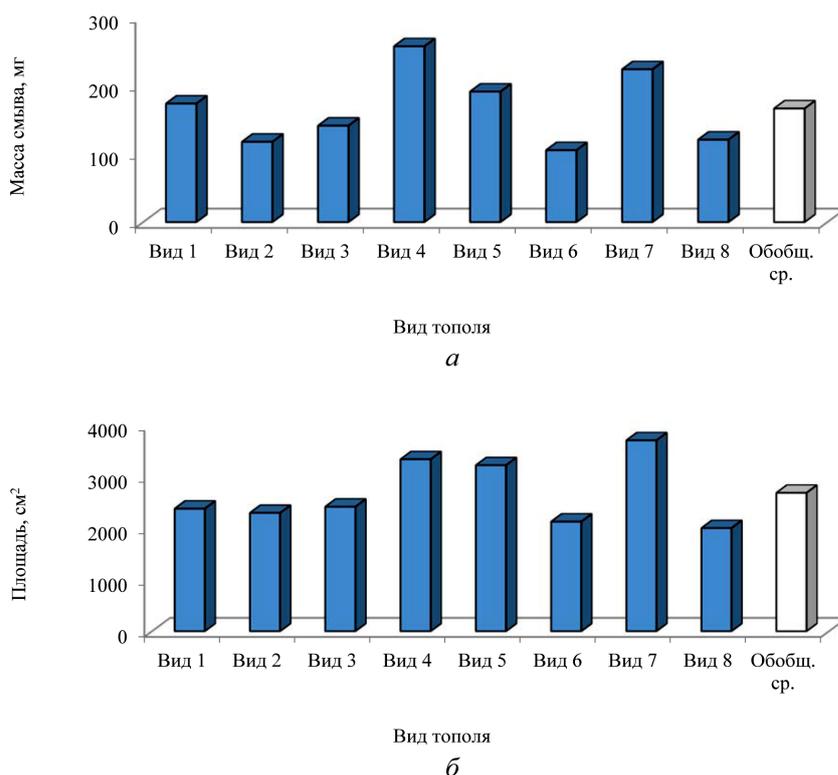


Рис. 1. Потенциал пылезадерживающей способности тополей: а – масса смыва с поверхности листовых пластинок; б – суммарная площадь поверхности листовых пластинок, с которых смыты частицы пыли

Fig. 1. The dust holding capacity potential of poplars: а – the mass of flush from the surface of the leaf blades; б – the total surface area of the leaf blades, from which dust particles were flushed

Самое большое среднее значение у тополя бальзамического, $3707,95 \pm 115,17 \text{ см}^2$, а меньшее – у осины, $2687,81 \pm 26,53 \text{ см}^2$. Разница составляет 1,85 раза, или $1704,96 \text{ см}^2$. Получив оценки, названные выше (рис. 1 а, б), мы смогли определить массу пыли на 1 м^2 площади листовой поверхности (рис. 2).

Удельный показатель пылезадерживающей способности растений также весьма неоднороден в видовом аспекте (рис. 2, а). Его наибольшее среднее значение $0,79 \pm 0,04 \text{ г/м}^2$ отмечено у типичного тополя белого, а наименьшее – у представителей секции черных тополей, тополя черного осокоря и тополя итальянского, $0,52 \pm 0,02 \text{ г/м}^2$ и $0,50 \pm 0,01 \text{ г/м}^2$ соответственно. Такие оценки сформировали превосходство в 1,59 раза, или на $0,29 \text{ г/м}^2$. Обобщенное среднее достигло $0,62 \pm 0,01 \text{ г/м}^2$.

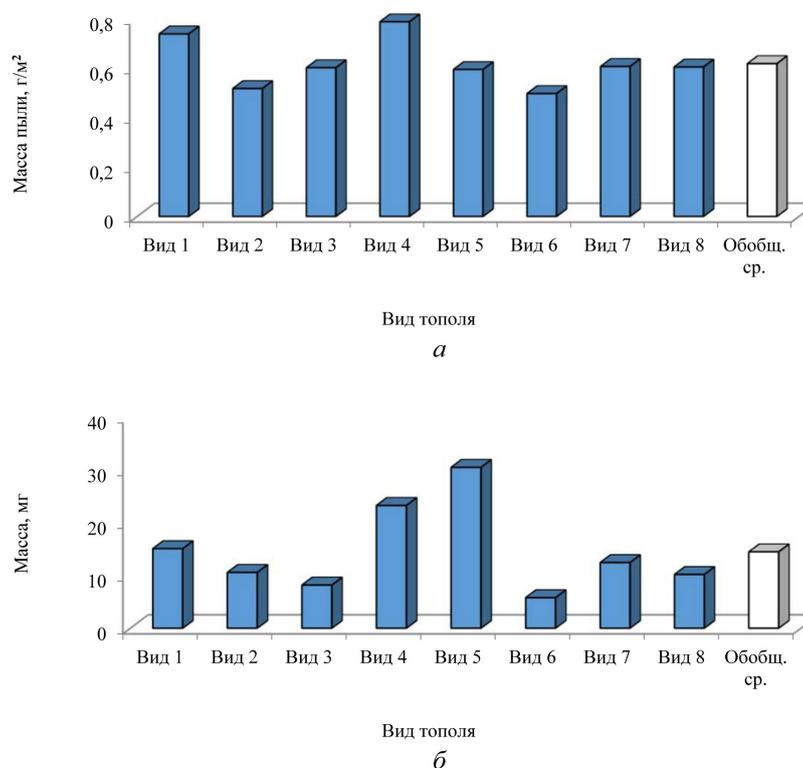


Рис. 2. Количество пыли, осевшей на листовом аппарате тополей: *a* – масса пыли на 1 м² листовых пластинок; *б* – пылезадерживающая способность листовых пластинок на отдельном побеге

Fig. 2. The amount of dust deposited on the poplar leaf apparatus: *a* – the mass of dust per 1 m² of the area of the leaf blades; *б* – the dust-holding capacity of the leaf blades on an individual shoot

В конечном итоге сложились предпосылки для определения пылезадерживающей способности одного усредненного побега (рис. 2, *б*). Оказалось, что этот показатель в наибольшей степени проявился у тополя лавролистного $30,51 \pm 1,41$ мг. При этом наименьшее среднее значение, $5,81 \pm 0,17$ мг, отмеченное у тополя итальянского, уступало первому в 5,25 раза, или на 24,70 мг. Обобщенное среднее в группе исследованных видов достигло $14,54 \pm 0,91$ мг.

Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил существенность различий между сравниваемыми видами тополей по характеристикам потенциальной пылезадерживающей способности (табл. 1). На это указывают опытные критерии Фишера, которые по всем анализируемым признакам физиологического состояния растений значительно превосходят соответствующие критические значения как на 5 %-м, так и на 1 %-м уровнях значимости. Например, по массе смыва со 100 листовых пластинок зафиксировано наибольшее значение: $F_{оп} = 204,03$ при $F_{05} = 2,14$ и $F_{01} = 2,87$; по площади 100 листовых пластинок, с поверхности которых был осуществлен смыв пылевых частиц, $F_{оп} = 39,02$ при тех же критических значениях.

Таблица 1

**Существенность различий между представителями рода тополь
по потенциальной пылезадерживающей способности**

| Признак | Критерий Фишера $F_{оп}$ | Доля влияния фактора | | | | Критерии различий | |
|---------|--------------------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|-------------------|----------|
| | | по Плохинскому | | по Снедекору | | HCP_{05} | D_{05} |
| | | h^2 | $\pm s^{h^2}$ | h^2 | $\pm s^{h^2}$ | | |
| 1 | 204,03 | 0,9520 | 0,0047 | 0,9531 | 0,0046 | 10,761 | 16,525 |
| 2 | 39,02 | 0,7914 | 0,0203 | 0,7917 | 0,0202 | 286,185 | 439,476 |
| 3 | 12,89 | 0,5562 | 0,0431 | 0,5432 | 0,0444 | 0,078 | 0,119 |
| 4 | 68,09 | 0,8688 | 0,0128 | 0,8703 | 0,0126 | 42,991 | 66,018 |
| 5 | 122,81 | 0,9227 | 0,0075 | 0,9241 | 0,0074 | 2,106 | 3,234 |
| 6 | 49,81 | 0,8288 | 0,0166 | 0,8300 | 0,0165 | 225,124 | 345,708 |
| 7 | 28,78 | 0,7367 | 0,0256 | 0,7353 | 0,0257 | 2147,820 | 3298,270 |
| 8 | 12,06 | 0,5689 | 0,0472 | 0,5514 | 0,0491 | 7,700 | 11,825 |
| 9 | 20,22 | 0,6628 | 0,0328 | 0,6577 | 0,0333 | 3,879 | 5,957 |

Примечание: $F_{оп}$ – опытное значение критерия Фишера; h^2 – доля влияния организованного фактора; $\pm s^{h^2}$ – ошибка доли влияния организованного фактора; HCP_{05} – наименьшая существенная разность на 5 %-м уровне значимости; D_{05} – критерий Тьюки на 5 %-м уровне значимости; признак 1 – масса смыва со 100 листовых пластинок; 2 – площадь поверхности 100 листовых пластинок; 3 – масса пыли на 1 м² листовой поверхности; 4 – площадь листовой поверхности 1 побега; 5 – пылезадерживающая способность 1 побега; 6 – количество облиственных побегов на 1 дереве; 7 – количество листьев на 1 дереве; 8 – площадь листовой поверхности 1 дерева; 9 – масса пыли на 1 дереве.

По остальным показателям, рассмотренным в исследовании, расчетные F-критерии также уверенно превышали свои пороговые значения как на 5 %-м, так и на 1 %-м уровнях значимости. Убедительные подтверждения наличия у объектов исследуемого комплекса существенных различий, полученные на данном этапе работы, позволили продолжить дисперсионный анализ и вычислить оценки доли влияния организованных факторов или межвидовых различий тополей.

При использовании в расчетах алгоритма Плохинского наиболее высокая доля влияния видоспецифичности на формирование фенотипических различий между представителями сравниваемых видов была установлена по массе смыва со 100 листовых пластинок, $h^2 \pm s^{h^2} = 95,20 \pm 0,47$ %. Сопоставимо высокими оказались аналогичные оценки по пылезадерживающей способности листового аппарата 1 побега, $h^2 \pm s^{h^2} = 92,27 \pm 0,75$ %. Наименьшими из числа рассматриваемых стали оценки массы пыли на 1 м² листовой поверхности, $h^2 \pm s^{h^2} = 55,62 \pm 4,31$ %. В случае привлечения к вычислению величин эффекта влияния межвидовых различий расчетного алгоритма Снедекора в целом был получен аналогичный результат. При этом оценки оказывались даже несколько выше, чем по первому алгоритму: по массе смыва с поверхности 100 листовых пластинок был достигнут наибольший результат, $h^2 \pm s^{h^2} = 95,31 \pm 0,46$ %. По массе пыли на 1 м² листовой поверхности результат, как и в первом варианте расчетов, оказался наименьшим, $h^2 \pm s^{h^2} = 54,32 \pm 4,44$ %. В целом эти данные подтверждают высокий уровень наследственной обусловленности видоспецифичности тополей в плане проявления ими потенциала пылезадерживающей способности.

Вычисление значений критериев существенности различий – наименьшей существенной разности (НСР) и D-критерия Тьюки (табл. 2) – позволило установить потенциальную пылезадерживающую способность, расхождения в значениях которой могут быть отнесены к категории существенных, для различных видов тополей (рис. 1, 2). Практически по всем указанным признакам в попарном сопоставлении значений различия на 5 %-м уровне значимости превышали величины как НСР, так и D-критерия Тьюки.

Трехфакторный дисперсионный анализ выявил характер влияния мест расположения листовой поверхности в различных частях кроны на эффективность осаждения пыли. Результаты для массы пыли, осевшей на листовой поверхности побегов в разных частях кроны учетного дерева, и площади пылеосаждающей поверхности листового аппарата в приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние местоположения участка кроны тополей на осаждение пыли

| Источник дисперсии (фактор) | Критерий Фишера | | Доля влияния фактора | | | | | |
|--|-----------------|-------------|----------------------|---------------|-----------|--------------|---------------|-----------|
| | | | по Плохинскому | | | по Снедекору | | |
| | $F_{\text{оп}}$ | $F_{05/01}$ | h^2 | $\pm s^{h^2}$ | F^{h^2} | h^2 | $\pm s^{h^2}$ | F^{h^2} |
| <i>Масса пыли, осевшей на листовой поверхности побегов учетного дерева</i> | | | | | | | | |
| A | 165,74 | 2,02/2,07 | 0,3765 | 0,0051 | 74,54 | 0,4558 | 0,0044 | 103,39 |
| B | 210,01 | 2,61/3,80 | 0,2045 | 0,0028 | 74,03 | 0,2892 | 0,0025 | 117,16 |
| C | 110,76 | 3,00/4,62 | 0,0719 | 0,0021 | 33,46 | 0,1012 | 0,0021 | 48,66 |
| A×B×C | 4,89 | 1,41/1,61 | 0,0667 | 0,0454 | 1,47 | 0,0431 | 0,0465 | 0,9263 |
| AB | 5,12 | 1,58/1,89 | 0,0349 | 0,0235 | 1,49 | 0,0152 | 0,0239 | 0,6356 |
| AC | 1,54 | 1,70/2,09 | 0,0070 | 0,0161 | 0,44 | 0,0020 | 0,0486 | 0,0412 |
| BC | 2,84 | 2,10/2,82 | 0,0055 | 0,0069 | 0,80 | 0,0204 | 0,8893 | 0,0229 |
| AB×AC×BC | 1,41 | 1,41/1,61 | 0,0192 | 0,0477 | 0,40 | 0,0004 | 0,0486 | 0,0078 |
| Z | 2,84 | – | 0,2804 | 0,7196 | 0,39 | 0,1107 | 0,8893 | 0,1245 |
| <i>Площадь пылеосаждающей поверхности листового аппарата учетного дерева</i> | | | | | | | | |
| A | 129,87 | 2,02/2,07 | 0,3492 | 0,0053 | 66,23 | 0,4401 | 0,0045 | 97,02 |
| B | 171,32 | 2,61/3,80 | 0,1974 | 0,0028 | 70,84 | 0,2908 | 0,0025 | 118,10 |
| C | 90,95 | 3,00/4,62 | 0,0699 | 0,0022 | 32,45 | 0,1024 | 0,0021 | 49,28 |
| A×B×C | 3,20 | 1,41/1,61 | 0,0517 | 0,0461 | 1,12 | 0,0301 | 0,0471 | 0,6381 |
| AB | 4,39 | 1,58/1,89 | 0,0354 | 0,0234 | 1,51 | 0,0154 | 0,0239 | 0,6441 |
| AC | 0,84 | 1,70/2,09 | 0,0045 | 0,0161 | 0,28 | – | – | – |
| BC | 1,98 | 2,10/2,82 | 0,0046 | 0,0069 | 0,66 | – | – | – |
| AB×AC×BC | 0,45 | 1,41/1,61 | 0,0072 | 0,0483 | 0,15 | – | – | – |
| Z | 1,98 | – | 0,3319 | 0,6681 | 0,50 | 0,1366 | 0,8634 | 0,1582 |

Примечание: A×B×C – суммарный эффект влияния факторов A, B, C; AB, AC, BC – эффект взаимодействия соответствующих факторов; AB×AC×BC – влияние совместного парного взаимодействия факторов; $F_{05/01}$ – табличное значение критерия Фишера на 5 %-м и 1 %-м уровнях значимости; F^{h^2} – критерий Фишера доли влияния фактора как отношение h^2 к s^{h^2} .

По массе пыли, осевшей на листовой поверхности побегов, влияние каждого отдельного организованного фактора оказалось высокосущественным, на что указывает величина соответствующих им опытных критериев Фишера,

во много раз превышающая установленные для них табличные значения как на 5 %-м, так и на 1 %-м уровнях значимости (табл. 2). Достоверным было совместное влияние всех трех организованных факторов ($A \times B \times C$). Опытный критерий Фишера ($F_{оп} = 4,89$) здесь превысил табличное значение на 5 %-м ($F_{05} = 1,41$) и 1 %-м ($F_{01} = 1,61$) уровнях значимости.

Эффект совместного влияния факторов А и В также оказался достоверным – вызываемые его действием различия являлись существенными: ($F_{оп} = 5,12$) – и превысил табличное значение на 5 %-м ($F_{05} = 1,58$) и 1 %-м ($F_{01} = 1,89$) уровнях значимости. Факторы В и С при их взаимодействии дали эффект: различия, вызванные ими, оказались существенными, что подтвердил расчетный критерий Фишера, составивший в этом случае 2,84 и превысивший табличное значение на 5 %-м ($F_{05} = 2,10$) и 1 %-м ($F_{01} = 2,82$) уровнях значимости. Остальные организованные факторы видимого влияния не оказали. Их критерии Фишера были меньше соответствующих табличных значений.

Наибольшее влияние на проявление фенотипической дифференциации между разными видами тополей по массе пыли, осевшей на листовой поверхности побегов в разных частях крон учетных деревьев, оказала их видовая принадлежность. В этом случае в расчетах по алгоритму Плохинского доля фактора составила $37,65 \pm 0,51$ % при достоверной оценке ($F^{h2} = 74,54$). Вычисления по алгоритму Снедекора дали несколько больший и также достоверный результат: $45,58 \pm 0,44$ % при оценке $F^{h2} = 103,39$.

Воздействие условий освещенности участка кроны, связанных с ориентацией относительно сторон света, хорошо ощутимо. В расчетах по алгоритму Плохинского доля этого фактора составила $20,45 \pm 0,28$ % при достоверной оценке ($F^{h2} = 74,03$). Вычисления по алгоритму Снедекора, как и в предыдущем случае, дали ненамного больший и также достоверный результат: $45,58 \pm 0,44$ % при оценке $F^{h2} = 117,16$. Влияние высоты, занимаемой ярусом кроны, было заметно меньше и статистически достоверно: в расчетах по алгоритму Плохинского доля влияния составила $7,19 \pm 0,21$ % при достоверной оценке ($F^{h2} = 33,46$). В вычислениях по алгоритму Снедекора, как и в предыдущих случаях, получен незначительно больший и также достоверный результат: $10,12 \pm 0,21$ % при оценке $F^{h2} = 48,66$.

Перечисленные факторы мало связаны между собой, их совместное влияние при взаимодействии сгенерировало неощутимый эффект. Использование алгоритма Плохинского позволило оценить долю влияния как $6,67 \pm 4,54$ %, оценка $F^{h2} = 1,47$ достоверна на 5 %-м уровне значимости ($F_{05} = 1,41$) и недостоверна на 1 %-м ($F_{01} = 1,61$). В вычислениях по алгоритму Снедекора получен еще меньший и недостоверный результат: $4,31 \pm 4,65$ % при оценке $F^{h2} = 0,92$. Действие остальных организованных факторов во взаимодействии малоэффективно и чаще недостоверно (табл. 2). Остаточная дисперсия, влияние которой связывают преимущественно с пестротой экологического фона, обеспечивало 28,04 % (по Плохинскому) и 11,07 % (по Снедекору).

Пылеосаждающая способность во многом зависит от характеристик листового аппарата, в частности от структуры его поверхности, которая в разных частях кроны достаточно видоспецифична (табл. 2). При этом общие тенденции, установленные для пылезадерживающей способности, в основных чертах

сохранились. Влияние организованных факторов, отдельное и во взаимодействии, вызывало возникновение существенных различий между рассматриваемыми тополями. Наибольшая доля также приходится на видоспецифичность тополей ($34,92 \pm 0,53$ %); несколько меньший эффект связан с разницей в ориентации кроны по сторонам света ($19,74 \pm 0,28$ %) и еще меньший – с разницей в уровне расположения по ярусам ($9,99 \pm 0,22$ %). Эффект парного взаимодействия организованных факторов преимущественно несущественен и недостоверен. Остаточная дисперсия достигла 33,19 %.

В заключение можно отметить, что широко распространенные на территории Нижегородской области тополя, представляющие секции белых, черных и бальзамических, в значительной мере дифференцированы по способности задерживать пыль своим листовым аппаратом, что обусловлено особенностями строения кроны, спецификой морфологии листа и индивидуальным характером облиствения побегов. Указанные фенотипические различия проявились на межвидовом и внутривидовом уровнях. Построение опыта по методической схеме, минимизирующей влияние пестроты экологического фона на результаты учета тестируемых признаков, позволило признать указанные различия наследственно обусловленными и связанными с видоспецифичностью изучаемых растений. Дисперсионный анализ подтвердил данное заключение.

Можно утверждать, что специфика видов тополей, принадлежащих секциям белых, черных и бальзамических, по способности задерживать кронами пыль требует дифференцированного подхода к составлению ассортимента видов, вводимых в состав городских насаждений на территориях, характеризующихся различной степенью и структурой запыленности воздушной среды. В этом контексте сведения о потенциале пылезадерживающей способности листового аппарата тополей, полученные нами, во многом согласуются с ранее накопленными сведениями [10–14] и со взглядами других отечественных специалистов [24].

Выводы

1. Пылезадерживающая способность листового аппарата представителей разных видов и секций тополей характеризуется изменчивостью на межвидовом и внутривидовом уровнях. Важнейшие характеристики листового аппарата и кроны тополей, которые в конечном итоге определяют их пылезадерживающую способность, детерминированы генотипически.

2. Влияние межвидовых различий на фенотипические проявления признаков, детерминирующих пылезадерживающую способность тополей, весьма значительно и наибольшего уровня достигает по массе смыва со 100 листовых пластинок и по пылезадерживающей способности листового аппарата одного побега. Наследственная обусловленность специфики исследованных видов тополей по их способности удерживать пылевые частицы поверхностью своих листьев служит основанием для дифференцированного подхода к формированию ассортимента пылезадерживающих насаждений.

3. Максимальную пылезадерживающую способность отдельного дерева, выраженную как в абсолютных, так и в относительных величинах, продемонстрировали: тополь бальзамический, тополь белый пирамидальный и типичная форма тополя белого – они рассматриваются как наиболее предпочтительные

компоненты в составе объектов городского озеленения и могут быть рекомендованы для введения в ассортимент зеленых насаждений Нижегородского Поволжья и массового производства посадочного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аверкиев Д.С. История развития растительного покрова Горьковской области и ее ботанико-географическое деление // Уч. зап. ГГУ. Горький: ГГУ, 1954. Вып. XXV. С. 119–136. Averkiyev D.S. History of Vegetation Cover Development in the Gorky Region and Its Botanical and Geographical Division. *Uchenyye zapiski GGU*, 1954, iss. XXV, pp. 119–136.

2. Агеева Е.А., Казанцева М.Н. Оценка пылеудерживающей способности листьев деревьев и кустарников в насаждениях г. Тюмени // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. Вып. 31. С. 88–91. Ageyeva E.A., Kazantseva M.N. Assessment of Dust Holding Capacity of Leaves of Trees and Shrubs in Plantations of Tyumen. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2012, iss. 31, pp. 88–91.

3. Алехин В.В. Объяснительная записка к геоботаническим картам (современной и восстановленной) бывшей Нижегородской губернии (в масштабе 1:500.000). Л.; Горький: ГГУ, 1 картогр. фабрика ВКТ (тип. 1 картогр. фабрики ВКТ), 1935. 67 с. Alekhin V.V. *Explanatory Note to the Geobotanical Maps (Modern and Restored) of the Former Nizhny Novgorod Province (Scale 1:500,000)*. Leningrad, Gorky, Gor'kovskiy gosudarstvennuyu universitet Publ., 1935. 67 p.

4. Аткина Л.И., Игнатова М.В. Особенности пылеудерживающей способности листьев *Malus baccata* L., *Sorbus aucuparia* L., *Acer negundo* L., *Crataegus sanguinea* L. в городских посадках Екатеринбургa // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 4(51). С. 79–82. Atkina L.I., Ignatova M.V. Particularities Hold Dust Abilities of Sheets to *Malus baccata* L., *Sorbus aucuparia* L., *Acer negundo* L., *Crataegus sanguinea* L. in Town Boarding of Ekaterinburg. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the Economy in Them], 2014, no. 4(51), pp. 79–82.

5. Байжанова М.К. Пылезадерживающая способность листьев некоторых древесных пород // Роль растений в оздоровлении воздушного бассейна городов Казахстана: сб. ст. / Главный ботанический сад АН КазССР. Алма-Ата: Наука. Казахстан. отд-ние, 1982. С. 36–42. Bayzhanova M.K. Dust Holding Capacity of Leaves of Some Tree Species. *The Role of Plants in Improving the Air Basin of Cities in Kazakhstan: Collection of Academic Papers*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1982, pp. 36–42.

6. Бессонова В.П. Эффективность осаждения пылевых частиц листьями древесных и кустарниковых растений // Вопросы защиты природной среды и охрана труда в промышленности. Днепропетровск: ДГУ, 1993. С. 34–37. Bessonova V.P. Efficiency of Deposition of Dust Particles by Leaves of Woody and Shrubby Plants. *Issues of Environmental Protection and Labor Protection in Industry*. Dnepropetrovsk, DGU Publ., 1993, pp. 34–37.

7. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Селекционная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной методами многомерного анализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 2. С. 58–64. Beschetsnov V.P., Beschetsnova N.N. Scots Pine Elite Trees Selective Estimation by Means of Multivariate Analysis Method. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 2, pp. 58–64. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b2c/qffe9.pdf>

8. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Образование и лигнификация ксилемы плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 45–52. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. Formation and Lignification of Xylem of Scotch Pine Elite Trees. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 45–52. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/eb1/lh4.pdf>

9. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Есичев А.О. Оценка физиологического состояния представителей рода лиственница (*Larix Mill.*) в условиях Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 1. С. 9–17. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Esichev A.O. Physiological State Evaluation of Representatives of the Genus Larch (*Larix Mill.*) in the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.9>

10. Бессчетнов П.В. Морфометрические характеристики листьев тополей в условиях городских посадок Нижнего Новгорода // Вестн. НГСХА. 2018. № 4(20). С. 17–27. Besschetnov P.V. The Morphological Characteristics of the Leaves of the Poplars in Terms of Urban Plantings of Nizhny Novgorod. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2018, no. 4(20), pp. 17–27.

11. Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Сравнительная оценка пылезадерживающей способности тополя бальзамического (*Populus balsamifera L.*) // Актуальные проблемы устойчивого развития лесного комплекса: междунар. науч.-практ. конф., посвященная 70-летию высшего лесного образования в Казахстане. Алматы: КазНАУ, 2018. С. 68–73. Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. Comparative Assessment of Dust Holding Capacity of Balsam Poplar (*Populus balsamifera L.*). *Actual Problems of Sustainable Development of the Forest Complex. International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 70th Anniversary of Higher Forest Education in Kazakhstan*. Almaty, KazNARU, 2018, pp. 68–73.

12. Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Корреляция параметров листового аппарата тополей в условиях городских посадок // Вестн. КазанГАУ. 2018. № 1(48). С. 5–10. Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. Correlation of Parameters of Poplar Leaf Apparatus in Conditions of Urban Landing. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Kazan State Agrarian University], 2018, no. 1(48), pp. 5–10. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5afafe02978e82.68901305

13. Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Тополь белый (*Populus alba L.*) в объектах озеленения Нижегородской области: корреляция и регрессия параметров листового аппарата // Вестн. НГСХ. 2019. № 2(22). С. 25–31. Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. White Poplar (*Populus alba L.*) in Green Space of the Nizhny Novgorod Region: Correlation and Regression Parameters of Foliage. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2019, no. 2(22), pp. 25–31.

14. Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н., Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А. Состояние и перспективы использования представителей рода тополь (*Populus L.*) в городских посадках в России, Беларуси и Казахстане // Экономические аспекты развития АПК и лесного хозяйства. Лесное хозяйство Союзного государства России и Белоруссии / под общ. ред. Н.Н. Бессчетновой. Н. Новгород: НГСХА, 2019. С. 93–100. Besschetnov P.V., Besschetnova N.N., Kentbayev E.Zh., Kentbayeva B.A. State and Prospects of Using Representatives of the Genus Poplar (*Populus L.*) in Urban Plantations in Russia, Belarus and Kazakhstan. *Economic Aspects of Agricultural and Forestry Development. Forestry of the Union State of Russia and Belarus*. Ed. by N.N. Besschetnova. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2019, pp. 93–100.

15. Бессчетнова Н.Н. Содержание жиров в клетках побегов плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 4. С. 48–55. Besschetnova N.N. Fat Content in the Cells of Scotch Pine Elite Trees. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 4, pp. 48–55. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a5f/bpbg6.pdf>

16. Бессчетнова Н.Н., Кулькова А.В. Содержание запасных питательных веществ в клетках тканей годичных побегов представителей рода ель (*Picea L.*) в условиях Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 52–61. Besschetnova N.N.,

Kulikova A.V. The Content of Reserve Nutrients in the Cells of Annual Shoot Tissues of the Representatives of the Spruce (*Picea* L.) Genus in Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.52>

17. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кулькова А.В., Мишукова И.В. Содержание крахмала в тканях побегов разных видов ели (*Picea* A. Dietr.) в условиях интродукции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 57–68. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kul'kova A.V., Mishukova I.V. Starch Content in Shoot Tissues of Different Spruce Species (*Picea* A. Dietr.) in Introduction. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 4, pp. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.57>

18. Гендельс Т.В., Буданцев Л.Ю. Изучение изменчивости формы листовой пластинки *Populus deltoides* (*Salicaceae*) с помощью числового индекса // Ботан. журн. 1991. Т. 76, № 5. С. 747–752. Gendel's T.V., Budantsev L.Yu. Study on Variation of the Leaf Blade Shape in *Populus deltoides* (*Salicaceae*) Using a Numerical Index. *Botanicheskii Zhurnal*, 1991, vol. 76, no. 5, pp. 747–752.

19. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 351 с. Dospekhov B.A. *Field Test Methodology (With the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. Moscow, Al'yans Publ., 2011. 351 p.

20. Жумадилова А.Ж. Пылеудерживающая способность древесных и кустарниковых растений // Новости науки Казахстана. 2014. № 2(120). С. 38–48. Zhumadilova A.Zh. Capacity to Hold Dust of Woody and Shrubby Plants. *Novosti nauki Kazakhstan* [News of Kazakhstan Science], 2014, no. 2(120), pp. 38–48.

21. Исаков В.Н., Висковатова Л.И., Лейшовник Я.Я. Исследование морфологии листа древесных средствами автоматизации. Рига: Зинатне, 1984. 196 с. Isakov V.N., Viskovatova L.I., Leishovnik Ya.Ya. *Study of Leaf Morphology of Woody Plants by Automation Facilities*. Riga, Zinatne Publ., 1984. 196 p.

22. Кавеленова Л.М., Малыхина Е.В., Розно С.А., Смирнов Ю.В. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений // Поволж. экол. журн. 2008. № 3. С. 200–210. Kavelenova L.M., Malykhina E.V., Rozno S.A., Smirnov Yu.V. On the Methodology of Tree Leaf Ecophysiological Studiesresearch of Leaves of Woody Plants. *Povolzhskij ekologičeskij žurnal* [Povolzhskiy Journal of Ecology], 2008, no. 3, pp. 200–210.

23. Кондратюк Е.Н., Тарабрин В.П., Бакланов В.И., Бурда Р.И., Хархота А.И. Промышленная ботаника / под общ. ред. Е.Н. Кондратюка. Киев: Наукова думка, 1980. 260 с. Kondratyuk E.N., Tarabrin V.P., Baklanov V.I., Burda R.I., Kharkhota A.I. *Industrial Botany*. Ed. by E.N. Kondratyuk. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1980. 260 p.

24. Корлыханов М.С., Корлыханова Т.В. Пылезадерживающая способность листовой поверхности тополя свердловского серебристого пирамидального в условиях г. Екатеринбург // Аграр. вестн. Урала. 2008. № 10(52). С. 93–94. Korlikhanov M.S., Korlikhanova T.V. The Possibility of Erasing Properties of Leaves Poplar Sverdlovsk Silvery Pyramidal in the Conditions of Yekaterinburg City. *Agrarnyj vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2008, no. 10(52), pp. 93–94.

25. Коршиков И.И., Котов В.С., Михеенко И.П. Взаимодействие растений с техногенно загрязненной средой. Устойчивость. Фитоиндикация. Оптимизация: моногр. Киев: Наукова думка, 1995. 191 с. Korshikov I.I., Kotov V.S., Mikheyenko I.P. *Interaction of Plants with Anthropogenically Polluted Environment. Stability. Phytoindication. Optimization*: Monograph. Kiev, Naukova dumka Publ., 1995. 191 p.

26. Кулагин А.А., Шагиева Ю.А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей. М.: Наука, 2005. 190 с. Kulagin A.A., Shagiyeva Yu.A. *Woody Plants and Biological Conservation of Industrial Pollutants*. Moscow, Nauka Publ., 2005. 190 p.

27. Кулагин Ю.З. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука, 1974. 126 с. Kulagin Yu.Z. *Woody Plants and the Industrial Environment*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 126 p.
28. Кулькова А.В., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Многопараметрический анализ в оценке видоспецифичности представителей рода ель (*Picea*) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 23–38. Kul'kova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Multivariable Analysis in the Assessment of Spruce Species Specificity (*Picea*). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 23–38. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.23>
29. Куприянов Н.В., Веретенников С.С., Шишов В.В. Леса и лесное хозяйство Нижегородской области. Н. Новгород: Волго-Вятское книж. изд-во, 1995. 349 с. Kupriyanov N.V., Veretennikov S.S., Shishov V.V. *Forests and Forestry of the Nizhny Novgorod Region*. Nizhny Novgorod, Volgo-Vyatskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1995. 349 p.
30. Курбатова А.С., Башкин В.Н., Касимов Н.С. Экология города. М.: Науч. мир, 2004. 624 с. Kurbatova A.S., Bashkin V.N., Kasimov N.S. *Urban Ecology*. Moscow, Nauchnyu mir Publ., 2004. 624 p.
31. Ляховенко О.И., Чулков Д.И. Основные экологические проблемы российских городов и стратегия их разрешения // Русская политология – Russian political science. 2017. № 3(4). С. 21–26. Lyakhovenko O.I., Chulkov D.I. Main Environmental Problems of Russian Cities and Their Resolution Strategy. *Russkaya politologiya* [Russian Political Science], 2017, no. 3(4), pp. 21–26.
32. Мальцев П.М., Емельянова Н.А. Основы научных исследований. Киев: Вища шк., 1982. 192 с. Mal'tsev P.M., Emel'yanova N.A. *Fundamentals of Scientific Research*. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1982. 192 p.
33. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экол. и биотехнол. аспекты. Новосибирск: Наука, 2003. 221 с. Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. *Woody Plants and Urbanized Environment: Ecological and Biotechnological Aspects*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 221 p.
34. Полуяхтов К.К. Лесорастительное районирование Горьковской области // Биологические основы повышения продуктивности и охраны лесных, луговых и водных фитоценозов Горьковского Поволжья. Горький: ГГУ, 1974. С. 4–20. Poluyakhtov K.K. Forest Site Zoning of the Gorky Region. *Biological Bases of Increasing Productivity and Protection of Forest, Meadow and Water Phytocenoses of the Gorky Volga Region*. Gorky, GGU Publ., 1974, pp. 4–20.
35. Приходько С.А., Штирц Ю.А. Оценка изменчивости формы листовой пластинки *Populus nigra* L. S.L. в условиях промышленных отвалов методами геометрической морфометрии // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2019. Т. 28, № 2. С. 219–229. Prikhodko S.A., Shtirts Yu.A. Evaluation of Variability of Leaf Blade Shape of *Populus nigra* L. s.l. on Industrial Dumps by Methods of Geometric Morphometry. *Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 219–229. DOI: <https://doi.org/10.24411/2073-1035-2019-10222>
36. Сафронова У.А., Аткина Л.И. Накопление пыли на листьях черемухи Маака в городских условиях // Экологические проблемы Севера / отв. ред. П.А. Феклистов. Архангельск: АГТУ, 2010. Вып. 13. С. 24–26. Safronova U.A., Atkina L.I. Accumulation of Dust on Leaves of Manchurian Cherry in Urban Conditions. *Environmental Problems of the North*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2010, iss. 13, pp. 24–26.
37. Стельмахович М.Л., Котелова Н.В. Тополя, их применение в лесном хозяйстве и озеленении. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 108 с. Stel'makhovich M.L., Kotelova N.V. *Poplars, Their Use in Forestry and Landscaping*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 108 p.

38. Чернышенко О.В. Пылефильтрующая способность древесных растений // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 3. С. 7–10. Chernyshenko O.V. Dust Filtering Ability of Woody Plants. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy Vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 3, pp. 7–10.
39. Adams J.P., Pelkki M.H., Ford V.L., Humphrey A. Initial Effects of Quinclorac on the Survival and Growth of High Biomass Tree Species. *Annals of Forest Research*, 2017, vol. 60, iss. 1, pp. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.15287/afr.2016.734>
40. Afas N.A., Marron N., Ceulemans R. Variability in *Populus* Leaf Anatomy and Morphology in Relation to Canopy Position, Biomass Production, and Varietal Taxon. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, no. 4, pp. 521–532. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2007029>
41. Alimohamadi A., Asadi F., Aghdaei R.T. Genetic Diversity in *Populus nigra* Plantations from West of Iran. *Annals of Forest Research*, 2012, vol. 55, iss. 2, pp. 165–178.
42. Barigah T.S., Saugier B., Mousseau M., Guittet J., Ceulemans R. Photosynthesis, Leaf Area and Productivity of 5 Poplar Clones during Their Establishment Year. *Annals of Forest Science*, 1994, vol. 51, no. 6, pp. 613–625. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:19940607>
43. Broeck A.V., Cottrell J., Quataert P., Breyne P., Storme V., Boerjan W., Slycken J.V. Paternity Analysis of *Populus nigra* L. Offspring in a Belgian Plantation of Native and Exotic Poplars. *Annals of Forest Science*, 2006, vol. 63, no. 7, pp. 783–790. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2006060>
44. Bunn S.M., Rae A.M., Herbert C.S., Taylor G. Leaf-Level Productivity Traits in *Populus* Grown in Short Rotation Coppice for Biomass Energy. *Forestry*, 2004, vol. 77, iss. 4, pp. 307–323. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/77.4.307>
45. Casella E., Sinoquet H. Botanical Determinants of Foliage Clumping and Light Interception in Two-Year-Old Coppice Poplar Canopies: Assessment from 3-D Plant Mock-ups. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, no. 4, pp. 395–404. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2007016>
46. Ceulemans R., Hinckley T.M., Heilman P.E., Isebrands J.G., Stettler R.F. Crown Architecture in Relation to Productivity of *Populus* Clones in the Pacific Northwest, U.S.A. *Annals of Forest Science*, 1989, vol. 46, no. suppl., pp. 199–201. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:19890546>
47. Coll L., Messier C., Delagrangé S., Berninger F. Growth, Allocation and Leaf Gas Exchanges of Hybrid Poplar Plants in Their Establishment Phase on Previously Forested Sites: Effect of Different Vegetation Management Techniques. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, no. 3, pp. 275–285. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2007005>
48. Cooke J.E.K., Rood S.B. Trees of the People: The Growing Science of Poplars in Canada and Worldwide. *Canadian Journal of Botany*, 2007, vol. 85, no. 12, pp. 1103–1110. DOI: <https://doi.org/10.1139/B07-125>
49. Dean A., Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments*. Springer International Publishing, 2017. 865 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>
50. Dillen S.Y., Rood S.B., Ceulemans R. Growth and Physiology. *Genetics and Genomics of Populus*. Ed. by S. Jansson, R. Bhalerao, A. Groover. New York, Springer, 2010, pp. 39–63. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1541-2_3
51. Eckenwalder J.E. Foliar Heteromorphism in *Populus* (*Salicaceae*), a Source of Confusion in the Taxonomy of Tertiary Leaf Remains. *Systematic Botany*, 1980, vol. 5, no. 4, pp. 366–383. DOI: <https://doi.org/10.2307/2418518>
52. Eckenwalder J.E. Systematics and Evolution of *Populus*. *Biology of Populus and Its Implications for Management and Conservation*. Ed. by R.F. Stettler, H.D. Bradshaw, P.E. Heilman, T.M. Hinckley. Ottawa, NRC Research Press, 1996, pp. 7–32.

53. Falkenhagen E. A Comparison of the AMMI Method with Some Classical Statistical Methods in Provenance Research: The Case of the South African *Pinus radiata* Trials. *International Journal of Forest Genetics*, 1996, vol. 3, iss. 2, pp. 81–87.
54. Gaudillère J.P. Photosynthetic Response of Poplar Leaves under Varying Quantum Flux Density. *Annals of Forest Science*, 1989, vol. 46, no. suppl., pp. 479s–482s. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:198905ART0107>
55. Gaudillère J.P. Leaf Number, Water Stress and Carbon Nutrition Effects on Poplar Leaf Growth. *Annals of Forest Science*, 1989, vol. 46, no. suppl., pp. 493s–496s. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:198905ART0110>
56. Gornall J.L., Guy R.D. Geographic Variation in Ecophysiological Traits of Black Cottonwood (*Populus trichocarpa*). *Canadian Journal of Botany*, 2007, vol. 85, no. 12, pp. 1202–1213. DOI: <https://doi.org/10.1139/B07-079>
57. Hager H., Haslinger R., Schume H. Productivity and LAI of Floodplain Forest Sites in Relationships to Water Supply. *Ecology (Bratislava). Journal for Ecological Problem of the Biosphere*, 1999, vol. 18, suppl. 1/1999, pp. 5–14.
58. Hinkelmann K., Kempthorne O. *Design and Analysis of Experiments, Volume 1: Introduction to Experimental Design*. Hoboken, NJ, Wiley, 2008. 631 p.
59. Leech R.H., Kim Y.T. Foliar Analysis and DRIS as a Guide to Fertilizer Amendments in Poplar Plantations. *The Forestry Chronicle*, 1981, vol. 57, no. 1, pp. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc57017-1>
60. Marron N., Brignolas F., Delmotte F.M., Dreyer E. Modulation of Leaf Physiology by Age and in Response to Abiotic Constraints in Young Cuttings of Two *Populus deltoides* × *P. nigra* Genotypes. *Annals of Forest Science*, 2008, vol. 65, iss. 4, art. 404. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2008016>
61. Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. Hoboken, NJ, Wiley, 2003. 760 p.
62. Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. New York, Chapman and Hall/CRC, 2003. 488 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203738559>
63. Milla-Moreno E.A., McKown A.D., Guy R.D., Soolanayakanahally R.Y. Leaf Mass per Area Predicts Palisade Structural Properties Linked to Mesophyll Conductance in Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.). *Botany*, 2016, vol. 94, no. 3, pp. 225–239. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjb-2015-0219>
64. Oszlanyi J. Consequences of Anthropogenic Impact on Danube Floodplain Forests in Slovakia. *Ecology (Bratislava). Journal for Ecological Problem of the Biosphere*, 1999, vol. 18, suppl. 1/1999, pp. 103–110.
65. Scarascia-Mugnozza G.E., Isebrands J.G., Hinckley T.M., Stettler R.F. Dynamics of Light Interception, Leaf Area and Biomass Production in *Populus* Clones in the Establishment Year. *Annals of Forest Science*, 1989, vol. 46, no. suppl., pp. 515s–518s. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:198905ART0116>
66. Slavov G.T., Zhelev P. Salient Biological Features, Systematics, and Genetic Variation of *Populus*. *Genetics and Genomics of Populus*. Ed. by S. Jansson, R. Bhalerao, A. Groover. New York, Springer, 2010, pp. 15–38. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1541-2_2
67. Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Waltham, MA, Butterworth-Heinemann, 2005. 432 p.
68. Zar J.H. *Biostatistical Analysis*. Edinburg Gate, Pearson, 2014. 756 p.

УДК 635.05

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-65-75

ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ДЕКОРАТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСТЕНИЙ В ОЗЕЛЕНЕНИИ ГОРОДА ХАНОЙ*Нгуен Тхи Иен*¹, д-р с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-3564>*Данг Ван Ха*¹, д-р наук в области выращивания декоративных растений и растениеводства, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-8515>*Т.А. Парина*², канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-5665-2021](https://orcid.org/0000-0002-2472-8392),ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2472-8392>¹Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства, Суанмай, Чьонгми, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам; e-mail: hadv@vnuf.edu.vn, haiyenvfu2009@gmail.com²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: t.parinova@narfu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 24.02.20 / Принята к печати 05.05.20

Аннотация. Представлены результаты исследований видового разнообразия и декоративных особенностей насаждений г. Ханоя. Актуальность работы обоснована невыполнением норм озеленения в городе в соответствии с общемировыми рекомендациями. Составлен общий флористический список. Зафиксировано 304 вида (в т. ч. разновидности и формы), относящихся к 253 родам и 104 семействам. Ведущие семейства – *Fabaceae*, *Arecaceae*, *Asteraceae*, *Aposynaceae*, *Bignoniaceae*, *Meliaceae*, *Verbenaceae*, *Myrtaceae*, *Moraceae*, *Caesalpiniaceae*. По числу родов и видов преобладает *Fabaceae*, за ним следует *Moraceae*. Наибольшее видовое разнообразие отмечено среди деревьев (151 вид – 49,67 % от общего числа). В количественном отношении самая значительная доля участия у таких видов деревьев, как: *Peltophorum pterocarpum*, *Delonix regia*, *Khaya senegalensis*, *Chukrasia tabularis*, *Ceiba pentandra*, *Pterocarpus macrocarpus*, *Hopea odorata*, *Dracontomelon mangiferum*, *Alstonia scholaris*, *Lagerstroemia speciosa*, *Terminalia mantaly*. Преобладают вечнозеленые виды растений, в меньшем количестве встречаются листопадные. Из 151 вида деревьев 70 отнесены к декоративным. Кустарники и травы по количеству видов уступают деревьям (по 58 видов – 19,08 %). Меньше всего пальмовых «деревьев» – 11 видов (3,62 %). Определены декоративные признаки основных видов. Составлен список деревьев, имеющих три и более декоративных признака, кустарников и трав с двумя и более. Даны рекомендации использовать входящие в этот перечень растения для создания уникального городского пейзажа в разные сезоны года.

Для цитирования: Нгуен Тхи Иен, Данг Ван Ха, Парина Т.А. Видовое разнообразие и декоративные особенности растений в озеленении города Ханой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 65–75. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-65-75

Ключевые слова: Ханой, озеленение, растительные насаждения, видовое разнообразие, декоративные особенности, жизненная форма, систематический анализ, биоморфологический анализ.

SPECIES DIVERSITY AND DECORATIVE FEATURES OF PLANTS USED IN LANDSCAPING OF HANOI

*Nguyen Thi Yen*¹, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-3564>

*Dang Van Ha*¹, Doctor of Ornamental Plants and Horticulture Science, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-8515>

*Tatyana A. Parinova*², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAL-5665-2021](https://orcid.org/0000-0002-2472-8392);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2472-8392>

¹Vietnam National University of Forestry, Xuan Mai, Chuong My, Ha Noi, Socialist Republic of Vietnam; e-mail: hadv@vnuf.edu.vn, haiyenvfu2009@gmail.com

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: t.parinova@narfu.ru

Original article / Received on February 24, 2020 / Accepted on May 5, 2020

Abstract. The article presents the results of studies on species diversity and decorative features of plantations in Hanoi. The relevance of this research is justified by the failure to meet the standards of landscaping in the city in accordance with global recommendations and standards. The dendroflora of central Hanoi has 304 species (including varieties and forms) belonging to 253 genera and 104 families. The leading families are *Fabaceae*, *Arecaceae*, *Asteraceae*, *Apocynaceae*, *Bignoniaceae*, *Meliaceae*, *Verbenaceae*, *Myrtaceae*, *Moraceae*, *Caesalpiniaceae*, *Rosaceae*, and *Magnoliaceae*. The *Fabaceae* family predominates by the number of genera and species; and is followed by the *Moraceae* family. The greatest species diversity is observed among trees (151 species – 49.67 % of the total number). The most commonly used species in the urban gardening are *Peltophorum pterocarpum*, *Delonix regia*, *Khaya senegalensis*, *Chukrasia tabularis*, *Ceiba pentandra*, *Pterocarpus macrocarpus*, *Hopea odorata*, *Dracontomelon mangiferum*, *Alstonia scholaris*, *Lagerstroemia speciosa*, and *Terminalia mantaly*. Evergreen species predominate among plantations of Hanoi; while deciduous (including shrubs and trees) have a smaller proportion. Of 151 species of trees, 70 are classified as decorative. Shrubs and herbs are inferior to trees by the number of species (58 species each – 19.08 %). Palm trees are the least numerous – 11 species (3.62 %). The decorative features of the main species have been determined. A list of trees with 3 or more decorative features, shrubs and herbs with 2 or more decorative features was compiled. In order to create a unique urban landscape in different seasons of the year it is recommended to use the species included in this list.

For citation: Nguyen Thi Yen, Dang Van Ha, Parinova T.A. Species Diversity and Decorative Features of Plants Used in Landscaping of Hanoi. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 65–75. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-65-75

Keywords: Hanoi, landscaping, plantings, species diversity, decorative features, life form, systematic analysis, biomorphological analysis.

Введение

Биоразнообразие – сложное комплексное понятие, включающее в себя качественные и количественные характеристики на трех разных организационных уровнях: генетическом, видовом, экосистемном. Оно играет важную роль в существовании зеленых насаждений, снижая риски, связанные с распространением вредителей и развитием фитопатологий, с изменением климата, и в целом

повышает устойчивость растений, качество выполнения ими экосистемных функций [11, 12, 14, 16].

Ввиду широкого спектра экосистемных функций видовое разнообразие насаждений в городах мира стало объектом пристального внимания ученых [12, 15, 17, 18]. Детализация исследований для разных регионов мира различна. Для Вьетнама эта тема остается малоизученной. Ханой – административная, культурная и экономическая столица этой страны. Его население составляет примерно 8 млн чел., площадь – 3324,92 км². В настоящее время в Ханое один из самых высоких уровней загрязнения воздуха по сравнению с многими другими городами [2], поэтому актуален вопрос изучения состояния зеленых насаждений и их протекционных функций. Норма озеленения, установленная Всемирной организацией здравоохранения, равна 50 м² зеленых насаждений на одного жителя. Плохими по условиям озеленения считаются города, где растительность занимает менее 10 % площади, хорошими – 40–60 % [1]. Для Ханоя этот показатель в среднем равен 2 м² (включая травянистую растительность) [13]. Только в последнее время исследователи начинают уделять больше внимания изучению видового разнообразия городских насаждений Ханоя и увеличению их площади [4–7].

Цель настоящей работы – изучение видового разнообразия зеленых насаждений столицы Вьетнама г. Ханоя и оценка декоративных особенностей выявленных видов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являются зеленые насаждения центральной части г. Ханоя. Предмет – видовой состав и биоморфологические особенности видов растений, их декоративные признаки. Работы проводили в течение 2017–2019 гг. путем маршрутного обследования в пределах селитебной части города на основе линейных маршрутов. В каждом насаждении вели подсчет видов и определяли их декоративные особенности. Виды разделяли по укрупненным группам жизненных форм (дерево, пальмовое «дерево», кустарник, трава, лиана). По [3] оценивали следующие декоративные признаки: вечнозеленость/листопадность, окраску листьев и плодов, форму ствола и кроны, красоту и аромат цветов. Используются систематический и биоморфологический методы анализа.

Латинские названия видов приводятся в соответствии с опубликованными списками [8, 10] и электронной ботанической базой данных, содержащей таксономическую информацию о растениях, в основном из неотропической экосоны [19]. Авторский знак в наименованиях упущен целенаправленно.

Для систематизации данных и оценки жизненных форм растений использовали работы Департамента науки и техники г. Ханоя [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Наши исследования показали, что основу зеленых насаждений центра г. Ханоя составляют покрытосеменные растения (97 % здесь и далее от общего количества), среди которых преобладают двудольные (87 %). Насчитывается

304 вида деревьев, кустарников, лиан и трав (включая разновидности), относящихся к 253 родам и 104 семействам (табл. 1, 2). Пропорции флоры составляют 1:2,43:2,92, т. е. на 1 семейство в среднем приходится около 2 родов и 3 видов.

Таблица 1

Систематическая структура флоры зеленых насаждений г. Ханоя

| Таксоны | Число видов | | Число родов, шт. | Число семейств, шт. |
|-----------------------|-------------|-------------------|------------------|---------------------|
| | шт. | % от общего числа | | |
| <i>Pinophyta</i> | 10 | 3 | 7 | 5 |
| <i>Magnoliophyta:</i> | 294 | 97 | 246 | 99 |
| <i>Magnoliopsida</i> | 264 | 87 | 217 | 85 |
| <i>Liliopsida</i> | 30 | 10 | 29 | 14 |
| <i>Всего</i> | 304 | 100 | 253 | 104 |

Таблица 2

Ведущие семейства флоры зеленых насаждений г. Ханоя

| Семейство | Число видов, шт. | % от общего числа | Число родов, шт. | % от общего числа |
|---------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| <i>Fabaceae</i> | 27 | 8,88 | 18 | 7,11 |
| <i>Moraceae</i> | 19 | 6,25 | 5 | 1,98 |
| <i>Arecaceae</i> | 12 | 3,95 | 12 | 4,74 |
| <i>Asteraceae</i> | 11 | 3,62 | 11 | 4,35 |
| <i>Myrtaceae</i> | 11 | 3,62 | 6 | 2,37 |
| <i>Аросунасеае</i> | 10 | 3,29 | 11 | 4,35 |
| <i>Bignoniaceae</i> | 10 | 3,29 | 9 | 3,56 |
| <i>Magnoliaceae</i> | 10 | 3,29 | 4 | 1,58 |
| <i>Meliaceae</i> | 9 | 2,96 | 9 | 3,56 |
| <i>Verbenaceae</i> | 7 | 2,30 | 7 | 2,77 |
| Остальные | 178 | 58,58 | 161 | 63,68 |
| <i>Всего</i> | 304 | 100 | 253 | 100 |

Ведущие семейства – *Fabaceae*, *Moraceae*, *Arecaceae*, *Asteraceae*, *Myrtaceae*, *Аросунасеае*, *Bignoniaceae*, *Magnoliaceae*, *Meliaceae*, *Verbenaceae*. В каждом из них 7 и более видов, объединенных в 5 и более родов (см. табл. 1). *Fabaceae* преобладает как по числу родов, так и по числу видов (18 родов и 27 видов – 7,11 и 8,88 % соответственно). На втором месте по количеству используемых в озеленении видов находится семейство *Moraceae* – 19 видов и 5 родов. Из 104 выделенных семейств в 28 входит более 3 видов, в остальные – 1–2 (см. рисунок).

В ходе биоморфологического анализа было выделено 5 крупных категорий жизненных форм (табл. 3). Наибольшее видовое разнообразие характерно для деревьев (151 вид – 49,67 %). Однако из 151 вида только 70 отнесены нами к декоративным. Они целенаправленно высажены для озеленения, в то время как остальные являются дикорастущими или высаженными населением. Второе место по видовому разнообразию занимают кустарники и травы – по 58 видов (19,08 %). Меньше всего пальм – 11 видов (3,62 %).



а



б



в



г



д

Некоторые распространенные виды в зеленых насаждениях г. Ханоя: а – деревья (*Erythrina fusca*, *Saraca indica*); б – пальмы (*Roystonea regia*, *Phoenix dactylifera*); в – кустарники (*Bougainvillea spectabilis*, *Aglaia duperreana*); г – лианы (*Pyrostegia venusta*, *Combretum indicum*); д – травы (*Zoysia japonica*, *Arachis pintoi*)

Some common species in green spaces of Hanoi: а – trees (*Erythrina fusca*, *Saraca indica*); б – palms (*Roystonea regia*, *Phoenix dactylifera*); в – shrubs (*Bougainvillea spectabilis*, *Aglaia duperreana*); г – lianas (*Pyrostegia venusta*, *Combretum indicum*), д – herbs (*Zoysia japonica*, *Arachis pintoi*)

Таблица 3

Жизненные формы видов зеленых насаждений г. Ханоя

| Жизненная форма | Число видов | % от общего числа |
|-----------------|-------------|-------------------|
| Дерево | 151 | 49,67 |
| Кустарник | 58 | 19,08 |
| Трава | 58 | 19,08 |
| Лиана | 26 | 8,22 |
| Пальма | 11 | 3,62 |
| Всего | 304 | 100 |

Для каждой из 5 жизненных форм проведено с учетом декоративности более дробное разделение видов по биоморфологическим особенностям. Число видов в каждой группе указано в табл. 4. Один и тот же вид в пределах одной жизненной формы может характеризоваться несколькими такими особенностями.

Таблица 4

Биоморфологические особенности видов в составе зеленых насаждений г. Ханоя

| Жизненная форма | Декоративные биоморфологические особенности | Число видов | % от общего числа |
|-----------------|---|-------------|-------------------|
| Дерево | Вечнозеленое | 117 | 77,48 |
| | Листопадное | 34 | 22,52 |
| | Красивые цветы | 37 | 24,50 |
| | Красивая форма (прямоствольность) | 14 | 9,27 |
| | Красивая крона | 14 | 9,27 |
| | Красивые корни | 9 | 5,96 |
| | Красивая окраска листьев | 4 | 2,61 |
| Кустарник | Вечнозеленый | 51 | 87,93 |
| | Листопадный | 7 | 12,07 |
| | Красивые цветы | 30 | 51,72 |
| | Красивая форма (прямоствольность) | 10 | 17,24 |
| | Красивая крона | 11 | 18,97 |
| | Красивая окраска листьев | 7 | 12,07 |
| Трава | Красивая окраска листьев | 12 | 20,69 |
| | Красивые цветы | 46 | 79,31 |
| Лиана | Красивые цветы | 20 | 76,92 |
| | Красивая окраска листьев | 3 | 11,54 |
| <i>Всего</i> | | 304 | 100 |

Примечание: Пальмы в данной таблице включены в группу «деревья».

Из 151 вида деревьев 117 относятся к вечнозеленым (77,48 %) и 34 – к листопадным (22,52 %), т. е. на каждые 3 вида вечнозеленых деревьев приходится 1 вид листопадных. На видовом уровне преобладают вечнозеленые

деревья. Для озеленения в настоящее время чаще используют деревья с красивыми цветами (37 видов – 24,5 % здесь и далее от 151 вида), потом деревья с красивой формой (14 видов – 9,27 %), с красивыми корнями (9 видов – 5,96 %), с красивой окраской листьев (4 вида – 2,61 %). Таким образом, распределение видов в городских зеленых насаждениях по биоморфологическим характеристикам разнородно. В количественном отношении наибольшее участие принимают такие деревья, как *Peltophorum pterocarpum*, *Delonix regia*, *Khaya senegalensis*, *Chukrasia tabularis*, *Ceiba pentandra*, *Pterocarpus macrocarpus*, *Hopea odorata*, *Dracontomelon mangiferum*, *Alstonia scholaris*, *Lagerstroemia speciosa*, *Terminalia mantaly*.

Для кустарников соотношение между вечнозелеными и листопадными видами составляет 51 (87,93 % здесь и далее от 58 видов): 7 (12,07 %) и означает, что на каждые 7 вечнозеленых видов приходится 1 листопадный. Как и среди деревьев, среди кустарников больше видов с красивыми цветами (30 – 51,72 %). На втором месте кустарники с красивыми кронами (11 – 18,97 %), за ними кустарники с красивой формой (10 – 17,24 %), и наконец, с красивой окраской листьев (7 – 12,07 %). Наиболее часто используемыми в озеленении города являются такие виды кустарников, как: *Ixora coccinea*, *Aglaia duperreana*, *Lagerstroemia indica*, *Codiaeum variegatum*, *Gardenia jasminoides*, *Euphorbia pulcherrima*, *Duranta erecta*, *Jasminum sambac*, *Murraya paniculata*, *Mussaenda frondosa*, *Acalypha wilkesiana*, *Juniperus chinensis*.

Видов лиан с красивыми цветами – 20, это 76,92 % от 26 видов, с красивой окраской листьев – 3 (11,54 %). Аналогично, трав с красивыми цветами – 46 (79,31 % от 58 видов), с красивой окраской листьев – 12 (20,69 %). Чаще в озеленении используют *Campsis radicans*, *Bougainvillea spectabilis*, *Pyrostegia venusta*, *Combretum indicum*, *Clerodendrum thomsoniae*, *Wisteria sinensis*, *Ficus pumila*, *Tristellateia australasiae*, *Cosmos bipinnatus*, *Zinnia elegans*, *Calendula officinalis*, *Catharanthus roseus*, *Petunia hybrida*, *Impatiens walleriana*, *Viola tricolor*, *Antirrhinum majus*, *Tagetes erecta*, *Chlorophytum elatum*, *Melampodium divaricatum*, *Plectranthus scutellarioides*, *Salvia splendens*, *Portulaca grandiflora*.

Таким образом, в ходе количественного анализа распределения жизненных форм и анализа декоративных биоморфологических особенностей было установлено, что в насаждениях г. Ханоя преобладают вечнозеленые покрытосеменные растения с красивыми цветами, а доля листопадных небольшая. Распределение видов растений по биоморфологическим особенностям в данном исследовании имеет отдельное значение, т. к. одна из главных целей озеленения г. Ханоя – это создание естественного затенения за счет крупных декоративных деревьев и одновременно увеличение площади зеленых насаждений с декоративными биоморфологическими особенностями, что в комплексе работает на улучшение городской среды, повышение ее эстетических качеств и гармонизацию архитектуры города и потребностей человека. При формировании насаждений учитывается сочетание вечнозеленых и листопадных растений, которое создает уникальный пейзаж в разные сезоны года, обеспечивая комфорт и принося эстетическое удовлетворение как жителям столицы, так и туристам.

Биоморфологические характеристики некоторых видов, широко используемых в озеленении г. Ханоя, приведены в таблицах. В табл. 5 представлены виды деревьев из общего флористического списка с 3 и более декоративными признаками одновременно. В табл. 6 перечислены виды кустарников и трав из общего флористического списка с 2 или 3 декоративными признаками. Именно виды, характеризующиеся комплексом декоративных признаков, рекомендуются нами к использованию в озеленении как сохраняющие внешнюю привлекательность в разные сезоны года.

Таблица 5

Декоративные биоморфологические особенности некоторых видов деревьев г. Ханоя

| Вид | Вечно-зеленые | Листо-падные | Красивая форма | Красивая окраска листьев | Красивые цветы | Ароматные цветы |
|--------------------------------|---------------|--------------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------|
| <i>Areca catechu</i> | ×* | | × | × | | × |
| <i>Barringtonia acutangula</i> | | × | × | × | × | |
| <i>Bauhinia purpurea</i> | × | | × | | × | |
| <i>Cananga odorata</i> | × | | × | | × | × |
| <i>Cassia siamea</i> | × | | × | | × | |
| <i>Dalbergia tukiensis</i> | | × | × | × | × | |
| <i>Delonix regia</i> | | × | × | | × | |
| <i>Erythrina fusca</i> | × | | × | | × | |
| <i>Ficus elastic</i> | × | | × | × | | |
| <i>Lagerstroemia speciosa</i> | | × | × | × | × | |
| <i>Michelia alba</i> | × | | × | | × | × |
| <i>Parashorea chinensis</i> | × | | × | | | |
| <i>Peltophorum pterocarpum</i> | × | | | | × | |
| <i>Plumeria rubra</i> | | × | × | | × | × |
| <i>Saraca dives</i> | × | | × | | × | |
| <i>Sterculia lanceolata</i> | | × | × | | × | |
| Всего из приведенных видов | 10 | 6 | 15 | 5 | 13 | 4 |
| Другие виды | 23 | 9 | 22 | 2 | 6 | 0 |
| <i>Всего</i> | 33 | 15 | 37 | 7 | 19 | 4 |

*Здесь и в табл. 6 признак, присущий данному виду.

Таблица 6

**Декоративные биоморфологические особенности некоторых кустарников
и трав г. Ханоя**

| Вид | Красивая форма | Красивая окраска листьев | Красивые цветы | Аромат цветов |
|----------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|---------------|
| <i>Acalypha hispida</i> | × | | × | |
| <i>Adenium obesum</i> | × | | × | |
| <i>Aglaia duperreana</i> | × | | | × |
| <i>Anthurium andreaunum</i> | × | | × | |
| <i>Beloperone guttata</i> | × | | × | |
| <i>Bougainvillea spectabilis</i> | × | | × | |
| <i>Brunfelsia uniflora</i> | × | | × | |
| <i>Camellia amplexicaulis</i> | × | | × | |
| <i>Campis radicans</i> | × | | × | |
| <i>Cestrum nocturnum</i> | × | | | × |
| <i>Chlorophytum elatum</i> | × | × | | |
| <i>Codiaeum variegatum</i> | × | × | | |
| <i>Crinum asiaticum</i> | × | × | × | |
| <i>Cupphera hyssopifolia</i> | × | | × | |
| <i>Duranta erecta</i> | × | × | | |
| <i>Ficus pumila</i> | × | | | |
| <i>Gardenia jasminoides</i> | × | | × | |
| <i>Hibiscus rosasiensis</i> | × | | × | |
| <i>Ixora finlaysoniana</i> | × | | × | |
| <i>Ixora species</i> | × | | × | |
| <i>Jaxminum sambac</i> | × | | × | × |
| <i>Lagerstroemia indica</i> | × | | × | |
| <i>Murraya paniculata</i> | × | | | × |
| <i>Ochna atropurpurea</i> | × | | × | |
| <i>Osmanthus odorant</i> | × | | | × |
| <i>Poisettia pulcherrima</i> | × | | × | |
| <i>Rhododendron indicium</i> | × | | × | |
| <i>Rhododendron simsii</i> | × | | × | |
| <i>Spathiphyllum patinii</i> | × | | × | |
| <i>Strelitzia reginae</i> | × | | × | |
| <i>Syzygium campanulatum</i> | × | × | | |
| <i>Tabernaemontana coronaria</i> | × | | × | × |
| <i>Vriesea splendens</i> | × | × | × | |

Заклучение

Из 304 видов (включая формы и разновидности) деревьев, кустарников, лиан и трав, относящихся к 253 родам и 104 семействам, в зеленых насаждениях г. Ханоя на основе проведенных исследований рекомендуем использовать 16 видов декоративных деревьев и 33 вида кустарников и трав. Эти растения сочетают в своих биоморфологических особенностях более двух декоративных признаков. Озеленение г. Ханоя данными видами наиболее оптимально в контексте сезонных климатических и ландшафтных изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Комарова Н.Г. Изменение городской среды в урбанизированном мире: взгляд современника // Изменения природной среды на рубеже тысячелетий: тр. Междунар. электрон. конф. Тбилиси-Москва, 2006. С. 129–132. <http://www.cetm.narod.ru/pdf/komarova.pdf>. Komarova N.G. Changing of City Environment in the Urbanized World: A Contemporary Outlook. *Changing the Natural Environment at the Turn of the Millennium: Proceedings of the International Electronic Conference*. Tbilisi-Moscow, 2006, pp. 129–132.
2. Фан Тхи Ан, Шукуров И.С., Фам Ван Лыонг, Шукурова Л.И. Исследование запыленности воздуха городской среды // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, вып. 10. С. 1425–1439. Phan Thi An, Shukurov I.S., Pham Van Luong, Shukurova L.I. A Study of the Dust Content in the Air of the Urban Environment. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 2020, vol. 15, iss. 10, pp. 1425–1439. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.10.1425-1439>
3. Đặng Văn Hà, Chu Hùng Mạnh. *Giáo trình thiết kế cảnh quan cây xanh*. Hà Nội, 2016. 106 tr. Dang Van Ha, Chu Manh Hung. *Planting Disign*. Hanoi, Agricultural Publisher, 2016. 106 p.
4. Đặng Văn Hà, Nguyễn Thị Yến. Hiện trạng cây xanh thành phố Hà Nội và đề xuất giải pháp khắc phục cây đổ, gãy sau mưa bão hàng năm. *Tạp chí Nông nghiệp & Phát triển Nông thôn*, 2015, số 21, tr. 118–125. Dang Van Ha, Nguyen Thi Yen. Current Status of Greenery in Hanoi City and Propose Solutions to Overcome Fallen Trees after Storms Every Year. *Science and Technology Journal of Agriculture and Rural Development*, 2015, no. 21, pp. 118–125. Available at: <http://www.tapchikhoahocnongnghiep.vn> (accessed 24.02.20).
5. Đặng Văn Hà, Nguyễn Thị Yến. Sử dụng cây hoa thời vụ trong trang trí cảnh quan tại thành phố Hà Nội và đề xuất giải pháp phát triển. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ lâm nghiệp*, 2018, số 4, tr. 34–40. Dang Van Ha, Nguyen Thi Yen. Seasonal Flowers in Landscape Decoration in Hanoi. *Journal of Forestry Science and Technology*, 2018, no. 4, pp. 34–40. Available at: <http://journal.vnuf.edu.vn> (accessed 24.02.20).
6. Phạm Anh Tuấn. Thực trạng quản lý và phát triển cây xanh đô thị ở thành phố Hà Nội. *Tạp chí quy hoạch xây dựng*, 2016, số 82, tr. 90–93. Pham Anh Tuan. Current Situation of Urban Greenery Management and Development in Hanoi. *The Journal of Construction Planning*, 2016, no. 82, pp. 90–93. Available at: <https://www.viup.vn/vn/Tap-chi-QHXD-m17.html> (accessed 24.02.20).
7. Phạm Anh Tuấn. Thực trạng cây xanh đường phố Hà Nội. *Tạp chí kiến trúc*, 2017, số 265, tr. 142–144. Pham Anh Tuan. Actual Situation of Green Street in Hanoi. *Architecture Magazine*, 2017, no. 265, pp. 142–144. Available at: <https://www.tapchikientruc.com.vn> (accessed 24.02.20).
8. Phạm Hoàng Hộ. *Thực vật Việt Nam*. Hà Nội, 1999–2000. 1028 tr. Pham Hoang Ho. *Plants in Vietnam*. Hanoi, Agricultural Publisher, 1999–2000. 1028 p.

9. *Tên cây rừng Việt Nam*. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, Hà Nội, 2000. 460 tr. *Name of Vietnam Forest Trees*. The Ministry of Agriculture and Rural Development, 2000. 460 p.
10. Võ Văn Chí. *Từ điển thực vật thông dụng*. Hà Nội, Nxb Nông nghiệp, 2003. 1255 tr. Vo Van Chi. *Dictionary of Plants*. Hanoi, Agricultural Publisher, 2003. 1255 p.
11. Alvey A.A. Promoting and Preserving Biodiversity in the Urban Forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, vol. 5, iss. 4, pp. 195–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.09.003>
12. Dallimer M., Irvine K.N., Skinner A.M.J., Davies Z.G., Rouquette J.R., Maltby L.L., Warren P.H., Armsworth P.R., Gaston K.J. Biodiversity and the Feel-Good Factor: Understanding Associations between Self-Reported Human Well-Being and Species Richness. *BioScience*, 2012, vol. 62, iss. 1, pp. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.1.9>
13. *Decision No. 1259/QĐ-TTg Dated July 26, 2011 of the Prime Minister Approving the General Planning on Construction of Hanoi Capital up to 2030, with a Vision toward 2050*. Available at: <https://english.luatvietnam.vn/decision-no-1259-63375-Doc1.html> (accessed 24.02.20).
14. Escobedo F.J., Clerici N., Staudhammer C.L., Corzo G.T. Socio-Ecological Dynamics and Inequality in Bogotá, Colombia's Public Urban Forests and Their Ecosystem Services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, vol. 14, iss. 4, pp. 1040–1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.011>
15. Jim C.Y., Liu H.T. Species Diversity of Three Major Urban Forest Types in Guangzhou City, China. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 146, iss. 1-3, pp. 99–114. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00449-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00449-7)
16. Kendal D., Dobbs C., Lohr V.I. Global Patterns of Diversity in the Urban Forest: Is There Evidence to Support the 10/20/30 Rule? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, vol. 13, iss. 1, pp. 411–417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.04.004>
17. Kendal D., Williams N.S.G., Williams K.J.H. Drivers of Diversity and Tree Cover in Gardens, Parks and Streetscapes in an Australian City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, vol. 11, iss. 3, pp. 257–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.03.005>
18. Sudha P., Ravindranath N.H. A Study of Bangalore Urban Forest. *Landscape and Urban Planning*, 2000, vol. 47, iss. 1-2, pp. 47–63. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(99\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00067-5)
19. *Tropicos.org. Missouri Botanical Garden*. Available at: <http://www.tropicos.org> (accessed 12.04.21).

УДК 631.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-76-91

ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ КАМЕННОЙ СТЕПИ ПОД ЛЕСНЫМ ЦЕНОЗОМ

Ю.И. Чевердин¹, *д-р биол. наук*; *ResearcherID: [AAZ-6497-2020](https://orcid.org/0000-0002-9905-0547)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9905-0547>

В.А. Беспалов¹, *канд. биол. наук*; *ResearcherID: [AAK-4088-2021](https://orcid.org/0000-0001-6787-929X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-929X>

М.Ю. Сауткина², *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID: [AAE-9165-2021](https://orcid.org/0000-0001-9244-1177)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9244-1177>

Т.В. Титова¹, *канд. биол. наук*; *ResearcherID: [AAP-6052-2021](https://orcid.org/0000-0002-6435-5455)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6435-5455>

¹Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева, квартал 5, д. 81, пос. 2-го участка института им. Докучаева, Таловский р-н, Воронежская обл., Россия, 397463; e-mail: cheverdin62@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: sautmar@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 26.02.20 / Принята к печати 30.04.20

Аннотация. Изучен комплекс показателей почв под лесными полосами. Объектами исследований являлись старовозрастные (65–68 лет) прибалочные и полевозащитные лесные насаждения Каменной Степи. Результаты позволяют оценить тренды изменения характеристик почв за длительный период. Заложены ключевые участки размером 100×100 м с использованием регулярной сетки опробования. Шаг опробования – 15–25 м. Установлено положительное влияние полевозащитных лесных полос на свойства черноземов. Отмечено увеличение мощности гумусового горизонта с 42,3 см (пашня на склоне) до 72,6±5,1 см (под лесом). Максимальные значения характерны для черноземов водораздельных участков: 59,6±2,4 см (пашня) и 85,6±3,9 см (лесная полоса). Максимальную глубину вскипания имеют черноземы выщелоченные за счет активизации процессов миграции карбонатов в нижележащие почвенные горизонты. Наименьшую – зоотурбированные путем механического переноса и перемешивания аккумулятивно-карбонатного горизонта. Обнаружена общая тенденция к снижению глубины вскипания под лесным ценозом. Наибольшей гумусированностью отличаются водораздельные участки: 7,14±0,24 % (пашня) и 8,56±0,18 % (лесная полоса). Прибалочная лесная полоса снижает риск развития эрозионных процессов. На пахотных участках в зоне ее влияния удалось сохранить достаточно мощный гумусовый профиль с высоким содержанием органического вещества: 7,03±0,27 % (под лесом) и 6,10±0,10 % (на пашне). Посадка лесных полос обуславливает изменение характера растительности. Влияние кислых продуктов распада подстилки сформировало почвенные горизонты со среднекислой реакцией среды в гумусовой толще. В составе обменно-поглощенных катионов, несмотря на лидирующее положение кальция, отмечено повышенное содержание магния. Лесные полосы в связи с изменяющимися климатическими условиями приобретают в последние десятилетия особую значимость. В степных регионах России такие насаждения являются мощным почвоохраняющим фактором, способствующим стабилизации и повышению почвенного плодородия. Необходима активизация работ по посадке искусственных лесных древостоев в степных регионах России.

Для цитирования: Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Сауткина М.Ю., Титова Т.В. Эколого-агрохимическая оценка почв Каменной Степи под лесным ценозом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 76–91. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-76-91

Ключевые слова: чернозем, лесные полосы, мощность генетических горизонтов, гумусное состояние, реакция среды, обменные основания, Каменная Степь.

ECOLOGICAL AND AGROCHEMICAL ASSESSMENT OF THE KAMENNAYA STEPPE SOILS UNDER FOREST CENOSIS

*Yuriy I. Cheverdin*¹, Doctor of Biology; ResearcherID: [AAZ-6497-2020](https://orcid.org/0000-0002-9905-0547),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9905-0547>

*Vladimir A. Bepalov*¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAK-4088-2021](https://orcid.org/0000-0001-6787-929X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-929X>

*Marina Yu. Sautkina*², Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAE-9165-2021](https://orcid.org/0000-0001-9244-1177),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9244-1177>

*Tatyana V. Titova*¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAP-6052-2021](https://orcid.org/0000-0002-6435-5455),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6435-5455>

¹Voronezh Federal Agricultural Scientific Centre named after V.V. Dokuchaev, kv. 5, 81, pos. 2 uchastka instituta im. Dokuchayeva, Talovskiy District, Voronezh Region, 397463, Russian Federation; e-mail: cheverdin62@mail.ru

²All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: sautmar@mail.ru

Original article / Received on February 26, 2020 / Accepted on April 30, 2020

Abstract. A set of parameters of soils under forest belts was studied. The objects of research were old-growth (65–68 yrs) ravine and shelterbelt forest plantations of the Kamennaya Steppe. The results allow assessing the trends of changes in soil characteristics over a long period of time. Key plots of 100×100 m were laid out using a regular sampling grid. The sampling interval is 15–25 m. A positive effect of forest shelterbelts on the properties of chernozems was found. There is an increase in thickness of the humus horizon from 42.3 cm (arable land on the slope) to 72.6±5.1 cm (under forest). The maximum values are typical for chernozems of watershed areas: 59.6±2.4 cm (arable land) and 85.6±3.9 cm (forest belt). Chernozems leached due to the activation of migration processes of carbonates into the underlying soil horizons have the maximum depth of soil effervescence. Chernozems zooturbated due to mechanical transport and mixing of accumulative-carbonate horizon have the lowest depth of soil effervescence. A general trend to decrease the depth of soil effervescence under the forest cenosis was found. The highest humus content is observed in watershed areas: 7.14±0.24 % (arable land) and 8.56±0.18 % (forest belt). A ravine forest belt reduces the risk of erosion processes. A fairly strong humus profile with a high content of organic matter: 7.03±0.27% (under forest) and 6.10±0.10% (on arable land), was possible to preserve on arable lands in the zone of the belt's influence. The planting of forest belts causes a change in the nature of vegetation. The influence of acidic products of litter decomposition formed soil horizons with a moderately acidic reaction of the environment in the humus layer. Despite the leading position of calcium, an increased content of magnesium was found in the composition of exchange-absorbed cations. Forest belts have become especially important in recent decades due to changing climatic conditions. In the steppe regions of Russia, such plantations are a powerful soil conservation factor that helps stabilize and increase soil fertility. It is necessary to intensify the planting of artificial forest stands in the steppe regions of Russia.

For citation: Cheverdin Yu.I., Bespalov V.A., Sautkina M.Yu., Titova T.V. Ecological and Agrochemical Assessment of the Kamennaya Steppe Soils under Forest Cenosis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 76–91. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-76-91

Keywords: chernozem, forest belts, thickness of genetic horizons, humus state, environmental reaction, exchangeable bases, Kamennaya Steppe.

Введение

Основным фактором изменения характеристик почв и почвенного покрова степных регионов России в последние столетия стало интенсивное антропогенное воздействие, многие вопросы которого широко обсуждаются в современной научной литературе [2, 4, 13, 16, 20, 25–28, 30].

В результате интенсивной антропогенной деятельности сформированы современные агролесокультурные ландшафты. Их ключевыми компонентами можно назвать лесные полосы (ЛП), играющие существенную роль в стабилизации плодородия. Общая площадь таких насаждений в Центральном Черноземье в настоящее время составляет 488,2 тыс. га, в том числе в Воронежской области – 172,8 тыс. га [23]. Рукотворный лесокультурный ландшафт Каменной Степи, заложенный В.В. Докучаевым, является уникальным научным объектом, позволяющим вести длительный мониторинг [15, 21].

Необходимо проведение комплексных исследований особенностей формирования структуры искусственно созданного насаждения и влияния лесных полос на процессы почвообразования [14, 19, 24, 28]. В научных публикациях много внимания уделяется гумусовому состоянию черноземов как одному из ведущих факторов плодородия почв [6, 18, 29]. Характер изменения растительности оказывает существенное влияние на содержание органического углерода и определяется особенностями использования угодий [5, 7, 8, 17, 27, 32].

Цель настоящей работы – исследование свойств черноземов отдельных компонентов лесокультурного агроландшафта при разном характере использования черноземов водоразделов и склонов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: оценка изменения мощности генетических горизонтов под влиянием прибалочных ЛП; выявление особенностей гумусового состояния черноземов; изучение изменений физико-химического состояния почв.

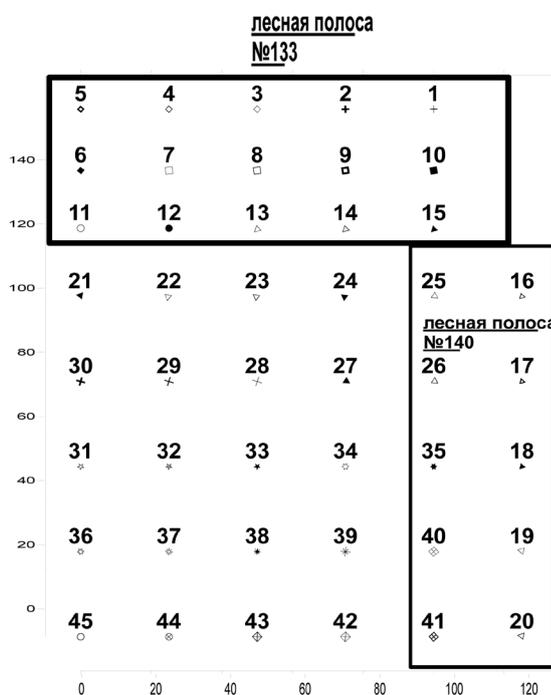
Объекты и методы исследования

Исследования проведены в агролесокультурном ландшафте Каменная Степь. Объектом служили старовозрастные ЛП № 133, 140 и прилегающие к ним пахотные участки полевого зернопаропропашного севооборота. В ЛП № 133 выбраны два участка (на водоразделе и на склоне), в ЛП № 140 – один. Пашня также включала два объекта исследований – на водоразделе и склоне. Полезащитная ЛП № 133 посажена в 1950 г. Ее размер 2070×27 м. Состав древостоя на водоразделе: 1-й ярус – 5Д2Б2К₀1(В+Я₁); 2-й ярус – 5К₀5Д. На склоне: 1-й ярус – 5Б2К₀2Д1В; 2-й ярус – 7К₀3Д. Расположение – с запада на восток. В этом же направлении отмечается общий уклон местности с перепадом высот до 50–60 м. Прибалочная ЛП № 140 посажена в 1953 г. и имеет следующий состав: 1-й ярус – 9Б1Д; 2-й ярус – 6Д3Я₁1Б [3]. Расположена

поперек склона, перпендикулярно ЛП № 133 и примыкает к ней с восточной стороны. Для оценки изменения почвенных свойств использован метод закладки ключевых участков с регулярной сеткой точек опробования: на пахотном участке размером 100×100 м с шагом 25 м количество точек опробования 20. На рис. 1 представлена схема отбора проб на склоновом участке: номера точек опробования 1–15 относятся к ЛП № 133; 16–20, 25, 26, 35, 40, 41 – к ЛП № 140; остальные – к участку пашни. Аналогично этому взяты почвенные пробы на водоразделе. Для ЛП в связи с их незначительной шириной шаг опробования был иной – 15×25 м, при размере ключевого участка 100×30 м количество точек опробования 15 и 10 шт. для ЛП № 133 и 140 соответственно. Расстояния измеряли с помощью металлических мерных лент длиной 100 м. Для точной ориентации точек опробования прямые углы на местности закладывали с помощью трех мерных лент (египетский треугольник со сторонами кратными 3:4:5). На рис. 2 приведена схема изменения высот вдоль ЛП № 133 и 140.

Рис. 1. Схема расположения точек отбора почвенных проб на склоне

Fig. 1. Layout of soil sampling points on the slope



Опробование проводили ручным буром до глубины 200 см с описанием мощности горизонтов и отбором почвенных проб. Была создана база данных, включающая в себя информацию о координатах пронумерованных точек опробования, названии почвы, морфометрических показателях. На основе этих данных проведен статистический анализ выборок почвенных свойств: мощности темногогумусового горизонта $A(AU)$ (для пахотных аналогов $A_{\text{пах}}(PU)$) и общей мощности $PU+AU$, глубины нижней границы переходного горизонта $A+AB$. Также выделены горизонты с активной проработкой землероющими животными, глубина верхней границы сплошного вскипания, мощность глинисто-иллювиального горизонта BI , выщелоченного действием карбонатов, показатели гумусного состояния почв и качественный состав гумуса, гидролитическая

кислотность, рН водной и солевой вытяжек, состав обменных катионов – Са и Mg. Ввиду активной деятельности землероющих животных выделялись горизонты зоотурбации.



Рис. 2. Изменение высот вдоль склона по профилю ЛП № 133

Fig. 2. Change in elevation along the slope lengthwise the profile of the forest belt No. 133

Исследования, наблюдения и анализы проводили следующими методами: гумус – по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова (ГОСТ 26213–91); рН солевой (в 1,0 н. KCl) и водной вытяжек – потенциометрически (ГОСТ 26483–85); гидролитическая кислотность – по Каппену (ГОСТ 26212–91); обменные Са и Mg – трилометрически; вытеснение обменных катионов Са и Mg хлористым натрием – по методике Почвенного института; качественный состав гумуса – по методу Тюрина в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Одной из основных характеристик почвенного покрова являются морфологические свойства, дающие важную информацию об изменении мощности генетических горизонтов под влиянием природных и антропогенных факторов. Анализируемые участки хотя и были схожи по диапазону мощности почвенных горизонтов, имели некоторые различия. Как и следовало ожидать, более высокая мощность пахотного и гумусового горизонтов характерна для почв лесных насаждений (табл. 1). Средние значения как на водоразделе, так и на склоне оказались близки – $35,1 \pm 0,6$ и $35,2 \pm 1,9$ см соответственно (ЛП № 133). При этом минимальные показатели на склоне равнялись 18 см, максимальные – 47 см. На плакорной части разброс был намного меньше – 30...39 см. Более высокая мощность горизонта в первом случае обусловлена активной деятельностью землероющих животных, которые хорошо развиваются на теплых обращенных к солнцу участках.

На пахотных угодьях, несмотря на различную эрозионную опасность на них, мощность горизонтов имела практически равные значения – $26,4 \pm 1,2$ см (водораздел) и $27,5 \pm 1,6$ см (склон). При этом минимум составил 21 и 12 см, максимум – 32 и 38 см соответственно. Схожесть средних показателей связана с образованием в результате ежегодных обработок почвы (вспашка) однородного слоя.

Таблица 1

Мощность генетических горизонтов, см

| Участок | $\frac{A(A_{\text{max}}+A)}{AU(PU+AU)}$ | $AB(AUb)$ | BI | Глубина вскипания |
|----------------------|---|-----------|----------|-------------------|
| ЛП № 133, склон | 35,2±1,9 | 61,8±3,1 | 83,1±2,7 | 73,6±4,5 |
| ЛП № 140, склон | 30,2±2,1 | 72,6±5,1 | – | 55,0±5,2 |
| Пашня, склон | 27,5±1,6 | 53,3±1,8 | 80,3±4,4 | 57,7±5,1 |
| ЛП № 133, водораздел | 35,1±0,6 | 85,6±3,9 | 95,0±1,3 | 64,7±5,2 |
| Пашня, водораздел | 26,4±1,2 | 59,6±2,4 | 77,3±5,7 | 62,7±4,9 |

Примечание: Для агрогенных почв темногумусовый горизонт состоит из $PU+AU$, для лесных – только из AU .

В ЛП № 140, расположенной поперек эродированного склона, средняя мощность темногумусового горизонта равнялась $30,2\pm 2,1$ см, минимум – 23 см, максимум – 40 см. При этом она увеличивалась по мере удаления от опушечной части лесной полосы.

Наиболее существенные различия отмечаются при оценке мощности гумусового слоя AB в целом. Большинство почв соответствуют среднечувствительным видам. Только под ЛП № 133 на водоразделе их можно отнести к мощным – $85,6\pm 3,9$ см. Интересен факт увеличения по сравнению с ЛП № 133 мощности горизонта AB под ЛП № 140 на склоне – $72,6\pm 5,1$ см. Различие составляет 10,8 см. Расположение ЛП № 140 поперек склона способствовало снижению эрозионных процессов и предотвращению смыва почвы. Об этом можно судить по увеличению общей мощности гумусового горизонта по мере приближения к опушке (рис. 3).

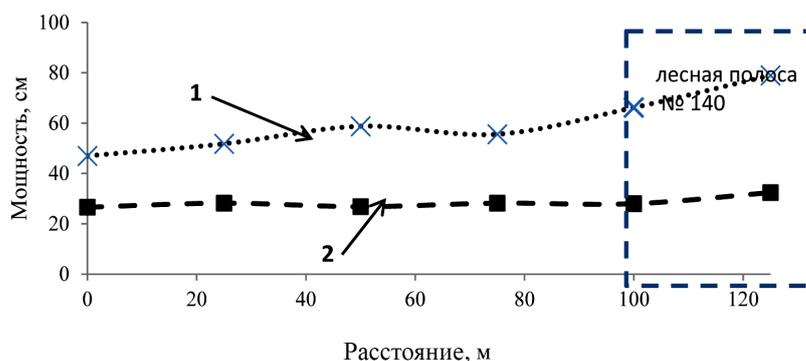


Рис. 3. Изменение мощности гумусового горизонта под влиянием прибалочной почвоохранной полосы: 1 – горизонт $AU(PU+AU)$; 2 – горизонт AUb ; прямоугольником (пунктирная линия) отмечена ЛП № 140

Fig. 3. Change in thickness of the humus horizon under the influence of the ravine soil-saving belt: 1 – horizon $AU(PU+AU)$; 2 – horizon AUb ; forest belt No. 140 is marked by the rectangle (dashed line)

В результате развития эрозионных процессов гумусовый горизонт пахотного участка, расположенного на склоне, был минимальным: $53,3 \pm 1,8$ см. Наименьшие показатели составили 35 см, максимальные – 70 см. Медиана на одном уровне со средним значением – 55 см.

Почвы обследованных участков имеют некоторые различия по глубине верхней границы появления карбонатов кальция (линия вскипания от HCl). Наименьшая глубина вскипания отмечена у почв ЛП № 140 в связи с большой долей в их составе чернозема зоотурбированного и за счет перемешивания материала гумусового и аккумулятивно-карбонатного горизонтов. Средняя глубина вскипания – $55,0 \pm 5,2$ см, вариация – 40,0...90,0 см. Смежнорасположенный эродированный участок пашни имел близкие показатели – $57,7 \pm 5,1$. Однако из-за пестроты почв, наличия зоотурбированных и выщелоченных черноземов глубина вскипания варьирует от 2 до 100 см.

Под ЛП № 133 карбонаты появляются в более глубоких почвенных горизонтах. На водораздельном участке глубина вскипания отмечена на уровне $64,7 \pm 5,2$ см, на склоне увеличивается до $73,6 \pm 4,5$ см. Это связано с наличием в составе почвенных комбинаций большой доли черноземов выщелоченных.

Изучение гумусного состояния черноземов свидетельствует о довольно высоком содержании органических веществ в этих почвах. Как и следовало ожидать, максимально высокая концентрация таких веществ характерна для почв водораздельных участков. В черноземах ЛП № 133 она составила $8,56 \pm 0,18$ % (минимум – 7,32 %, максимум – 9,86 %). Медианное значение – 8,55 %. Коэффициент варьирования – 8,30 % (табл. 2).

Таблица 2

Качественный состав гумуса в слое 0–20 см

| Участок | Гумус, % | Сорг., % | Сгк., % | Сфк., % | Сгк.:Сфк. | Сно., % |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| ЛП № 133, склон | $7,42 \pm 0,18$ | $3,04 \pm 0,18$ | $2,37 \pm 0,16$ | $0,67 \pm 0,05$ | $3,53 \pm 0,33$ | 1,26/31,2 |
| ЛП № 140, склон | $7,03 \pm 0,27$ | $2,71 \pm 0,13$ | $1,87 \pm 0,12$ | $0,84 \pm 0,05$ | $2,22 \pm 0,21$ | 1,36/33,4 |
| ЛП № 133, пашня, склон | $6,10 \pm 0,10$ | $2,50 \pm 0,05$ | $1,79 \pm 0,05$ | $0,71 \pm 0,08$ | $2,52 \pm 0,23$ | 1,03/29,3 |
| ЛП № 133, водораздел | $8,56 \pm 0,18$ | $3,39 \pm 0,11$ | $2,54 \pm 0,11$ | $0,85 \pm 0,02$ | $2,98 \pm 0,16$ | 1,57/31,8 |
| ЛП № 133, пашня, водораздел | $7,14 \pm 0,24$ | $3,23 \pm 0,08$ | $2,53 \pm 0,08$ | $0,70 \pm 0,03$ | $3,61 \pm 0,21$ | 0,91/22,0 |

Примечание: Сорг. – сумма гуминовых и фульвокислот; Сгк. – углерод гуминовых кислот; Сфк. – углерод фульвокислот; Сно. – углерод негидролизуемого остатка (гумина) от общего содержания подвижного углерода (Собщ.).

На смежном участке пахотной почвы плакора черноземы были менее гумусированы. Среднее содержание гумуса в слое 0–20 см составило $7,14 \pm 0,24$ % (минимум – 6,4 %, максимум – 9,14 %). Медиана – 7,02 %, коэффициент варьирования – 10,8 %. Можно констатировать, что почти через 70 лет после посадки ЛП разница гумусированности черноземов пашни и ЛП составила 1,42 % (при равных условиях на момент посадки древесных культур). Это объясняется влиянием антропогенного фактора. Ежегодные потери на дегумификацию

пашни равняются 0,02 %. Такие данные согласуются с полученными ранее [22]. Существует мнение, что в почвах ЛП содержание гумуса постоянно или меняется незначительно [11].

В черноземах склонов содержание органического вещества под ЛП в среднем составляет $7,42 \pm 0,18$ % (ЛП № 133) и $7,03 \pm 0,27$ % (ЛП № 140). На пашне отмечено минимальное содержание гумуса – $6,10 \pm 0,10$ %. При этом его ежегодные потери также были близки к 0,02 % (как и на водоразделе). Таким образом, прибалочная ЛП № 140 существенным образом снизила эрозионные процессы и способствовала сохранению гумуса. При среднем его содержании под ЛП № 140 7,03 % на удалении до 50 м от опушки (вверх по склону) количество органического вещества было на уровне 6,50 %. И лишь на удалении свыше 70 м снижалось до 5,90 %.

В исследованных черноземных почвах лесных ценозов Каменной Степи гумус имеет, как правило, гуматный состав. Гуминовые кислоты доминируют над фульвокислотами. Более высокое отношение Сгк./Сфк. характерно для черноземов под ЛП № 133: $3,53 \pm 0,33$ (склон) и $2,98 \pm 0,16$ (водораздел). Пашня водораздельного участка также характеризовалась высоким значением этого показателя – $3,61 \pm 0,21$. Минимальное соотношение Сгк./Сфк. отмечено в черноземах склона на пашне и ЛП № 140: $2,52 \pm 0,23$ и $2,22 \pm 0,21$ соответственно. В этой связи можно отметить, что характер изменения был идентичен особенностям гумусового состояния. Самые высокие Сгк./Сфк. были у почв с максимальным значением содержания гумуса. Общей закономерностью является высокая степень гумификации органического вещества почв. Доля гуминовых кислот от общего Сорг. составляет 45,9... 61,3 %.

Одной из причин высокого содержания гуминовых кислот может служить реакция среды черноземов. Изменение рН водной вытяжки в нейтральную или щелочную сторону приводит к накоплению гумусовых веществ, преимущественно гуматного типа [12]. В свою очередь повышенная карбонатность черноземов вызывает синтез гуматов кальция [1].

Анализ содержания гумина позволяет выявить одну общую закономерность: уменьшение его доли на пахотных участках. Минимальное количество характерно для пашни водоразделов – 0,91 % в составе общего содержания органического вещества (относительная доля 22,00 %). На эродированной пашне гумина 1,03 %, относительная доля повышается до 29,30 %. Максимально высоким содержанием этого вещества характеризовался чернозем под ЛП № 133 водораздельного участка – 1,57 % (31,80 % относительных). На склоне Сгум. несколько ниже – 1,26 и 1,36 % для ЛП № 133 и 140 соответственно. Повышенное содержание гумина связано с поступлением большего количества листового опада и характером гумусообразовательного процесса – он отличается от присущих пахотным угодьям. По мнению И. Кегель-Кнабнера [31], гумин в почвах под лесом состоит из полуразложившихся растительных остатков, гуминовые кислоты являются продуктом окисления гумина.

Закономерности изменения качественного состава гумуса верхнего слоя почвы нашли отражение и в гумусовом состоянии всего почвенного профиля. Установлено более высокое содержание гумуса в черноземах ЛП. На водораздельном участке ЛП № 133 количество гумуса изменялось от $8,56 \pm 0,18$ % (в слое почвы 0–20 см) до $4,97 \pm 0,22$ % на глубине 50–70 см (табл. 3). На смежно расположенном черноземе пашни абсолютные значения были ниже – от $7,14 \pm 0,24$ % (слой 0–20 см) до $4,05 \pm 0,80$ % (50–70 см).

Таблица 3

Гумусное состояние почв, %

| Слой почвы, см | ЛП № 133, склон | ЛП № 140 | ЛП № 133, пашня, склон | ЛП № 133, водораздел | ЛП № 133, пашня, водораздел |
|----------------|-----------------|-----------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 0–20 | 7,42±0,18 | 7,03±0,27 | 6,09±0,10 | 8,56±0,18 | 7,14±0,24 |
| 20–30 | 6,88±0,17 | 6,58±0,42 | 5,64±0,10 | 8,13±0,18 | 6,58±0,14 |
| 30–50 | 4,94±0,42 | 5,38±0,20 | 3,72±0,14 | 6,49±0,25 | 5,71±0,37 |
| 50–70 | 2,60±0,36 | 3,46±0,28 | 2,17±0,18 | 4,97±0,22 | 4,05±0,80 |

Склоновые почвы характеризовались меньшим содержанием гумуса. Его минимальное количество отмечено на пахотном участке – 6,09±0,10... 2,17±0,18 % по профилю почвы. Под пологом древесных культур, в нижних горизонтах, – 2,60±0,36...3,46±0,28 %.

В характере изменения профильного содержания гумуса необходимо отметить некоторые особенности. Для плакорных угодий свойственен более медленный тренд его снижения от верхних к нижним почвенным горизонтам. Разница между слоями 0–20 и 50–70 см составила 72,2–76,2 %. На склоновых элементах рельефа различия достигали 180,6–185,3 %. Исключением стала ЛП № 140, расположенная поперек склона. Она является своеобразным барьером, сдерживающим эрозионные процессы. Под ее влиянием увеличивается мощность гумусового горизонта и в конечном итоге содержание гумуса. На глубине 50–70 см его количество составило 3,46 %, что на 0,86–1,29 % выше по отношению к склону и пашне ЛП № 133. Древесные культуры обеспечивают больший объем растительных остатков в виде листового опада, миграцию гумусовых веществ по почвенному профилю и подвижность гумуса. Гумусовый профиль в этой связи приобретает отличительные черты, несвойственные пахотным угодьям. В черноземах пашни снижение содержания гумуса обусловлено усилением процессов минерализации гумуса и растительных остатков из-за ежегодной обработки почвы с оборотом пласта.

Важными компонентами, характеризующими состояние почвенной среды, являются физико-химические показатели плодородия. Посредством анализа наиболее заметные различия в гидrolитической кислотности (Нг) выявлены в гумусово-аккумулятивном горизонте (0–70 см). В нижележащих почвенных горизонтах (70–200 см) заметных и достоверных расхождений не установлено. Нг варьировала в основном в интервале 0,2–0,3 смоль (экв)/кг почвы (табл. 4).

Более высокие значения Нг для гумусово-аккумулятивного горизонта наблюдаются у черноземов лесных ценозов. На водораздельном участке под ЛП № 133 Нг изменялась по профилю от 4,26±0,06 до 1,96±0,47 смоль (экв)/кг, на склоне ЛП № 133 – от 4,91±0,84 до 2,55±0,35 смоль (экв)/кг. На смежных пахотных черноземах – от 1,88±0,28 до 0,93±0,59 и от 2,26±0,20 до 0,23±0,04 смоль (экв)/кг соответственно. Столь существенное различие объясняется характером поступающих на поверхность почвы органических остатков. В лесном ценозе листовая опад способствует изменению течения почвенных процессов и подкислению черноземов (влияние продуктов распада).

Таблица 4

Гидролитическая кислотность, смоль (экв)/кг

| Слой почвы, см | ЛП № 133, склон | ЛП № 140, склон | ЛП № 133, пашня, склон | ЛП № 133, водораздел | ЛП № 133, пашня, водораздел |
|----------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 0–20 | 3,79±1,12 | 2,26±0,29 | 2,26±0,20 | 4,26±0,06 | 1,88±0,28 |
| 20–30 | 4,91±0,84 | 2,44±0,66 | 2,53±0,10 | 4,44±0,31 | 2,01±0,20 |
| 30–50 | 4,25±0,36 | 1,62±0,80 | 0,70±0,06 | 3,51±0,44 | 1,80±0,17 |
| 50–70 | 2,55±0,35 | 0,92±0,70 | 0,23±0,04 | 1,96±0,47 | 0,93±0,59 |
| 70–100 | 0,34±0,06 | 0,23±0,01 | 0,23±0,05 | 0,44±0,06 | 0,23±0,01 |
| 100–120 | 0,24±0,02 | 0,29±0,06 | 0,23±0,03 | 0,23±0,01 | 0,23±0,01 |
| 120–150 | 0,23±0,02 | 0,29±0,06 | 0,23±0,02 | 0,23±0,01 | 0,23±0,01 |
| 150–170 | 0,21±0,02 | 0,29±0,06 | 0,23±0,02 | 0,23±0,01 | 0,23±0,01 |
| 170–200 | 0,25±0,02 | 0,23±0,01 | 0,11±0,01 | 0,23±0,01 | 0,23±0,01 |

Актуальная кислотность черноземов имела особенности, определяемые характером использования угодий и произрастающей на них растительностью. Анализ показателей рН водной вытяжки позволил отметить два основных момента: все почвы характеризуются нейтральной реакцией среды с поверхности, реакция переходит в щелочную в карбонатно-аккумулятивном горизонте; различен характер профильного изменения актуальной кислотности. В верхнем слое почвы 0–20 см значение рН вод варьиовало в незначительных пределах – 6,69±0,09...7,30±0,09 (табл. 5). В черноземах лесных ценозов в нижележащих почвенных горизонтах (20–50 см) происходит смещение кислотности почвы до 6,47...6,70 ед. рН, что наиболее заметно на склоновом участке ЛП № 133. У черноземов пашни эта закономерность не выражена. Увеличение кислотности лесных почв обусловлено воздействием кислых продуктов распада лесной подстилки. На пахотных землях, несмотря на применение минеральных удобрений, смещения реакции среды черноземов нами не отмечено. В этом отношении роль лесной подстилки была выражена более отчетливо.

В карбонатных горизонтах почвы значения актуальной кислотности были существенно сдвинуты в щелочную сторону. На глубине ниже гумусового слоя рН водной вытяжки изменялся в пределах от 7,86 до 8,72. Причиной стало подтягивание к поверхности среднеминерализованных грунтовых вод, что подтверждают проведенные нами исследования [22].

Анализ показателей рН солевой вытяжки (табл. 5) указывает на изменение кислотности черноземов под лесным ценозом до средне- и слабокислой степени по существующей классификации [9]. Такие особенности отмечены под ЛП № 133 по всей толще гумусово-аккумулятивного горизонта. В нижележащих карбонатно-аккумулятивных горизонтах зафиксирован резкий скачок смещения реакции среды в щелочную сторону. По всем объектам исследований на глубине 70–200 см рН солевой вытяжки варьировал в интервале 7,32...7,84.

Таблица 5

Значения реакции среды

| Слой почвы, см | ЛП № 133, склон | ЛП № 140, склон | ЛП № 133, пашня, склон | ЛП № 133, водораздел | ЛП № 133, пашня, водораздел |
|----------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| pH_{H_2O} | | | | | |
| 0–20 | 7,01±0,20 | 7,06±0,07 | 7,02±0,09 | 6,69±0,09 | 7,30±0,09 |
| 20–30 | 6,50±0,12 | 6,93±0,11 | 6,83±0,11 | 6,55±0,07 | 7,24±0,12 |
| 30–50 | 6,47±0,06 | 7,31±0,24 | 7,69±0,11 | 6,70±0,09 | 7,23±0,12 |
| 50–70 | 6,83±0,14 | 7,72±0,32 | 8,34±0,14 | 7,30±0,21 | 7,68±0,41 |
| 70–100 | 7,86±0,19 | 8,16±0,08 | 8,50±0,14 | 8,04±0,14 | 8,31±0,03 |
| 100–120 | 8,29±0,08 | 8,34±0,03 | 8,72±0,18 | 8,40±0,04 | 8,33±0,05 |
| 120–150 | 8,40±0,01 | 8,46±0,06 | 8,42±0,12 | 8,42±0,05 | 8,44±0,03 |
| 150–170 | 8,41±0,05 | 8,45±0,05 | 8,57±0,11 | 8,41±0,10 | 8,33±0,03 |
| 170–200 | 8,47±0,07 | 8,43±0,06 | 8,65±0,12 | 8,49±0,15 | 8,43±0,16 |
| pH_{KCl} | | | | | |
| 0–20 | 6,15±0,20 | 6,45±0,12 | 6,25±0,11 | 6,13±0,12 | 6,62±0,14 |
| 20–30 | 5,61±0,18 | 6,33±0,25 | 5,90±0,12 | 5,87±0,09 | 6,54±0,14 |
| 30–50 | 5,41±0,12 | 6,74±0,42 | 7,14±0,10 | 5,88±0,14 | 6,34±0,09 |
| 50–70 | 5,62±0,25 | 7,03±0,48 | 7,52±0,23 | 6,45±0,28 | 6,46±0,46 |
| 70–100 | 7,32±0,06 | 7,47±0,09 | 7,59±0,18 | 7,34±0,06 | 7,47±0,01 |
| 100–120 | 7,46±0,05 | 7,53±0,04 | 7,63±0,14 | 7,51±0,02 | 7,50±0,01 |
| 120–150 | 7,51±0,04 | 7,56±0,04 | 7,61±0,18 | 7,56±0,02 | 7,45±0,06 |
| 150–170 | 7,52±0,04 | 7,56±0,06 | 7,68±0,11 | 7,58±0,02 | 7,51±0,04 |
| 170–200 | 7,48±0,02 | 7,54±0,06 | 7,84±0,15 | 7,61±0,03 | 7,50±0,02 |

Важной частью физико-химических показателей почв является состав обменных катионов черноземов. Содержание обменного Са достигало наибольшего значения в верхних горизонтах черноземов. Каких-либо явных различий установить не удалось. Можно лишь отметить слабовыраженную тенденцию к увеличению количества Са под ЛП. Некоторое его снижение в пахотных почвах связано с ежегодным отчуждением с поля зерновой и вегетативной части урожая (под пологом ЛП остается листовая опад богатый зольными элементами). Профильное распределение обменного Са характеризовалось постепенным уменьшением в гумусово-аккумулятивном горизонте, при переходе в карбонатные горизонты оно было еще более заметно.

Большее содержание обменного Mg отмечено в почвах лесных ценозов. Особенно отчетливо данная закономерность прослеживается на водоразделе. Высокое соотношение обменного кальция к магнию зафиксировано на всех участках. В верхних горизонтах вариация составила 4,61...6,40 (табл. 6). В карбонатных горизонтах, особенно в эродированных почвах, содержание Mg заметно увеличивалось.

Таблица 6

Состав обменных катионов, смоль (экв)/кг

| Слой почвы, см | ЛП № 133, склон | ЛП № 140, склон | ЛП № 133, пашня, склон | ЛП № 133, водораздел | ЛП № 133, пашня, водораздел |
|----------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| <i>Ca</i> | | | | | |
| 0–20 | 26,9±1,52 | 29,5±1,30 | 28,0±0,92 | 27,4±0,89 | 24,8±1,21 |
| 20–30 | 25,0±1,88 | 26,1±0,50 | 25,6±0,63 | 29,1±1,73 | 26,5±0,89 |
| 30–50 | 23,1±1,84 | 28,4±1,45 | 27,5±0,69 | 26,3±0,68 | 24,2±1,20 |
| 50–70 | 22,9±1,43 | 26,3±1,88 | 26,8±0,59 | 26,4±0,82 | 23,8±1,78 |
| 70–100 | 22,5±1,00 | 22,4±2,81 | 21,3±0,39 | 26,1±1,10 | 23,0±1,20 |
| 100–120 | 20,4±0,06 | 19,4±1,64 | 20,0±0,32 | 20,8±0,50 | 20,8±0,13 |
| 120–150 | 20,2±1,28 | 17,2±0,94 | 16,1±0,98 | 19,4±1,08 | 20,8±0,35 |
| 150–170 | 17,4±1,24 | 17,9±1,66 | 12,0±0,45 | 18,4±1,46 | 20,6±0,52 |
| 170–200 | 18,4±2,33 | 17,4±2,15 | 8,5±0,22 | 17,2±1,50 | 19,6±1,15 |
| <i>Mg</i> | | | | | |
| 0–20 | 5,2±0,47 | 4,6±0,37 | 4,7±0,43 | 6,3±0,16 | 4,1±0,09 |
| 20–30 | 5,0±0,64 | 4,8±0,34 | 5,1±0,56 | 6,3±0,47 | 5,1±0,29 |
| 30–50 | 4,6±0,59 | 4,1±0,79 | 4,7±0,36 | 4,9±0,32 | 4,0±0,15 |
| 50–70 | 4,1±0,53 | 4,0±0,42 | 4,6±0,29 | 4,0±0,24 | 3,6±0,35 |
| 70–100 | 4,2±0,46 | 4,2±0,43 | 10,5±0,65 | 4,5±0,25 | 4,1±0,91 |
| 100–120 | 4,4±0,51 | 6,4±1,37 | 12,6±0,95 | 4,9±0,34 | 3,9±0,35 |
| 120–150 | 5,8±0,46 | 6,9±1,38 | 12,0±0,89 | 6,9±0,49 | 5,1±0,49 |
| 150–170 | 5,4±0,56 | 8,4±1,61 | 8,2±0,54 | 9,4±0,63 | 5,8±0,35 |
| 170–200 | 5,9±0,68 | 8,4±1,18 | 5,3±0,16 | 10,0±0,48 | 5,6±0,76 |

Выводы

1. Интенсивные работы по созданию лесных почвоохранных насаждений в степных регионах европейской части России, проведенные во второй половине прошлого столетия, показали, что искусственные лесные полосы положительно влияют на морфологические признаки черноземных почв, способствуют повышению мощности генетических горизонтов и содержания гумуса. Необходимо дальнейшее проведение работ по облесению современных агроландшафтов и мероприятий, направленных на сохранение имеющихся лесных полос.

2. У фракционного состава гумуса черноземов есть свои особенности, связанные с характером использования угодий. Эти почвы имеют гуматный тип гумуса, что связано с высокой карбонатностью и образованием гумата кальция. В черноземах лесных насаждений гумусовые вещества характеризуются миграцией в более глубокие слои почвенного профиля. Абсолютные величины фракций гуминовых кислот и фульвокислот, а также гумина черноземов лесных полос превышают данные показатели для почв пахотных угодий. Причем максимальные значения характерны для водораздельных участков.

3. Влияние лесных полос на показатели реакции среды отмечается только в гумусово-аккумулятивном горизонте до глубины 50–70 см. Гидролитическая кислотность черноземов под лесной полосой доходила до 4,91 смоль (экв)/кг, на пашне не превышала 2,5 смоль (экв)/кг. Гумусовый профиль под лесными полосами характеризуется средне- и слабокислой реакцией среды.

4. У черноземов, использовавшихся неодинаково, не удалось обнаружить существенной разницы в составе обменно-поглощенных катионов. Отмечается тенденция повышения доли обменного кальция под лесным ценозом. Наряду с этим значительна доля магния в карбонатном горизонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безуглова О.С. Гумусное состояние почв юга России / Ростов. гос. ун-т. Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2001. 224 с. Bezuglova O.S. *Humus State of Soils in the South of Russia*. Rostov-on-Don, SKNTs VSh Publ., 2001. 224 p.

2. Брескина Г.М., Чуян Н.А. Структура запасов энергии и экологическая емкость агроэкосистем агроландшафта // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности. Краснодар: КубГАУ, 2018. С. 61–63. Breskina G.V., Chuyan N.A. Structure of Stocks of Energy and Ecological Capacity of Agroecosystems of the Agrolandscape. *Environmental Problems of Development of Agrolandscapes and Ways of Increase in Their Efficiency*. Krasnodar, KubSAU Publ., 2018, pp. 61–63.

3. Вавин В.С., Рымарь В.Т., Ахтямов А.Г., Свиридов Л.Т. Создание долговечных защитных лесных насаждений в условиях юго-востока ЦЧЗ: моногр. Воронеж: ВГЛТА, 2007. 240 с. Vavin V.S., Rymar' V.T., Akhtyamov A.G., Sviridov L.T. *Creation of Long-Lived Protective Forest Plantations in the South-East of the Central Black Earth Region: Monograph*. Voronezh, VGLTA Publ., 2007. 240 p.

4. Гостев А.В., Пыхтин И.Г., Нитченко Л.Б., Плотников В.А., Пыхтин А.И. Система оценки экологической сбалансированности агроландшафта и степени соответствия используемой в нем системы земледелия // Земледелие. 2017. № 8. С. 3–7. Gostev A.V., Pykhtin I.G., Nitchenko L.B., Plotnikov V.A., Pykhtin A.I. Evaluation System of Ecological Balance in an Agricultural Landscape and the Degree of Conformity to the Used Farming System. *Zemledelie*, 2017, no. 8, pp. 3–7.

5. Казакова А.И., Семиколенных А.А., Горнов А.В., Горнова М.В., Лукина Н.В. Влияние растительности на лабильные характеристики лесных почв задровых местностей заповедника «Брянский лес» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2018. № 3. С. 9–15. Kazakova A.I., Semikolennykh A.A., Gornov A.V., Gornova M.V., Lukina N.V. Influence of Vegetation on Lability Characteristics of Soils of Zander Locations of Bryansky Forest Nature Reserve. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye* [Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science], 2018, no. 3, pp. 9–15.

6. Когут Б.М. Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1998. № 7. С. 794–802. Kogut B.M. Transformation of Humus Status in Cultivated Chernozems. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1998, no. 7, pp. 794–802.

7. Копцик Г.Н., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С. Пространственная изменчивость эмиссии диоксида углерода в основных типах лесных экосистем Звенигородской биостанции МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2018. № 2. С. 40–47. Koptsik G.N., Kupriyanova Yu.V., Kadulin M.S. Spatial Variability of Carbon Dioxide Emission by Soils in Main Types of Forest Ecosystems in Zvenigorod Biological Station of Moscow State University. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17.*

Pochvovedeniye [Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science], 2018, no. 2, pp. 40–47.

8. Лукина Н.В., Орлова М.А., Бахмет О.Н., Тихонова Е.В., Тебенькова Д.Н., Казакова А.И., Крышень А.М., Горнов А.В., Смирнов В.Э., Шашков М.П., Ершов В.В., Князева С.В. Влияние растительности на характеристики лесных почв Республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827–842. Lukina N.V., Orlova M.A., Bakhmet O.N., Tikhonova E.V., Tebenkova D.N., Kasakova A.I., Kryshen A.M., Gornov A.V., Smirnov V.E., Shashkov M.P., Ershov V.V., Knyaseva S.V. Influence of Vegetation on Forest Soils Properties in the Republic of Karelia. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2019, no. 7, pp. 827–842. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050071>

9. Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Яковлев А.С., Булгаков Д.С., Макаров О.А. Отечественные подходы к оценке деградации почв и земель // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1394–1406. Molchanov E.N., Savin I.Y., Bulgakov D.S., Yakovlev A.S., Makarov O.A. National Approaches to Evaluation of the Degree of Soil Degradation. *Pochvovedeniye* [Eurasian Soil Science], 2015, no. 11, pp. 1394–1406. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15110118>

10. Орлов Д.С., Гришина Л.А., Ерошичева Н.Л. Практикум по биохимии гумуса. М.: МГУ, 1969. 157 с. Orlov D.S., Grishina L.A., Eroshicheva N.L. *Workshop on the Biochemistry of Humus*. Moscow, MGU Publ., 1969. 157 p.

11. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Реальные и кажущиеся потери органического вещества почвами Российской Федерации // Почвоведение. 1996. № 2. С. 197–207. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. Real and Apparent Losses of Organic Matter by the Soils of the Russian Federation. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1996, no. 2, pp. 197–207.

12. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. Revised System of the Humus Status Parameters of Soils and Their Genetic Horizons. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2004, no. 8, pp. 918–926.

13. Поляков Д.Г., Бакиров Ф.Г., Халин А.В., Нестеренко Ю.М. Трансформация солевого профиля чернозема южного под влиянием способов основной обработки почвы // Бюл. Оренбург. науч. центра УрО РАН (электрон. журн.). 2017. № 2. С. 6. Polyakov D.G., Bakirov F.G., Halin A.V., Nesterenko Yu.M. Dynamics of Humidity of Southern Chernozems of the Orenburg Region when Applying Plowing and No-Till. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2017, no. 2, p. 6.

14. Примаков Н.В. Состояние лесных фитоценозов склоновых земель Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 55–63. Primakov N.V. Condition of the Slope Land Forest Phytocenosis in Krasnodar Krai. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.55>

15. Приходько В.Е., Чевердин Ю.И., Титова Т.В. Изменение форм органического вещества черноземов Каменной Степи при разном использовании, местоположении и увеличении степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1494–1504. Prikhod'ko V.E., Cheverdin Y.I., Titova T.V. Changes in the Organic Matter Forms in Chernozems of the Kamennaya Steppe under Different Land Uses, Locations, and Hydromorphism Degrees. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2013, no. 12, pp. 1494–1504. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X13120095>

16. Пыхтин И.Г., Дубовик Д.В., Айдиев А.Я. Текущие проблемы в земледелии // Земледелие. 2018. № 5. С. 8–11. Pykhtin I.G., Dubovik D.V., Aldlev A.Ya. Current Prob-

lems of Agriculture. *Zemledelie*, 2018, no. 5, pp. 8–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10502>

17. Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243. Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova A.A. Dynamics of Soil Properties and Carbon Stocks Structure in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Forest Restoration. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2020, no. 2, pp. 230–243. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020100>

18. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с. Semenov V.M., Kogut B.M. *Soil Organic Matter*. Moscow, GEOS Publ., 2015. 233 p.

19. Тунякин В.Д., Вавин В.С., Рыбалкина Н.В. Новое о лесообразовательном процессе в лесных полосах Каменной Степи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 89–100. Tunyakin V.D., Vavin V.S., Rybalkina N.V. Recent Trends of Forest Formation in Forest Strips of the Kamennaya Steppe. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.89>

20. Уваров Г.И. Экологические функции почв. СПб.: Лань, 2018. 296 с. Uvarov G.I. *Ecological Functions of Soils*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2018. 296 p.

21. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Почвы Каменной Степи от времени В.В. Докучаева до наших дней // Живые и биокостные системы. 2016. № 16. С. 2. Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I. Soils of Kamennaya Steppe from the Days of V.V. Dokuchaev till Nowadays. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*, 2016, no. 16, p. 2.

22. Чевердин Ю.И. Изменения свойств почв юго-востока Центрального Черноземья под влиянием антропогенного воздействия: моногр. Воронеж: Истоки, 2013. 336 с. Cheverdin Yu.I. *Changes in Soil Properties in the Southeast of the Central Chernozem Region under the Anthropogenic Influence: Monograph*. Voronezh, Istoki Publ., 2013. 336 p.

23. Чеканышкин А.С., Лепёхин А.А. Состояние защитного лесоразведения в Центрально-Черноземной зоне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 4. С. 9–17. Chekanyshkin A.S., Lepyohin A.A. Condition of Protective Afforestation in Central Black Earth Territories. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 4, pp. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.4.9>

24. Чендев Ю.Г., Беспалова Е.С. Оценка роли лесополос в оптимизации почв и ландшафтов: литературный обзор сведений // Науч. вед. БелГУ. Сер.: Естеств. науки. 2019. Т. 43, № 2. С. 124–133. Chendev Yu.G., Bepalova E.S. Assessment of the Role of Shelterbelts in Optimization of Soils and Landscapes: Literature Review of Information. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series], 2019, vol. 43, no. 2, pp. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-2-124-133>

25. Шаповалов Д.А., Королева П.В., Долинина Е.А., Рухович Д.И. Оценка влияния переувлажнения на смену типов землепользования пахотных земель Тамбовской области в 1968–2018 годах методами ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова // Науч. вед. БелГУ. Сер.: Естеств. науки. 2018. Т. 42, № 3. С. 358–379. Shapovalov D.A., Koroleva P.V., Dolinina E.A., Rukhovich D.I. Assessment of Waterlogging on the Change of Types of Land Use of Arable Land of the Tambov Region in 1968–2018 by Methods of Retrospective Monitoring of the Soil-Land Cover. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Belgorod State Univer-

sity Scientific Bulletin. Natural Sciences Series], 2018, vol. 42, no. 3, pp. 358–379. DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-3-358-379>

26. Bazikina G.S., Ovechkin S.V. The Influence of Climate Cycles on the Water Regime and Carbonate Profile in Chernozems of Central European Russia and Adjacent Territories. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, iss. 4, pp. 437–449. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229316040025>

27. Chendev Yu.G., Sauer T.J., Gennadiev A.N., Novykh L.L., Petin A.N., Petina V.I., Zazdravnykh E.A., Burras C.L. Accumulation of Organic Carbon in Chernozems (Mollisols) under Shelterbelts in Russia and the United States. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, iss. 1, pp. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315010032>

28. Collins H.P., Elliot E.T., Paustian K., Bundy L.G., Dick W.A., Huggins D.R., Smucker A.J.M., Paul E.A. Soil Carbon Pools and Fluxes in Long-Term Corn Belt Agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, vol. 32, iss. 2, pp. 157–168. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00136-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00136-4)

29. Karabutov A.P., Tyutyunov S.I., Solovichenko V.D. Humus Status of Typical Black Soil under Different Intensity of Arable Land Usage. *Eurasian Journal of BioSciences*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 1317–1321.

30. Karabutov A.P., Tyutyunov S.I., Solovichenko V.D. Biologization – Strategic Basis of the Agriculture in the Central Black Soil Region of the Russian Federation. *Eurasian Journal of BioSciences*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 1427–1432.

31. Kögel-Knabner I., Zech W., Hatcher P.G. Chemical Composition of the Organic Matter in Forest Soils: The Humus Layer. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1988, vol. 151, iss. 5, pp. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.19881510512>

32. Sauer T.J., Nelson M.P. Science, Ethics, and the Historical Roots of Our Ecological Crisis: Was White Right? *Sustaining Soil Productivity in Response to Global Climate Change: Science, Policy, and Ethics*. Chichester, UK, Wiley-Blackwell, 2011, pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470960257.ch1>



УДК: 630*311(470.1/2)

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116

METHODS OF PROTECTION FOREST SOILS DURING LOGGING OPERATIONS (REVIEW)

*Aleksey S. Ilintsev*¹, *Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: N-6286-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

*Elena N. Nakvasina*², *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: A-5165-2013,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Lars Högbo^{3,4}, *PhD, Associated Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6914-2897>*

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: a.ilintsev@narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

³Skogforsk – The Forestry Research Institute of Sweden, Uppsala Science Park, Uppsala, SE-751 83, Sweden; e-mail: lars.hogbom@skogforsk.se

⁴Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 901 03, Sweden; e-mail: lars.hogbom@slu.se

Review article / Received on March 1, 2020 / Accepted on May 10, 2020

Abstract. Public opinion has become increasingly critical of current logging methods and technologies, and there is a demand for standards to guide the operations of environmentally impactful industries. For many years, numerous researchers have studied the impact of logging on forest soils, revealing that there is a high risk of damaging forest soil during forest operations and terrain transport. Here we analyse and review a total of 105 publications in this area. This large body of work demonstrates the scientific interest that this field has attracted. Despite this, important areas of uncertainty concerning the impact of forest harvesting still remain. In particular, changes in soil conditions can affect soil properties in ways that are not well understood, with possible impacts on the physical, chemical, and biological properties of soils as well as the structure of the soil cover. While it is difficult to fully eliminate the negative impact of forest operations on forest soils, their adverse environmental consequences should be minimised because soil plays a vital role in tree regeneration and helps determine the productivity of future forest stands. Some of the most frequently cited measures and effective technological solutions to minimize damage to forest soils involve taking terrain and different technical solutions into account when organising logging operations. Potentially helpful technical solutions include selecting machines and mechanisms suitable for the site conditions, using larger and/or low-pressure tyres, using tyre pressure control, using anti-skid tracks, using track belts, meliorating wet areas, and using logging machinery incorporating global positioning systems and geographic information systems. Planning measures that can help minimize soil damage include choosing a suitable wood harvesting system and technology, accounting for seasonal factors when planning logging operations, planning networks of roads and trails in advance, leaving wood residues or mats on soil surface, training forest specialists, and reducing the number of machine passes over skid trails and strip roads.

Despite active interest in applying sparing methods of wood harvesting, uptake of measures designed to reduce negative impacts on forest soils after logging has been limited. This may be due to a lack of scientific and technical information and the high cost of implementing best management practices. Moreover, economic factors and production plans may require wood harvesting throughout the year, irrespective of conditions.

For citation: Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 92–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the project “Patterns of Changes in the Forest Site Environment under the Influence of Anthropogenic Factors (Logging) in the Boreal Forests of the North” No. MK-2622.2021.5. Part of the research was carried out within the framework of the state assignment of the Northern Research Institute of Forestry (No. 121020500252-6).

Keywords: forest ecosystems, soil, anthropogenic load, logging, forest machinery, ecological consequences, progressive succession, best practices.

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫХ ПОЧВ В ХОДЕ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ (ОБЗОР)

*А.С. Ильинцев*¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID:* [N-6286-2019](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

*Е.Н. Наквасина*², д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID:* [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Л. Хогбом^{3,4}, PhD, доц.; *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6914-2897>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: a.ilintsev@narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

³Научно-исследовательский институт лесного хозяйства Швеции, Научный парк Уппсала, г. Уппсала, Швеция, SE-751 83; e-mail: lars.hogbom@skogforsk.se

⁴Шведский университет сельскохозяйственных наук, г. Умео, Швеция, 901 03; e-mail: lars.hogbom@slu.se

Обзорная статья / Поступила в редакцию 01.03.20 / Принята к печати 10.05.20

Аннотация. Отношение общественности к вопросу экологичности лесозаготовительных методов и технологий заготовки древесины становится все более критичным. Анализ 105 публикаций, включенных в данный обзор, показывает, что подобные исследования вызывают интерес у ученых всего мира. За длительный период изучения обозначенной проблемы накопилось много работ о влиянии рубок леса на лесные почвы. Однако, как отмечают специалисты, эти знания еще не являются полными. На вырубках вследствие движения машин во время выполнения технологических операций появляются различные повреждения грунта. Изменения условий почвообразования в той или иной степени отражаются на всех свойствах почвы: физических, химических и биологических – а также на структуре почвенного покрова. Полностью исключить воздействие лесозаготовительной техники на лесные почвы невозможно, но свести к минимуму необходимо. Наиболее часто указываемые и эффективные технологические решения по ограничению негативных последствий прохода лесной техники это: проведение лесозаготовительных работ с учетом природных факторов; выбор систе-

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

мы заготовки древесины; планирование сезона лесозаготовок, методов лесосечных работ, технологической сети; оставление порубочных остатков на поверхности почвы; дополнительное обучение специалистов, работающих в лесу; подбор системы машин и механизмов; снижение количества проездов техники по технологическим волокам; использование шин большего размера и низкого давления, системы управления давлением в шинах; применение цепей противоскольжения, гусеничных лент; проведение мелиорации влажных участков; установка систем GPS и GIS в лесозаготовительной технике. Несмотря на активный интерес к щадящим методам заготовки древесины, меры, направленные на сохранение лесных почв после осуществления лесозаготовительных работ, приняты в недостаточном объеме. Причинами могут быть неполнота научно-технической информации и высокая стоимость внедрения передовой практики управления. Кроме того, экономические факторы и производственные планы требуют заготовки древесины в течение всего года и не принимают в расчет неблагоприятные погодные условия.

Для цитирования: Pintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 92–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта МК-2622.2021.5 «Закономерности изменения лесорастительной среды под влиянием антропогенных факторов (рубок леса) в бореальных лесах Севера». Часть исследования проведена в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» (№ 121020500252-6).

Ключевые слова: лесные экосистемы, почва, антропогенная нагрузка, рубки леса, лесозаготовительная техника, экологические последствия, восстановительная сукцессия, лучшие практики.

Introduction

Forestry management and forest operations have become controversial due to fundamental differences in the ways different segments of society view forest resources. Public attitudes towards forest management and logging technologies have become more critical, and there is a growing demand for environmentally impactful industries to act in accordance with the standards of organisations such as the Forest Stewardship Council (FSC) or Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC). It is therefore important to account for environmental concerns during logging activities, not least those relating to effects on soil and water [15]. Forest soils are vital for ecosystem productivity and the sustainability of ecosystem services [10, 41, 98].

The use of heavy logging machines (e.g. harvesters, fellers, skidders, and forwarders) during logging operations presents a high risk of damaging the soil surface. The masses of forest machines range from 5–40 t [24, 46], and these masses exert direct pressure on the soil surface in contact with the machine. Soil surface damage occurs when the specific pressure of the active system of machines exceeds the soil's load-bearing capacity. According to Cambi et al. [15], the use of powerful and heavy machines in forestry has increased exponentially in recent decades. Additionally, not all machines used in logging operations meet environmental requirements; most logging enterprises in Russia today have out-dated fleets of logging machines [73].

The impact of logging on the properties of forest soils has been studied for many years. Despite this, both Russian scientists [19, 82] and researchers from other countries [15, 63] have noted that our understanding of the impact of logging on soils

is incomplete for two reasons: the technology and techniques of logging operations are changing and the impact of logging operations is being affected by climate change and abnormal weather conditions [87].

Sustainable forest management and ways of reducing the impact of logging have attracted growing interest in recent years, prompting efforts to develop sparing (nature-saving) methods of logging, design new logging machines, and revise the technological processes used in forestry [37].

While the impact of logging equipment on forest soils cannot be completely eliminated, there are ways to limit it [63]. Accordingly, various solutions have been proposed to limit or minimise the impact of logging machinery on forest ecosystems. Successful implementation of any solution will require deep knowledge and understanding of several topics relevant to logging activities and their impact (including forest soil science, plant physiology, forest ecology, silviculture, and machines and mechanisms) in order to calibrate measures based on the durability of the forest environment and its susceptibility to damage. Decisions about what logging equipment and technology to use should be based on detailed knowledge of the soil properties in the forest to be logged and an assessment of environmental risks.

This article reviews the literature on preventing or limiting negative impacts of mechanised logging on soil in order to provide guidance on minimising the negative impact of logging machinery on soil and thereby promote sustainable forest management.

Prerequisites for reducing the impact of logging on the soils

The historical progress of logging technology can be divided into four stages. This section briefly reviews the equipment and methods used during logging operations in each stage as well as their impact on forest soils [97].

The first stage (from the 15th to the early 20th century) is associated with the exploitation of the European North of Russia [99], during which key forestry activities included salt-making, the production of charcoal and tar, and household wood harvesting. Throughout this period, logging was done exclusively by hand in winter, and wood removal (skidding) was done by horse-drawn transport over short distances. Axes and saws were the main tools for felling trees, and logging was performed according to a simple selective strategy without territorial restrictions. The combination of winter logging and horse skidding helped to preserve the forest environment and minimise adverse impacts on the soil.

The second stage (1930–1970) is associated with the early development of the logging industry and the introduction of mechanized skidders such as the S-60, KT-12, S-80, TL-3, TDT-4, and TT-4 models [97]. Forced-selective and narrow-cut logging strategies were replaced by the cut block approach. Haphazard skidding over huge cutting areas contributed to changes in breed composition and worsened the environmental conditions of the resulting cuttings. In the Nordic countries (particularly in Sweden), forestry machines were introduced on a large scale in the 1960s [26]. Since then, soil damage has become a significant problem worldwide [23]. Machines such as agricultural tractors were used for many tasks during logging operations, including harvesting and hauling wood. However, they were often unsuitable for these purposes [102].

During the third stage (which began in 1970), heavy machines for domestic production were introduced. The appearance of machines such as feller-bunchers (e.g. the Timberjack 850, LP-19), the VTM-4 felling-skidding machine and the LP-18 and LT-154 lockless skidders increased labour productivity but also caused significant damage to the top soil. When developing LP-19 cutting areas, skid trails were not defined in advance, trees were skidded forward, and the cutting areas were completely covered by skid trails because of the limited reach of the machine's hydraulic manipulator [86]. The resulting environmental damage clearly demonstrated the challenges of preserving the forest environment during logging. The machines used in most cases did not meet environmental requirements and exerted specific pressures significantly greater than 50 kPa on the soil [37].

Pobedinskiy [79] and Gusev et al. [37] noted that in some cases, the changes in the forest environment caused by logging operations using forest machines are more significant than those associated with forest removal.

The fourth stage is the present and near future. New systems of machines for logging (harvesters and forwarders) have been introduced and begun replacing felling and bunching machines, but this has not been a positive change in terms of soil conservation [24, 97]. One way to overcome the problems caused by forest machines is to use smaller and more manoeuvrable tractors and multi-operation (combined) machines. In modern forestry there are specialised machines for almost all activities, including soil preparation, sowing, planting, care felling, thinning, and transportation. Modern machines are small and better suited for tasks such as thinning than those that were available in the early years of mechanisation [102]. In addition, new state-of-the-art machines and information tools are being introduced that can help reduce negative impacts on soils and increase the efficiency of logging machines.

Changes in soil properties after logging operations

Harvesting operations cause various forms of damage to the soil, including compaction, soil mixing, and the formation of turned-over, bared, and loosened sites. Such damage can lead to changes in biogeochemical cycles [15] and the development of hydrological shortcuts [86].

Changes in soil formation conditions affect all soil properties to some degree (table 1), including physical, chemical, and biological properties as well as the structure of the soil cover [19, 76, 80, 103, 105]. Many authors [2, 5, 11] have noted that compaction caused by forest operations is a major cause of soil degradation.

Changes in physical properties

The main effect of logging operations on soils is compaction, which can be quantified by measuring the soil's bulk density or hardness (resistance to penetration). It is believed that soil compaction caused by logging is most severe at a depth of 10 cm, with less pronounced effects at 20 cm and 30 cm [2]. For example, noticeable changes in physical properties are observed at portages to depths of 50–60 cm and at landing sites to a depth of 90 cm [20, 45]. Changes in the density of the soil and the associated effects on air, heat, and water regimes affect soil organisms and plants and can also have negative effects on the ecological state of soils and future forest productivity [15, 52, 68].

Table 1

Effects of logging operations on the soil cover

| Type and direction of the impact | Authors |
|--|---|
| <i>Structure of the soil cover</i> | |
| Mixing and removing horizons ≈ ≠ | Kozlowski, 1999 [52]; Melekhov, 2003 [69]; Dymov, Lapteva, 2006 [20] |
| Rut formation ↓ ↔ ≠ | Jansson, Johansson, 1998 [45]; Lacey, Ryan, 2000 [56]; Eliasson, 2005 [24]; Dymov, Lapteva, 2006 [20]; Eliasson, Wästerlund, 2007 [25]; Gerasimov, Katarov, 2010 [33]; Katarov et al., 2013 [50]; Marchi et al., 2014 [64]; Cambi et al., 2015 [15]; Goltsev et al., 2011 [35]; Sirén et al., 2019 [87]; Garren et al., 2019 [31]; Ilintsev et al., 2020 [42] |
| <i>Physical properties of the soils</i> | |
| Compaction ↓ ↔ | Seryy et al., 1991 [86]; Jansson, Johansson, 1998 [45]; Kozlowski, 1999 [52]; Brais, 2001 [11]; Šušnjar et al., 2006 [93]; Dymov, Lapteva, 2006 [20]; Akay et al., 2007 [2]; Magnusson, 2009 [62]; Gerasimov, Katarov, 2010 [33]; Frey et al., 2009 [30]; Bagheri et al., 2011 [5]; Goltsev et al., 2011 [35]; Pobedinskiy, 2013 [79]; Bottinelli et al., 2014 [9]; Cambi et al., 2015 [15]; Ilintsev et al., 2020 [42]; Mariotti et al., 2020 [66] |
| Water-air regime ↓ ↔ | Seryy et al., 1991 [86]; Wronski, Murphy, 1994 [104]; Kozlowski, 1999 [52]; McNabb et al., 2001 [68]; Magnusson, 2009 [62]; Han et al., 2006 [38]; Dymov, Lapteva, 2006 [20]; Cambi et al., 2015 [15] |
| Thermal condition ↑ ↔ | Arnup, 1998 [4]; Dymov, Startsev, 2016 [22] |
| <i>Chemical properties of the soils</i> | |
| Nutritional regime and biogeochemical cycles ↓ ↔ | Worrell, Hampson 1997 [103]; Zetterberg, 2013 [105]; Naghdi et al. 2016 [75]; Modry, Hubeny, 2003 [71]; Hume et al, 2017 [41]; Cambi et al., 2017 [16]; Ilintsev et al., 2018 [43]; Ilintsev et al., 2020 [42] |
| Balance and composition of organic matter ↓ ↔ | Fedchenko, 1962 [27]; Varfolomeev, 1964 [100]; Fedorets, Bakhmet, 2003 [29]; McLaughlin, Phillips, 2006 [67]; Dymov, Lapteva, 2006 [20]; Sah, Ilvesniemi, 2007 [84]; Vedrova et al., 2010 [101]; Osman, 2013 [76]; Dymov, Milanovskii, 2014 [21]; Dymov, 2017 [19]; Dolgaya, Bakhmet, 2021 [18] |
| Soil acidity ↓ ↔ | Seryy et al., 1991 [86]; Brandtberg, Olsson, 2012 [12]; Dymov, Milanovskii, 2014 [21]; Achat et al., 2015 [1]; Ilintsev et al., 2018 [43] |
| <i>Biological properties of the soils</i> | |
| Composition and activity of soil organisms ↓ ↔ | Seryy et al., 1991 [86]; Li et al., 2004 [60]; Battigelli et al., 2004 [6]; Mariani et al., 2006 [65]; Frey et al., 2009 [30]; Beylich et al., 2010 [7]; Blasi et al., 2013 [8]; Bottinelli et al., 2014 [9]; Cambi et al., 2015 [15]; Dymov, Startsev, 2016 [22] |
| <i>Regeneration conditions</i> | |
| Seed germination and plant growth ≈ ↔ | Sokolovskaya et al., 1977 [88]; Seryy et al., 1991 [86]; Dymov, Lapteva, 2006 [20]; Šušnjar et al. 2006 [93]; Karpechko, 2008 [48]; Gebauer et al., 2012 [32]; Hattori et al., 2013 [39]; Fedorenchik et al., 2013 [28]; Cambi et al., 2017 [16]; Solgi et al., 2019 [90]; Ilintsev et al., 2020 [42] |

Note: Decline – ↓; unknown – ≈; improvement – ↑; recovery over time – ↔; persistent disturbances – ≠.

For example, a common cause of poor plant growth is a reduction in the levels of plant-available nutrients [9, 15, 30]. Increasing the bulk density of the soil reduces its pore size, water permeability, and gas exchange rates, which in turn reduces the available moisture content. All these factors affect root system formation and plant growth [66, 93].

An increase in the soil's water content implies a decrease in the friction forces between the soil particles, which reduces the load-bearing capacity of the soil [38, 68]. Studies by various authors have shown that restriction of nutrient and water access affects the germination rate, root mass, root length, and main stem height of plants [16, 48, 66, 89]. The negative effects of compaction of the upper soil horizons on root biomass have been observed over a 15-year period [48].

Soil compaction also changes the water-physical properties of the soil in clearings with heavy podzolic loamy and clay soils [79]. The compaction characteristics of a soil depend on its particle size, humidity, and organic matter content; some are stable, while others are less stable. Sandy loam and sandy soils are less compacted by logging machinery. The negative effect of soil bulk density depends on the soil's particle size distribution: the greater the abundance of large particles, the worse the impact of high bulk density on plant growth.

Studies on tree seedlings [86] show that the main mass of the roots of eight-year-old crops on skid trails is located at depths of up to 10 cm, and up to 14 cm in cutting strips. Additionally, spruce seedlings growing in the cutting strips have significantly more fine roots than those in the strips, and spruce seedlings growing on compacted soil exhibit reduced height and diameter growth as well as canopy development when compared to peers grown on non-compacted soil. The available data indicate that the compaction of sandy soils to densities of up to 1.5 g/cm³ during logging has a positive effect on the survival of seedlings following both sowing and planting. However, pine and spruce seedlings planted on compacted loamy soils exhibit low survival rates and poor growth, indicating a need to improve the physical properties of such soils by loosening before regeneration. Melekhov [69] notes that in some cases compaction and mixing of the soil's organic and mineral components can be very important for improving the growth of young plants. Loosening of fresh soils without compaction can reduce the capillary lift. Additionally, Dymov and Lapteva [20] conclude that removing the plant cover and the forest floor horizon reduces seed germination by 15–28 % because it disrupts the main organogenic horizon in podzolic soils, where significant reserves of energy and plant nutrition elements accumulate.

According to Sokolovskaya et al. [88], the germination of spruce seeds in loamy soils is clearly hindered when the soil density exceeds 1.45 g/cm³. The optimal soil bulk density for successful spruce growth was 1.15–1.28 g/cm³; compaction to densities of 1.30–1.34 g/cm³ and above reduced the growth rates of young seedlings. Similarly, Seryy et al. [86] found that the optimal bulk density for seedling growth is 1.0–1.3 g/cm³ and depends on the soil's particle size. For comparative purposes, the upper soil horizons (0–25 cm) on landing sites and main skid trails are compacted to 1.7–1.87 g/cm³. These bulk soil densities significantly exceed the critical compaction level of 1.4 g/cm³; above this threshold, the soil's ability to self-heal and recover its original density is weakened or completely lost. However, as reported by Kuznetsova and Danilova [53] each soil type has a distinct critical compaction threshold. Hattori et al. [39] also note that changes in soil bulk density can increase seedling mortality, while Fedorenchik et al. [28] found that root growth stops when the soil bulk density

exceeds 1.89 g/cm³ for oak, 1.84 g/cm³ for larch, 1.80 g/cm³ for birch, 1.72 g/cm³ for pine, 1.61 g/cm³ for spruce, and 1.55 g/cm³ for linden.

For blueberry-type spruce forests on loamy soils, the porosity of soil aeration at depths of 5–30 cm on technological portages can be as low as 1–2 % [86]. For comparative purposes, the average aeration porosity for loamy mineral soil is 25 % [76]. When the aeration porosity decreases to 15 %, root growth decreases [34]. As a rule, tree roots need an oxygen concentration above 10 % [52, 76]. Therefore, soil compaction can hinder natural tree renewal after logging. If a decrease in total porosity is accompanied by an increase in the volume humidity, moisture will accumulate over the entire profile of the affected soil. When the water content exceeds 75–80 % of the total moisture capacity, waterlogging processes begin. Soil compaction can thus lead to reduced aeration and increased waterlogging, both of which are associated with unsatisfactory reforestation [86].

Compaction and rutting have also been reported to change the thermal regimes of soils after felling [4]. Changes in the temperature regime affect the dynamics of nutrients and organic matter and carbon dioxide emissions. Dymov and Startsev [22] note that soils are heated to greater depths after felling than they are in established young forests. As a result, the sum of temperatures for the two soil types differed by over 5 °C and the sum of active temperatures differed by more than 10 °C over a six-year period.

Studies on wet and moist powdery loams after the passage of Ponsse ELK and John Deere 1410 machines in the Republic of Karelia and the Tver region of Russia show that strong compaction of the soil occurs during the first few machine passes. The authors note that the density of the surface layer (0–5 cm) of the soil increased in all studied cases even though the applied CTL (cut-to-length) systems comply with the environmental requirements concerning soil compaction for this type of soil (1.4 g/cm³) [33, 35].

A meta-analysis conducted by Mariotti et al. [66] confirmed that soil compaction during forest operations is a problem for forest regeneration.

Rut formation. Logging operations often cause compaction of the soil together with significant rutting. Pressure exerted through wheels and tracks often causes both vertical and horizontal displacement of the upper horizons, especially in soils with excessive or temporarily excessive moisture. The ruts are bounded by bulges, which tend to be more pronounced after wheeled vehicles than after tracked vehicles due to the smaller contact area [45, 64]. Therefore, the use of tracked tractors in conditions of high humidity is preferable from the point of view of soil protection. However, some studies on soil compaction and rutting caused by tracked and wheeled vehicles have yielded contradictory results [15]. This may be due to differences in natural and technological conditions. The soil's susceptibility to rutting depends on the soil structure, the density of addition, and weather changes that affect the soil's moisture content [87]. Above the soil's critical moisture content, machine stress leads to rut formation.

The intensity of traffic (number of passes) is the main factor controlling rut depth [24, 25]. In flat areas, ruts and other depressions are often sediment collectors and are filled with water for long periods, leading to gleying and local anaerobiosis [20]. This dramatically worsens the growing conditions of the forest's younger generation [32]. Our research shows that the amount of undergrowth in ruts is several times lower than in cutting strips [42].

On sites with even a slight slope, ruts direct surface runoff and are deepened by water erosion. The projected erosion rate depends mainly on the steepness and

length of the slope and the inadequacy of coverage on the skid trails [31]. The risk of erosion increases with the degree of soil compaction because compaction increases the amount of water in the topmost soil horizon (0–10 cm) [62]. The environmental consequences of ruts can thus be significant, to the degree that the number and depth of ruts have been proposed as rough indicators of reduced productivity in an area [56] and of hydrological regime disruption.

The ruts formed by the passage of modern logging machines can be over 0.5 m deep [96]. Current sorting methods therefore do not satisfy the environmental requirements for thinning logging with respect to rut formation because the requirements state that track depths should be below 0.15 m. The problem is especially severe on wet soils, where ruts can be up to 0.67 m deep [33, 35].

Studies by Ilintsev et al. [42] on rut formation showed that during summer harvesting on temporarily moist soils at sites with insufficient retention of logging residues, the depth of ruts reached 60–70 cm. Furthermore, a relationship was established between the quantity of logging residues and the rut depth. Observations at cuttings of different ages (from 1 to 15 years) showed that deep ruts smoothen out over time but do not completely disappear.

The formation of ruts during logging operations indicates that the weight of the loaded machinery exceeds the soil's load-bearing capacity. Therefore, further research is needed on the effects of using wheels and tracks and strengthening skid trails with logging residues to enable adaptation of logging methods to suit different environmental conditions.

Changes in chemical properties. Logging can disrupt the upper soil horizons, leading to increased mineralisation and leaching of some nutrients (phosphorus, potassium, etc.), usually lasting 2–5 years. Changes in the soil's nutrient regime may occur subsequently because this process is reversible and associated with changes in vegetation [43, 103].

The influence of logging machines on soil chemical properties is more pronounced in organogenic horizons than mineral ones [18], and changes have been observed up to 30–40 cm deep in the soil profile [29].

Logging changes both the composition of the soil organic matter and its distribution within the soil profile [18, 21, 27, 29, 100]. The role of the soil block (litter and humus) in the total reserves of organic carbon increases in fresh cuttings, where carbon replenishment over time is greatly reduced by a sharp reduction in litter fall onto the soil's surface [101]. For example, Fedchenko [27] and Varfolomeev [100] found that the content of organic carbon in the illuvial horizon in 1–11-year-old clearings was greater than in the soil of the stands untouched by logging. The authors attribute this change to accelerated litter decomposition and humification resulting from the cuttings' high humidity, which facilitates the movement of humus substances down the profile. The direction and intensity of the soil-forming process change significantly after final felling of spruce forests on drained podzolic soils with deep carbonates. This was related to the change in plant cover, the microbiological decomposition of acidic forest litter and logging residues, the formation of mobile acidic products such as fulvic acids during humification, and the increased movement of substances along the soil profile due to increased humidity.

McLaughlin and Phillips [67] found that the C and N contents of cuttings 17 years after logging are identical to those of unfelled stands. The organic matter content of forest soils is usually 1–5 % of the dry mass and decreases with depth. Under natural

conditions, the content of organic matter in soils is stable, but this may change when the balance of forest ecosystems is disturbed [76].

Changes in the qualitative composition of humus in cuttings were also highlighted in an analysis of soils at landing sites by Dymov and Lapteva [20], who observed a sharp increase in the proportion of humic acids (ha, represented mainly by the GF-1 fraction) in the humic substances (hs). This was reflected in an increase in the $C_{ha}:C_{hs}$ ratio in the upper half-metre of the profile to 1.0–2.1.

Dymov and Milanovskii [21] subsequently showed that this transformation of organic matter mainly involves the formation of hydrophilic components in the litter. Reactive hydrophilic humification products cause acid hydrolysis of minerals and accumulation of Fe-Al organic compounds in the upper mineral horizons of the profile. In later stages, after 30–40 years, there is an increase in the density of the litter layer and a decrease in the acidity, thickness and mass fraction of organic carbon compared to the podzolic soils of the indigenous spruce stands.

Studies on the impact of various logging methods on the nitrogen content of sandy illuvial-ferruginous podzols formed on binomial sediments revealed that selective cutting changes the nature of the dynamics of mobile nitrogen in the soil and increases the intensity of formation of its mineral and labile organic forms [29]. During clear-cutting, the intensive formation of mineral forms of nitrogen leads to their loss from ecosystems due to their removal outside the soil profile. To prevent nitrogen depletion in soils after continuous logging, reforestation measures must be implemented within five years.

Högbom et al. [40] and Sah and Ilvesniemi [84] note that after clear logging in boreal forests, the abundance of NH_4^+ containing the nitrogen isotope ^{15}N increases in the upper organogenic horizon. This change is associated with increased nitrification. Additionally, the differences between the upper and lower horizons of the soil become smaller than in untouched plantings and the NO_3^- -N content of the groundwater at a depth of 25 cm increase relative to controls.

In cutting areas in boreal forests, the content of mobile forms of phosphorus in the upper soil horizons decreases significantly but that of mobile potassium remains fairly stable [43]. Studies conducted in Iran [75] show that after summer skidding on the skid trails, there is a decrease in phosphorus and potassium that depends on the skidding tractor's number of passes and the slope of the terrain. The mobility of phosphorus is determined by the acidic reaction of the medium [57]. Similar results were obtained during winter logging in the forests of the Czech Republic [71].

As noted by Zetterberg et al. [105], the presence and abundance of various chemical elements in the soils of clear cuts where logging residues are left differ from those at sites where logging residues are collected. Removal of all logging residues after clear and selective felling can reduce the productivity and vitality of the remaining trees and lead to acidification of the soil and surface water [1, 86]. This is due to the removal of nutrients and buffers in the tops of trees, branches and needles [44]. However, long-term studies over 10 years have shown that differences in soil acidity between different harvesting options may become unreliable, indicating that the differences are not constant [12]. During the process of soil recovery, its acidity decreases.

A meta-analysis conducted by Hume et al. [41], based on 808 observations from 49 studies showed that harvesting, on average, has little effect on C stocks. Harvesting initially reduced mineral N reserves in the soil, while C, N and P concentrations on the forest floor decreased but those in the soil increased or remained at the

same level. The concentrations of C, N, and P on the forest floor increased, depending on the intensity of harvesting and were more pronounced in coniferous stands than in broad-leaved and mixed forests. Over time, the concentration of C and N decreased. The dynamics of P recovery after wood harvesting remain unclear due to a lack of research. The authors highlight the important effects of the intensity of harvesting and the duration of the logging turnover on the long-term availability of nutrients in the soil. The lag in the recovery of phosphorus concentrations after logging may indicate the separation of the phosphorus cycle from the carbon and nitrogen cycle, which is an issue in need of further studies.

Changes in biological properties. Many researchers [15, 60] confirm significant changes in biological variables due to soil compaction, and that the response of soil micro, meso, and macroorganisms may be different.

Battigelli et al. [6] found that logging with heavy soil compaction also reduces the total soil mesofauna, up to 93 % relative to unfelled forests. For example, there are decreases in the abundance and activity of earthworms and in the biodiversity and abundance of microarthropods [8, 9]. Soil compaction significantly reduces microbial biomass and microbial activity [30] due to negative changes in total porosity, pore size and bond distribution [104].

The biological activity of soils is determined by their particle size distribution and soil bulk density of addition [86]. For example, the biological activity of the surface layer of sandy soil is very high and tends to increase with increasing compaction. In loamy soil, the opposite trend is observed with a decrease in activity with increasing soil density. A sharp deterioration in the microbiological activity of soils compacted during logging may indicate a deterioration in their forest-growing properties and a decrease in the assimilation of nutrients by plants and the rate of their involvement in the biological cycle.

Dymov and Startsev [22], note that in fresh cuttings, an increase in daily temperatures and waterlogging of the soil leads to a decrease in the number of ecological and trophic groups of microorganisms and the functional activity of the microbiota. Shifting light in the soil due to wood harvesting can lead to short-term growth in microarthropods' abundance. Ongoing changes caused by logging also reduce biologically determined processes in the soil, such as respiration [7, 65].

All these biological changes in the soils cause the recovery processes in the cutting areas.

Recovery of soil properties. Studies by various authors [15, 36, 71, 72, 82] show that the duration of the period after logging is of great importance for analysing soil cover recovery processes.

Recovery is evident for several decades after logging, and irreversible damage occurs in some cases [36, 51]. It should be taken into account that the rate of recovery of different soil properties will be different [10, 15]. Recovery depends on the degree of initial compaction, implying that the choice of logging machinery and technology used can control the recovery dynamics [78].

Furthermore, the level of recovery seems to depend on the thickness of the soil. For example, 3–4 years after compaction, Goutal et al. [36] found structural recovery in the upper soil layer (0–10 cm) on soils of light grain size composition and partial recovery in the next layer (10–20 cm) in more clay soil.

The results show that partial restoration of disturbed heavy clay soil occurred 24 and 30 years after logging, and the surface horizon of the soil within the track did

not differ from the undisturbed control soil. However, the results show that even 30 years is not enough to restore the soil completely. In addition, if it takes more than 30 years to restore the compacted soil of the skid trails, the area covered with skid trails should be considered unproductive soil for tree renewal unless tillage is carried out [17].

Recent results by Mohieddinnea et al. [72] show a trend of recovery over time and the dynamics of recovery from the surface to deeper layers. The predicted duration of full recovery was about 54 and 70 years for Luvisol and Podzol, respectively. The authors also noted that sandy neutral soils could recover in less than 20 years, which is facilitated by the soil's biological activity.

Soil restoration is first enhanced by contrasting climatic conditions, such as moistening-drying and freezing-thawing [95]. Thus, the rate of restoration of the original properties varies from different factors. For example, the soil's original properties and the degree of exposure, which is observed in both Russian and foreign studies.

However, data on soil cover recovery processes after logging, especially over a long period, is currently insufficient. It is necessary to trace the course and period of recovery of both the properties and the structure of different soils in typological terms, which will allow us to talk about the prospects for the preservation and recovery of forest ecosystems.

Methods of minimising damage and protecting forest soils

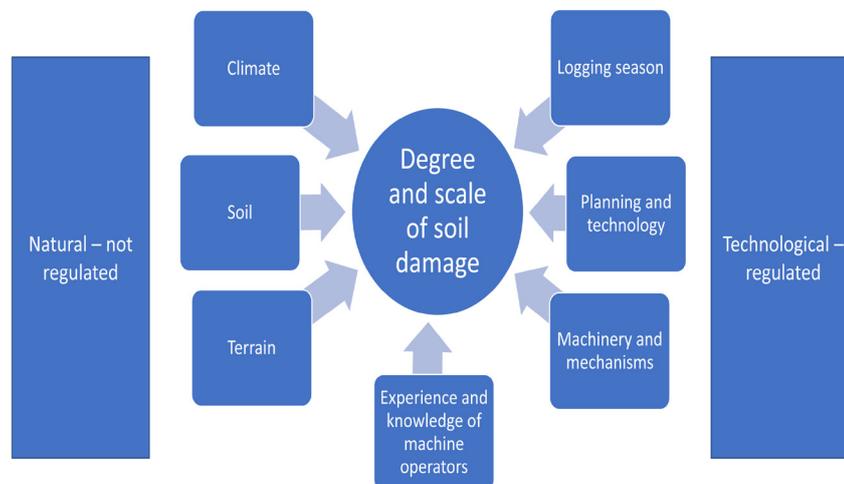
Factors affecting the degree of damage to forest soils. Factors that affect the degree of damage to the soil's surface during logging operations can be divided into natural and technological factors (fig.). The level of disturbance is determined by natural factors including the soil type [61, 85], the terrain and direction of movement [47], soil moisture [38, 68], the organic matter content [15], soil texture, the proportion of skeleton and sand particles in the soil, soil bulk density and porosity, and the thickness of the humus accumulation layer [4], the slope, and the season [90].

The severity of the damage depends on technological factors that mostly relate to the forest machines; they include the driving force [15, 24], the mass of the vehicle, the load per axle/wheel/track contact area of the vehicle with the soil, the tire pressure [13, 15, 45], the number of passes made by machines [38], the characteristics of the additional equipment, the organisation of the skidding process [64], speed, and wheel slip [24].

For example, the extent to which the forest floor and soil are disturbed depends on the skidding method, skidding machines, and soil conditions. On flat or slightly sloping terrain, wheeled vehicles are generally preferred due to their higher productivity [15, 91]. Therefore, skidding operations should be rationally designed to account for factors that affect logging costs and productivity as well as the major factors affecting soil compaction [70].

The main methods of regulating and reducing damage to the soil cover during logging operations should include all forest management stages, from planning and the choice of technologies for use in the cutting area to the environmental training of personnel.

Accounting for natural factors when planning logging operations. Preliminary planning of logging operations in each cutting area is important. When assessing the potential impact of logging operations on the forest environment, it is necessary to consider all of the factors that may affect the degree of damage to the soil cover.



Factors controlling the degree and scale of impact on the soil during logging operations

Publicly available topographic and space maps, digital models of the terrain (surface) of high spatial resolution (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>), and forest management and field materials for determining terrain conditions should be used when drawing the harvest site planning map and planning the road and skid trail network.

Selection of the wood harvesting system. Three different wood harvesting systems may be used: full-tree (FT), tree-length (TL) and cut-to-length (CTL) [49]. Each system has its own characteristics that depend on the natural and production conditions, the technology used, and the share of manual operations in the overall process [34]. Globally, two systems are dominant – TL (‘Canadian’) and CTL (‘Scandinavian’). All wood harvesting systems used in Russia have different negative effects on the forest environment [96]. All systems have almost identical effects on light soils, sandy soils, or sandy loam. However, sandy and sandy loam soils are much less common in Russian forests than medium and heavy soils (loam and clay). On such soils, FT and TL systems cause significant soil compaction but do not tend to form deep ruts. Katarov et al. [50] has argued that practices for implementing the CTL system on wet and moist soils should be modified to reduce rut depths in the most common forest soils.

Planning the logging season. The degree of damage to the soil depends on the season in which logging is done and the current weather conditions. The impact of logging machines will be lowest in winter [93], when the soil is frozen and its load-bearing capacity is therefore at a maximum. The depth of frozen soil primarily depends on the number of days with temperatures below 0 °C, the thickness of the snow cover, the water content of the soil and the thickness of individual horizons [83]. Soil damage may occur in winter if only the upper soil horizons have only frozen or if the soil’s temperature changes during the day, causing it to thaw.

The forest industry in Russia and the Nordic countries [87] has already faced problems due to abnormally warm winters without severe frosts [58]. Climate fluctuations resulting in land surface temperature anomalies are causing increasingly mild winters with unstable weather, leading to soil thawing and limited snow cover, both of which increase the risk of soil disturbance. Climate change and weather conditions should therefore be taken into account when organising wood harvesting: it is important

to be aware of when the soil will be wet, dry, frozen, or covered with snow, and to adapt one's plans accordingly.

Planning the technology of logging operations. Optimal skidding (transportation) of wood with minimal impact on the soil cover requires proper planning of the density of the forest road network, including skid trails, strip roads, landing sites, and production and household sites. The technology used in logging operations depends on the size of the cutting areas, the wood harvesting system and the types of cutting to be performed. Three distinct classes of machines can be used in logging operations: narrow-, medium- and wide-range [96]. The area occupied by skid trails when using narrow-, medium, and wide-range machines is 15–25, 10–15, and 3–6 %, respectively.

Negative impacts on soil due to logging can be further limited by combining a mechanised CTL system with manual felling using chainsaws and manual transport (forwarder) loading, both of which reduce the number of skid trails in logging areas [15]. Such combined systems have no restrictions and can be implemented using medium-range (wide-range) logging technologies when performing selective logging such as thinning or gradual logging. Timber landing sites, production facilities, and machinery parking areas should be located on well-drained soil.

Planning of the trail network. There are standard schemes for placing skid trails on the cutting area that are used in diverse natural and climatic contexts. The criteria governing the layouts of skid trails are the terrain, soil conditions, wetlands, the presence of temporary and permanent watercourses, the position of the targeted stands within the cutting area, and the landing method. It is also necessary to consider forestry requirements and current regulatory rules, and to ensure that the average skidding distance of tracked tractors does not exceed 300 m. When skidding with wheeled tractors the skidding distance can be increased up to 500 m, or even to 1000 m in some cases [3]. The locations of landing sites, non-operational areas, key biotopes, and key stand elements in the cutting area should be taken into account in order to minimise the negative impact of logging.

Leaving logging residues on the soil's surface to strengthen the upper soil horizons. Numerous studies have shown that reinforcing skid trails with logging residues (brush mats and corduroy bridges) significantly reduces changes in soil properties such as bulk density, porosity, and rutting when compared to unreinforced skid trails and also significantly increases the soil's load-bearing capacity [25].

Studies [54] showed that the peak load on the soil was reduced significantly by using more than 10 kg per 1 m² of brush mats compared to when the brush mats were not used. It is recommended to leave at least 15–20 kg/m² of brush mats on soils with low load-bearing capacities. While the brush mats lose some of their load-sharing capacity with each machine pass, they remain effective after up to 12 forwarder passes.

Ilintsev et al. [42] showed that cutting strips usually contain additional logging residues that could be laid on skid trails. The distribution and abundance of these residues may depend on the composition, stock, and density of the stand [55].

The properties of the coverage material also significantly affect soil compaction: branches and tops reduce compaction more effectively than chips and sawdust [2]. Other authors recommend covering skid trails with sawmills or pallets [77].

In the Nordic countries, there is considerable interest in using logging residues to produce bioenergy. If this waste is used to generate energy, it cannot be used to strengthen skid trails [24] because materials used for strengthening are often contaminated with soil and become unsuitable for further use. Wood used to construct

wooden strip roads and temporary bridges or to strengthen skid roads is also unsuitable for the pulp and sawmilling industry [92]. Temporary bridges and strip roads made of pulpwood can be built to enable the movement of machines over crossings of temporary watercourses and on soils with low load-bearing capacities. For further reinforcement, residual wood can be placed on top of the temporary bridge.

Training of specialists working in the forest. Sirén et al. [87] note that effective use of the various thematic maps and additional planning tools that are available requires knowledge of the soil properties at the sites of interest and how they are affected by logging activities. The experience and knowledge of foresters and machine operators is thus important in the planning of logging operations. In particular, accurate knowledge of the location and volume of the various wood grades and the soil's load-bearing capacity is needed. Using this data can help forwarder operators to identify optimal driving tactics and minimise the number of passes through areas with low load-bearing capacities. Therefore, operators, foresters, and engineers should be offered additional training on the environmental aspects of forest management and ways of reducing negative impacts on the soil, stand, and undergrowth. Work programmes for training new specialists should also cover modern scientifically-based practical and technological solutions.

Selection of machine systems and mechanisms. A wide range of machines for forest management has been introduced in recent years. Therefore, the choice of machine systems is a key step when designing technological process for logging operations in specific natural and climatic conditions [81]. A machine system includes machines designed to perform specific sequences of technological operations such as felling, delimiting, bucking, skidding, sorting, and landing [28].

The different load-bearing capacities of different soils must be accounted for when selecting machine systems [77] (table 2).

Some machines are more suitable than others for specific soils with different load-bearing capacities. The period of wood harvesting must also be considered because large temporary fluctuations in the soil's bearing capacity can be expected, especially in sensitive areas. For example, peat soil can withstand a pressure of 80 kPa in dry summers but only 20 kPa in wet conditions. The nominal pressure exerted by a machine is highly dependent on its tire size and the overall vehicle configuration [77].

Reducing the number of vehicle passes over the skid trails. The number of vehicle passes significantly affects the degree and scale of soil damage. Most studies [33, 38, 50] show that soil compaction is highest during the first few machine passes, and that the soil bulk density and depth of compaction increase more slowly with subsequent passes. Therefore, to reduce negative impacts on the soil, it is important to design and structure logging operations so as to optimise the passage and movement of machinery.

Use of larger tires. Increasing the tire width of an 8-wheeled 22-ton forwarder from 600 to 800 mm reduces its track depth by about 50 % [15]. While increasing the wheel diameter and the tires' width effectively reduces the pressure on the soil, this approach has some limitations. For example, wide tires require a lot of space, which may be undesirable when thinning young trees [104].

Table 2

Recommended specific pressure ranges and logging machines for different soil types

| Soil strength | Soil types | Soil description | Recommended specific pressure on the soil, kPa | Felling-bunching machine | Harvester | Forwarder | Skidder | Combi |
|---------------|--------------------|--------------------------------|--|---|---|---|---------------------------------------|---|
| 1 Strong | Dry | Sands, sandy loams and gravels | >80 | – | – | – | – | – |
| 2 Average | Fresh | Soft mineral or iron-pan soils | 60–80 | John Deere 959J, 953J, 909J, 903J, 853J, 843J, 759J, 643J | John Deere 909JH, 903JH, 853JH, 1470D, 1270D | John Deere 1710; Valmet 890.3; Ponsse Buffalo; Volvo Eco Log 594F | – | – |
| 3 Soft | Moist | Gleys and peaty soils | 40–60 | John Deere 753J | John Deere 770D, 759JH, 759G, 753JH, 753G, 703JH, 703G, 1063, 1263; Gremo 950 HPV, 1050 H; Valmet 911.3; Volvo Eco Log 688E | Gremo 950 F; John Deere 1110, 1210; Valmet 860.3, 840.2; Volvo Eco Log 750F, 1050, 1250 | Caterpillar D4H, 527; TDT-55, TLT-100 | – |
| 4 Very soft | Very moist and wet | Peats | <40 | – | Alstor 300 Harvester | Alstor Model 810, 821, 833 | – | Valmet 801 Combi; PIKA 828, 728; Alstor 840 Pro |

Controlling the tire pressure. Manufacturers specify appropriate minimum, optimal, and maximum permissible internal air pressures for the different tires that they offer [81]. This enables the use of tire pressure control systems that allow the tire pressure to be adjusted to suit specific working conditions, which can improve traction and mobility and increase access during rainy seasons [15]. On secondary skid trails where there are fewer driveways than on main skid trails, the use of a forwarder with low-pressure tires can limit soil compaction to a degree [24]. To further reduce the risk of compaction, low-pressure tires are usually paired with anti-skid tracks, which are used for extended periods.

The use of snow chains. The use of chains on the front wheels reduces the load when the wheels slip, thereby reducing soil damage and increasing the vehicle's mobility [94].

The use of track belts. When organising the work of wheeled vehicles in heavy soil conditions, various measures can be taken to increase the cross-country ability of vehicles and reduce their negative impact on the soil. The most effective and common such measures are reducing the tires' internal pressure and installing removable tracks [81].

Fitting long rectangular tracks (track belts) significantly increases the machine's contact area with the soil, allowing its mass to be distributed over a larger support area. This reduces the pressure on the soil by a factor of 1.5 to 2. Although track belts increase the weight on the trailer by 10–12 %, they can reduce the track depth (by 30–40 %) and the degree of soil compaction when compared even to fairly wide (700 mm) and soft tires [33]. This is probably due to reduction of the relative coefficient of rolling resistance [13].

Anti-skid tracks are also used to increase traction, load capacity, cross-country ability, speed, stability, and operator comfort, especially in hard-to-reach areas and on wet (moist) soils [14, 81]. In a machine with a 6×6 wheel configuration, track belts will typically cover the wheels of the rear truck, whereas with an 8×8 configuration, track belts would be used on the front and rear pairs of wheels [74]. Using track setups adapted to specific wheel configurations and tire sizes allows machines to perform well and achieve high productivity under diverse natural and industrial conditions while also minimizing their environmental impact. For example, the use of track belts on the rear trolley of a 3-axle forwarder reduced its nominal pressure to 50–60 kPa, and using track belts on the front and rear bogies of a 4-axle forwarder reduced its nominal pressure to 40–50 kPa [77].

It should be noted however that the use of wider tires and anti-skid tracks is not always sufficient to avoid damage to the soil surface; even if all of the currently available technical solutions are applied, it can be difficult to completely prevent soil damage. As pointed out by Cambi et al. [15], the technological equipment available today is simply not good enough.

Conducting melioration in wet areas. Melioration during site preparation can help remove excess moisture and thereby increase the soil's bearing capacity. For example, shallow-groove melioration reduces high local groundwater levels and improves aeration of the upper soil horizons [59]. The main limitations of mechanical site preparation methods are the high cost of work and the potential consequences of repeated machine movements.

Use of global positioning systems (GPS) and geographic information systems (GIS). Logging management involves equipping modern logging machinery with

navigation components (GPS) and GIS to provide accurate information on the vehicle's location in relation to bodies of water, swampy areas, and so on. Detailed operational planning using technologies such as real-time mapping can help technicians avoid wet and lowered areas and thereby reduce potential soil damage.

Conclusion

This paper has summarised the results of studies on how different types of mechanised logging can affect the forest environment and soil to varying degrees by changing the soil's physical, chemical, and biological properties and by causing mechanical damage (rutting). The process of soil rehabilitation after logging operations may take many decades, and some damage is irreparable. Therefore, given the strong influence of soils on forest productivity, it is essential to conserve and protect forest soils in order to ensure the successful renewal and productivity of future forests. The soil must be maintained in a healthy state to ensure environmental stability and the preservation of forest flora and fauna.

Despite the high interest in sparing methods of wood harvesting, current measures for preserving forest soils after logging operations are insufficient. Based on this review of field management practices for reducing adverse impacts on soils and soil cover, it can be concluded that there are effective ways to reduce the negative impact of logging activities. While there are no regulatory requirements to reduce negative impacts on soils during logging, voluntary forest certification could potentially serve a similar purpose. Efforts to reduce soil damage are also hindered by the limitations of the current scientific and technical knowledge base and the high cost of implementing best management practices. Furthermore, economic factors including production plans, the growing demand for forest products, the cost of harvesting wood, and the need to pay taxes and rent, all require the continuous harvesting of wood throughout the year even when weather conditions are unfavourable.

Therefore, major goals for future research in this area should be to clarify the impact of logging machinery and equipment on soils, identify optimal processes and measures for promoting the rehabilitation of soil cover and the best times for implementing such processes and measures, and develop guidelines, regulatory documents and accessible large-scale soil maps to support scientifically sound forest management that takes climate change into account and aims to reduce the negative impact of logging machinery on soil cover.

REFERENCES

1. Achat D.L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Augusto L. Quantifying Consequences of Removing Harvesting Residues on Forest Soils and Tree Growth – A Meta-Analysis. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 348, pp. 124–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.042>
2. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The Impacts of Ground-Based Logging Equipment on Forest Soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 371–376.
3. Ananiev V.A., Asikainen A., Vialkko E., Gerasimov Y.Y., Dyomin K.K., Sikanen L., Sunyov V.S., Tyukina O.N., Khlustov V.K., Shirnin Y.A. *Intermediate Yield of Forest in the North-West of Russia*. Joensuu, Research Institute of the Forest of Finland, 2005. 150 p.

4. Arnup R.W. *The Extent, Effect and Management of Forestry-Related Soil Disturbance, with Reference to Implications for the Clay Belt: A Literature Review*. Technical Report TR-37. Ontario, Northeast Science and Technology, 1998. 30 p.
5. Bagheri I., Kalhori S.B., Akef M., Khormali F. Effect of Compaction on Physical and Micromorphological Properties of Forest Soils. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 159–163. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.31018>
6. Battigelli J.P., Spence J.R., Langor D.W., Berch S.M. Short-Term Impact of Forest Soil Compaction and Organic Matter Removal on Soil Mesofauna Density and Oribatid Mite Diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 5, pp. 1136–1149. DOI: <https://doi.org/10.1139/x03-267>
7. Beylich A., Oberholzer H.-R., Schrader S., Höper H., Wilke B.-M. Evaluation of Soil Compaction Effects on Soil Biota and Soil Biological Processes in Soils. *Soil and Tillage Research*, 2010, vol. 109, iss. 2, pp. 133–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010>
8. Blasi S., Menta C., Balducci L., Conti F.D., Petrini E., Piovesan G. Soil Microarthropod Communities from Mediterranean Forest Ecosystems in Central Italy under Different Disturbances. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, vol. 185, pp. 1637–1655. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2657-2>
9. Bottinelli N., Capowicz Y., Ranger J. Slow Recovery of Earthworm Populations after Heavy Traffic in Two Forest Soils in Northern France. *Applied Soil Ecology*, 2014, vol. 73, pp. 130–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.017>
10. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-Term Impacts of Wildfire and Logging on Forest Soils. *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, pp. 113–118. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0294-2>
11. Brais S. Persistence of Soil Compaction and Effects on Seedling Growth in North-Western Quebec. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, vol. 65, iss. 4, pp. 1263–1271. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541263x>
12. Brandtberg P.-O., Olsson B.A. Changes in the Effects of Whole-Tree Harvesting on Soil Chemistry during 10 Years of Stand Development. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 277, pp. 150–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.019>
13. Bygdén G., Eliasson L., Wästerlund I. Rut Depth, Soil Compaction and Rolling Resistance when Using Bogie Tracks. *Journal of Terramechanics*, 2003, vol. 40, iss. 3, pp. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2003.12.001>
14. Bygdén G., Wästerlund I. Rutting and Soil Disturbance Minimized by Planning and Using Bogie Tracks. *Forestry Studies*, 2007, vol. 46, pp. 5–12.
15. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
16. Cambi M., Hoshika Y., Mariotti B., Paoletti E., Picchio R., Venanzi R., Marchi E. Compaction by a Forest Machine Affects Soil Quality and *Quercus robur* L. Seedling Performance in an Experimental Field. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 384, pp. 406–414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045>
17. DeArmond D., Emmert F., Lima A.J.N., Higuchia N. Impacts of Soil Compaction Persist 30 Years after Logging Operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research*, 2019, vol. 189, pp. 207–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.010>
18. Dolgaya V.A., Bakhmet O.N. Forest Litter Layer Properties on the Early Stages of Natural Regrowth after Clear Cuts in Karelian Middle Taiga. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2021, no. 1, pp. 65–77. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114821010022>

19. Dymov A.A. The Impact of Clearcutting in Boreal Forests of Russia on Soils: A Review. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, iss. 7, pp. 780–790. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422931707002X>

20. Dymov A.A., Lapteva E.M. Changes in Podzolic Soils on Bilayered Deposits under the Influence of Felling. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2006, no. 3, pp. 42–49.

21. Dymov A.A., Milanovskii E.Y. Changes in the Organic Matter of Taiga Soils during the Natural Reafforestation after Cutting in the Middle Taiga of the Komi Republic. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 46, no. 12, pp. 1164–1171. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229314010049>

22. Dymov A.A., Startsev V.V. Changes in the Temperature Regime of Podzolic Soils in the Course of Natural Forest Restoration after Clearcutting. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 551–559. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229316050021>

23. Edlund J., Bergsten U., Löfgren B. Effects of Two Different Forwarder Steering and Transmission Drive Systems on Rut Dimensions. *Journal of Terramechanics*, 2012, vol. 49, iss. 5, pp. 291–297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2012.03.004>

24. Eliasson L. Effects of Forwarder Tyre Pressure on Rut Formation and Soil Compaction. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 4, pp. 549–557. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.366>

25. Eliasson L., Wästerlund I. Effects of Slash Reinforcement of Strip Roads on Rutting and Soil Compaction on a Moist Fine-Grained Soil. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 252, iss. 1–3, pp. 118–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.037>

26. Enström J. *Grundbok för skogsbrukare*. Jönköping, Skogsstyrelsen, 1996. 189 p.

27. Fedchenko M.A. On the Group Composition of Soil Humus of *Deschampsia* Clear-Cuts of the Arkhangelsk Region. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1962, no. 1, pp. 49–58.

28. Fedorenchik A.S., German A.A., Protas P.A. *Forest Machines “Amkodor”*. Minsk, BGTU Publ., 2013. 240 p.

29. Fedorets N.G., Bahmet O.N. *Ecological Settings of Carbohydrate and Nitrogen Transformations in Forest Soils*. Petrozavodsk, KRC RAS Publ., 2003. 240 p.

30. Frey B., Kremer J., Rüdter A., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. Compaction of Forest Soils with Heavy Logging Machinery Affects Soil Bacterial Community Structure. *European Journal of Soil Biology*, 2009, vol. 45, iss. 4, pp. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.05.006>

31. Garren A.M., Bolding M.C., Aust W.M., Moura A.C., Barrett S.M. Soil Disturbance Effects from Tethered Forwarding on Steep Slopes in Brazilian Eucalyptus Plantations. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 9, art. 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090721>

32. Gebauer R., Neruda J., Ulrich R., Martinková M. Soil Compaction – Impact of Harvesters’ and Forwarders’ Passages on Plant Growth. *Sustainable Forest Management – Current Research*. Ed. by J.J. Diez. InTech, 2012, pp. 180–196. DOI: <https://doi.org/10.5772/30962>

33. Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 35–45.

34. Gerasimov Yu., Sokolov A. Ergonomic Evaluation and Comparison of Wood Harvesting Systems in Northwest Russia. *Applied Ergonomics*, 2014, vol. 45, iss. 2, part B, pp. 318–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>

35. Goltsev V., Tolonen T., Syunev V., Dahlin B., Gerasimov Y. Wood Harvesting and Logistics in Russia – Focus on Research and Business Opportunities. Final Report of the Research Project. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 210*. Joensuu,

MELTA, 2011. 157 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp210.pdf> (accessed 01.03.20).

36. Goutal N., Boivin P., Ranger J. Assessment of the Natural Recovery Rate of Soil Specific Volume Following Forest Soil Compaction. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, vol. 76, iss. 4, pp. 1426–1435. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0402>

37. Gusev I.I., Kozobrodov A.S., Kubrak N.I., Nevolin O.A., Pleshak T.V., Tret'yakov S.V. The Current State of Forest Resources of the Arkhangelsk Region and the Environmental Consequences of Forest Management. *Environmental Problems of the European North: Collection of Academic Papers*. Yekaterinburg, 1996, no. 3, pp. 9–24.

38. Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Han S.-K., Tirocke J. Effect of Slash, Machine Passes, and Soil Moisture on Penetration Resistance in a Cut-to-Length Harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 2006, vol. 17, iss. 2, pp. 11–24. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702532>

39. Hattori D., Tanaka K., Irino K.O., Kendawang J.J., Ninomiya I., Sakurai K. Effects of Soil Compaction on the Growth and Mortality of Planted Dipterocarp Seedlings in a Logged-Over Tropical Rainforest in Sarawak Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 310, pp. 770–776. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.023>

40. Högbom L., Nilsson U., Örlander G. Nitrate Dynamics after Clear Felling Monitored by *in vivo* Nitrate Reductase Activity (NRA) and Natural ¹⁵N Abundance of *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 160, iss. 1-3, pp. 273–280. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00475-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00475-3)

41. Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R. Intensive Forest Harvesting Increases Susceptibility of Northern Forest Soils to Carbon, Nitrogen and Phosphorus Loss. *Journal of Applied Ecology*, 2017, vol. 55, iss. 1, pp. 246–255. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12942>

42. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tret'yakov S. The Natural Recovery of Disturbed Soil, Plant Cover and Trees after Clear-Cutting in the Boreal Forests, Russia. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2020, vol. 13, iss. 6, pp. 531–540. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3371-013>

43. Ilintsev A., Nakvasina E., Aleynikov A., Tret'yakov S., Koptev S., Bogdanov A. Middle-Term Changes in Topsoils Properties on Skidding Trails and Cutting Strips after Long-Gradual Cutting: A Case Study in the Boreal Forest of the North-East of Russia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, vol. 39, no. 1, pp. 71–83.

44. Iwald J., Löfgren S., Stendahl J., Karlton E. Acidifying Effect of Removal of Tree Stumps and Logging Residues as Compared to Atmospheric Deposition. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 290, pp. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.022>

45. Jansson K.-L., Johansson J. Soil Changes after Traffic with a Tracked and a Wheeled Forest Machine: A Case Study on a Silt Loam in Sweden. *Forestry*, 1998, vol. 71, iss. 1, pp. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/71.1.57>

46. Jansson K.-J., Wästerlund I. Effect of Traffic by Lightweight Forest Machinery on the Growth of Young *Picea abies* Trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 581–588. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827589908540823>

47. Jourgholami M., Majnounain B., Abari M.E. Effects of Tree-Length Timber Skidding on Soil Compaction in the Skid Trail in Hyrcanian Forests. *Forest Systems*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 288–293. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2014232-03766>

48. Karpechko A.Yu. Changes in Density and Root Mass in Soils under the Influence of Harvesting Machines in Spruce Forests of Southern Karelia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2008, no. 5, pp. 66–70.

49. Karvinen S., Välkky E., Torniainen T., Gerasimov Y. Northwest Russian Forestry in a Nutshell. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 30. Joensuu, MELTA, 2006. 98 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp030.pdf> (accessed 01.03.20).

50. Katarov V.K., Syunev V.S., Ratjkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of Wood Forwarding on Forest Soils. *Resources and Technology*, 2013, no. 9(2), pp. 73–81. DOI: <http://dx.doi.org/10.15393/j2.art.2012.1641>

51. Klaes B., Struck J., Schneider R., Schüller G. Middle-Term Effects after Timber Harvesting with Heavy Machinery on a Fine-Textured Forest Soil. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 1083–1095. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2>

52. Kozłowski T.T. Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 596–619. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827589908540825>

53. Kuznetsova I.A., Danilova V.I. On Soil Decompression under the Influence of Swelling-Shrinkage Processes. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1988, no. 6, pp. 59–70.

54. Labelle E.R., Jaeger D. Quantifying the Use of Brush Mats in Reducing Forwarder Peak Loads and Surface Contact Pressure. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, vol. 33, no. 2, pp. 249–274.

55. Labelle E.R., Jaeger D. Management Implications of Using Brush Mats for Soil Protection on Machine Operating Trails during Mechanized Cut-to-Length Forest Operations. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 1, art. 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10010019>

56. Lacey S.T., Ryan P.J. Cumulative Management Impacts on Soil Physical Properties and Early Growth of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 138, iss. 1-3, pp. 321–333. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00422-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00422-9)

57. Lambers H., Finnegan P.M., Laliberté E., Pearse S.J., Ryan M.H., Shane M.W., Veneklaas E.J. Phosphorus Nutrition of *Proteaceae* in Severely Phosphorus-Impoverished Soils: Are There Lessons to Be Learned for Future Crops? *Plant Physiology*, 2011, vol. 156, iss. 3, pp. 1058–1066. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.174318>

58. *Land Surface Temperature Anomaly*. December 2019. Available at: https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD_LSTAD_M&year=2019 (accessed 01.02.20).

59. Lang A.J., Cristan R., Aust W.M., Bolding M.C., Strahm B.D., Vance E.D., Roberts Jr. E.T. Long-Term Effects of Wet and Dry Site Harvesting on Soil Physical Properties Mitigated by Mechanical Site Preparation in Coastal Plain Loblolly Pine (*Pinus taeda*) Plantations. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 359, pp. 162–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.034>

60. Li Q., Allen H.L., Wollum II A.G. Microbial Biomass and Bacterial Functional Diversity in Forest Soils: Effects of Organic Matter Removal, Compaction, and Vegetation Control. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, vol. 36, iss. 4, pp. 571–579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.001>

61. Magagnotti N., Spinelli R., Güldner O., Erler J. Site Impact after Motor-Manual and Mechanised Thinning in Mediterranean Pine Plantations. *Biosystems Engineering*, 2012, vol. 113, iss. 2, pp. 140–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.001>

62. Magnusson T. Tjälskjutning. *Skogsskötselserien nr13, Skogsbruk – mark och vatten*. Skogsstyrelsen, 2009, p. 11.

63. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A New Paradigm in a Changing World and Climate. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 634, pp. 1385–1397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>

64. Marchi E., Picchio R., Spinelli R., Verani S., Venanzi R., Certini G. Environmental Impact Assessment of Different Logging Methods in Pine Forests Thinning. *Ecological Engineering*, 2014, vol. 70, pp. 429–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.019>
65. Mariani L., Chang S.X., Kabzems R. Effects of Tree Harvesting, Forest Floor Removal, and Compaction on Soil Microbial Biomass, Microbial Respiration, and N Availability in a Boreal Aspen Forest in British Columbia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, vol. 38, iss. 7, pp. 1734–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.11.029>
66. Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E., Feng Z., Paoletti E., Marchi E. Vehicle-Induced Compaction of Forest Soil Affects Plant Morphological and Physiological Attributes: A Meta-Analysis. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 462, art. 118004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
67. McLaughlin J.W., Phillips S.A. Soil Carbon, Nitrogen, and base Cation Cycling 17 Years after Whole-Tree Harvesting in a Low-Elevation Red Spruce (*Picea rubens*)-Balsam Fir (*Abies balsamea*) Forested Watershed in Central Maine, USA. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 222, iss. 1-3, pp. 234–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.033>
68. McNabb D., Startsev A., Nguyen H. Soil Wetness and Traffic Level Effects on Bulk Density and Air-Filled Porosity of Compacted Boreal Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, vol. 65, iss. 4, pp. 1238–1247. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541238x>
69. Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, MSFU Publ., 2003. 320 p.
70. Melemez K., Tunay M., Emir T. A Comparison of Productivity in Five Small-Scale Harvesting Systems. *Small-scale Forestry*, 2014, vol. 13, pp. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11842-013-9239-1>
71. Modrý M., Hubený D. Impact of Skidder and High-Lead System Logging on Forest Soils and Advanced Regeneration. *Journal of Forest Science*, 2003, vol. 49, no. 6, pp. 273–280. DOI: <https://doi.org/10.17221/4701-JFS>
72. Mohieddin H., Brasseur B., Spicher F., Gallet-Moron E., Buridant J., Kobaissi A., Horen H. Physical Recovery of Forest Soil after Compaction by Heavy Machines, Revealed by Penetration Resistance over Multiple Decades. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 449, art. 117472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117472>
73. Mokhiev A., Sul'tson S., Ivshina A. Adaptation of Wood Harvesting Technologies at the Enterprises of Krasnoyarsk Territory under the Principles of Voluntary Forest Certification. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 4, pp. 163–178. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a3221bddd8.81807282
74. Mokhiev A.P. The Method of Selection of Forest Machines under the Climatic Conditions. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2016, vol. 6, no. 4, pp. 208–215. DOI: <https://doi.org/10.12737/23459>
75. Naghdi R., Solgi A., Labelle E.R., Zenner E.K. Influence of Ground-Based Skidding on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and Their Effects on Maple Seedling Growth. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 949–962. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0986-3>
76. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Cham, Switzerland Springer, 2013. 217 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
77. Owende P.M.O., Lyons J., Haarlaa R., Peltola A., Spinelli R., Molano J., Ward S.M. *Operations Protocol for Eco-Efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites*. Project ECO-WOOD, 2002. 74 p.
78. Picchio R., Mercurio R., Venanzi R., Gratani L., Giallonardo T., Monaco A.L., Frattaroli A.R. Strip Clear-Cutting Application and Logging Typologies for Renaturalization

of Pine Afforestation – A Case Study. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 6, art. 366. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9060366>

79. Pobedinskiy A.V. *Water and Soil Protection Role of Forests*. Pushkino, VNIILM Publ., 2013. 208 p.

80. Powers R.F., Scott D.A., Sanchez F.G., Voldseth R.A., Page-Dumroese D., Elioff J.D., Stone D.M. The North American Long-Term Soil Productivity Experiment: Findings from the First Decade of Research. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 220, iss. 1-3, pp. 31–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003>

81. Protas P.A., Misuno Yu.I. Investigation of the Pressure of the Forwarder “Amkodor 2661-01” Wheeler on the Base Surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2(198), pp. 251–258.

82. Rozhkov V.A., Karpachevskii L.O. The Forest Cover of Russia and Soil Conservation. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, iss. 10, pp. 1041–1048. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229306100012>

83. Saarilahti M. *Soil Interaction Model. Appendix Report No 8*. Helsinki, University of Helsinki, 2002. 37 p.

84. Sah S.P., Ilvesniemi H. Interspecific Variation and Impact of Clear-Cutting on Natural ¹⁵N Abundance and N Concentration in the Needle-to-Soil Continuum of a Boreal Conifer Forest. *Plant Soil and Environment*, 2007, vol. 53, iss. 8, pp. 329–339. DOI: <https://doi.org/10.17221/2186-PSE>

85. Sakai H., Nordfjell T., Suadicani K., Talbot B., Bøllehuus E. Soil Compaction on Forest Soils from Different Kinds of Tires and Tracks and Possibility of Accurate Estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2008, vol. 29, iss.1, pp. 15–27.

86. Seryy V.S., Anikeyeva V.A., Vyalykh N.I., Kubrak N.I. Changing Forest Site Conditions of Cuttings in Modern Logging. *Environmental Studies in the Forests of the European North: Collection of Academic Papers*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1991, pp. 3–15.

87. Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryyänen A. Soil Disturbance by Cut-to-Length Machinery on Mid-Grained Soils. *Silva Fennica*, 2019, vol. 53, no. 2, art. 10134. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10134>

88. Sokolovskaya N.A., Revut K.B., Markova I.A., Shevlyakov I.R. The Role of Soil Density in Reforestation. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1977, no. 2, pp. 44–55.

89. Solgi A., Naghdi R., Marchi E., Laschi A., Behjou F.K., Hemmati V., Masumian A. Impact Assessment of Skidding Extraction: Effects on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and on Maple Seedling Growing along the Skid Trail. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 2, art. 134. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10020134>

90. Solgi A., Najafi A. The Impacts of Ground-Based Logging Equipment on Forest Soil. *Journal of Forest Science*, 2014, vol. 6, iss. 1, pp. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.17221/76/2013-JFS>

91. Spinelli R., Magagnotti N. Wood Extraction with Farm Tractor and Sulky: Estimating Productivity, Cost and Energy Consumption. *Small-scale Forestry*, 2012, vol. 11, pp. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11842-011-9169-8>

92. Staland F., Larsson K. *Bra planering och rätt teknik minskar risken för markskador*. Skogforsk Resultat (4). Uppsala, Skogforsk, 2002. 4 p.

93. Šušnjar M., Horvat D., Šešelj J. Soil Compaction in Timber Skidding in Winter Conditions. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 3–15.

94. Suvinen A. Economic Comparison of the Use of Tyres, Wheel Chains and Bogie Tracks for Timber Extraction. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2006, vol. 27, no. 2, pp. 81–102.

95. Sveistrup T.E., Haraldsen T.K., Langohr R., Marcelino V., Kværner J. Impact of Land Use and Seasonal Freezing on Morphological and Physical Properties of Silty Norwegian Soils. *Soil and Tillage Research*, 2005, vol. 81, iss. 1, pp. 39–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.05.004>
96. Syuney V.S., Sokolov A.P., Konovalov A.P., Katarov V.K., Seliverstov A.A., Gerasimov Y.Y., Karvinen S., Väliky E. Comparison of Wood Harvesting Methods in Logging Companies of the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 120*. Joensuu, MELTA, 2009. 117 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/working-papers/2009/mwp120.htm> (accessed 01.03.20).
97. Terinov N.N., Gerts E.F., Bezgina Yu.N. Development of Logging Technology in the Urals. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 2, pp. 81–90. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.2.81>
98. Toivio J., Helmisaari H.-S., Palviainen M., Lindeman H., Ala-Ilomäki J., Sirén M., Uusitalo J. Impacts of Timber Forwarding on Physical Properties of Forest Soils in Southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 405, pp. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.022>
99. Trubin D.V., Ipatov L.F., L'vov P.N., Trubin B.V., L'vov N.P., Klevtsov D.N. *White Sea Taiga: Yesterday, Today, Tomorrow*. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2015. 400 p.
100. Varfolomeev L.A. On Soil Formation in the Clear-Cuts of Spruce Forests in the Northern Part of the Middle Taiga Subzone. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1964, no. 8, pp. 15–25.
101. Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Ivanov V.V., Krivobokov L.V., Boloneva M.V. Post-Logging Organic Matter Recovery in Forest Ecosystems of Eastern Baikal Region. *Biology Bulletin*, 2010, vol. 37, iss. 1, pp. 69–79. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359010010103>
102. Wästerlund I. Strength Components in the Forest Floor Restricting Maximum Tolerable Machine Forces. *Journal of Terramechanics*, 1989, vol. 26, iss. 2, pp. 177–172. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(89\)90005-0](https://doi.org/10.1016/0022-4898(89)90005-0)
103. Worrell R., Hampson A. The Influence of Some Forest Operations on the Sustainable Management of Forest Soils – A Review. *Forestry*, 1997, vol. 70, iss. 1, pp. 61–85. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/70.1.61>
104. Wronski E.B., Murphy G. Responses of Forest Crops to Soil Compaction. *Soil Compaction in Crop Production*. Ed. by B.D. Soane, C. van Ouwerkerk. Amsterdam, Elsevier, 1994, pp. 317–342. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50022-2>
105. Zetterberg T., Olsson B.A., Löfgren S., von Brömssen C., Brandtberg P.-O. The Effect of Harvest Intensity on Long-Term Calcium Dynamics in Soil and Soil Solution at Three Coniferous Sites in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 302, pp. 280–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.030>

УДК 630*37

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-117-133

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ НА ВЫРУБКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ТРАКТОРОВ

И.М. Бартнев, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAR-1937-2020](https://orcid.org/0000-0002-7335-2862)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7335-2862>

М.В. Драпалюк, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAP-5563-2020](https://orcid.org/0000-0002-8029-2706)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: michael1@yandex.ru, kafedramehaniza@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 20.04.20 / Принята к печати 26.06.20

Аннотация. Применяемые в настоящее время полосное лесовосстановление на вырубках и удаление пней путем корчевания имеют ряд существенных недостатков технологического, экологического и экономического характера: вынос гумусированного слоя почвы за пределы расчищаемых полос, уплотнение и снижение ее пористости; образование подпневых ям и их локальное заболачивание; захламление нерасчищаемых кулис между полосами порубочными остатками и выкорчеванными пнями; низкая производительность корчевальных машин и высокая энергоемкость процесса корчевания пней; прекращение агротехнических уходов через 2-3 года после посадки и невозможность проведения осветления культур из-за их непроходимости для тракторных агрегатов; низкий уровень использования силы тяги специальных лесных тракторов и их недостаточная мощность для корчевания пней. Предметом исследования становятся технология, машины и орудия лесовосстановления на вырубках. Цель – обеспечение комплексной механизации технологического процесса лесовосстановления для повышения производительности работ, снижения энерго- и материалоемкости технологии и создание условий для эффективного использования машин и орудий в агрегате с энергонасыщенными тракторами тягово-энергетической концепции, исключающих вредное воздействие на экологию почвы и растений. Результатами достижения поставленных цели и задач являются обоснование лесоводственно-экологической, технической и экономической целесообразности применения технологии, основанной на сплошной расчистке вырубок от порубочных остатков, валежника и поросли кустарниковой растительности путем их измельчения мобильными мульчерами; удаление пней на вырубках посредством их дробления на глубине до 0,15...0,20 м модернизированной машиной МУП-4А с разбрасыванием щепы по лесокультурной площади и последующей сплошной обработкой почвы бороной дисковой клавишной БДК-2.5. При повышении производительности практически исключаются вредные воздействия на экологию почвы и растений, а измельченная древесная биомасса, перемешанная с почвой, превращается в органическое удобрение. Устранение механических препятствий, какими являются порубочные остатки, валежник и пни, позволяет эффективно использовать энергонасыщенные тракторы за счет совмещения технологических операций и выполнения их за один проход агрегата, увеличения ширины захвата и рабочих скоростей. Создаются условия для эффективной работы лесохозяйственных машин и орудий на тракторно-моторной тяге для защиты леса от вредителей, болезней и пожаров, а также для механизации различных видов рубок ухода.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Бартнев И.М., Драпалюк М.В. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С.117–133. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-117-133

Ключевые слова: лесовосстановление, технология лесовосстановления, вырубка, корчевка пней, расчистка вырубок, лесная машина, мульчирование, дробление пней, энергонасыщенный трактор.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF REFORESTATION IN CUTTINGS WITH THE USE OF ENERGY-EFFICIENT TRACTORS

Ivan M. Bartenev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1937-2020](https://orcid.org/0000-0002-7335-2862),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7335-2862>

Michael V. Drapalyuk, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAP-5563-2020](https://orcid.org/0000-0002-8029-2706),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru, michael1@yandex.ru

Original article / Received on April 20, 2020 / Accepted on June 26, 2020

Abstract. Currently applied partial reforestation in cuttings and removal of stumps by uprooting have a number of significant technological, environmental and economic disadvantages. These are removal of the humus layer of soil outside the cleared strips, compaction and reduction of soil porosity; formation of understump holes and their local waterlogging; littering of non-cleared belts of trees between strips with felling debris and uprooted stumps; low productivity of uprooting machines and high energy consumption of stump uprooting; termination of agrotechnical tending after 2–3 years after planting and impossibility of cleaning stands due to their obstruction for tractor units; low level of traction force of special forest tractors and their insufficient power for uprooting stumps. Technology, machines and tools for reforestation in cuttings become the subjects of the research. The aim of the research is to provide a comprehensive mechanization of the reforestation process in order to improve work productivity, reduce energy and material consumption of the technology and create conditions for the effective use of machines and tools in combination with energy-efficient tractors of the traction-energy concept, ensuring the elimination of harmful effects on soil and plants ecology. The results of achieving the set aim and objectives are substantiation of forestry and ecological, technical, and economic feasibility of using the technology based on the complete clearing of cuttings from felling residues, dead wood and coppice of shrub vegetation by their crushing using mobile mulchers; removal of stumps in cuttings through crushing them at a depth of 0.15–0.20 m by an upgraded MUP-4A machine with scattering chips over the planting area and subsequent continuous tillage with a disk harrow BDK-2.5. Harmful effects on the ecology of soil and plants are practically eliminated with an increase in productivity, and the grinded woody biomass mixed with the soil turns into an organic fertilizer. The elimination of mechanical obstacles such as felling residues, fallen trees and stumps makes it possible to effectively use energy-efficient tractors by combining technological operations and performing them in one pass of the unit, as well as increasing the working width and operating speeds. Conditions for efficient operation of forestry machines and tools on tractor-motor traction to protect the forest from pests, diseases, and fires, and for mechanization of various types of thinning are being created.

For citation: Bartenev I.M., Drapalyuk M.V. Improving the Technology of Reforestation in Cuttings with the Use of Energy-Efficient Tractors. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 117–133. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-117-133

Keywords: reforestation, reforestation technology, cutting, stump uprooting, clearing of cuttings, forest machine, mulching, stump crushing, energy-efficient tractor.

Введение

В последнее время все чаще высказывается мнение о необходимости восстановления производства техники для лесного хозяйства, проектирование и разработка которой были прекращены в годы перестройки. Однако возобновлять производство значительной части машин, орудий и лесохозяйственных тракторов ЛХТ-55А и ЛХТ-4 вряд ли целесообразно, поскольку эта техника за последнюю четверть века устарела и не соответствует современным задачам и требованиям.

Лесному хозяйству необходимы технологии и специальные лесные машины, работающие по принципу «меньше задач – больше отдачи» на основе широкомасштабного использования научно-технических открытий. Успех может быть достигнут не только за счет техники, но и в не меньшей степени за счет технологий.

Действующая в нашей стране технология лесовосстановления основана на частичной расчистке вырубок от порубочных остатков, валежника и пней в виде полос шириной 2,5...3,0 м с оставлением между ними нерасчищенных кулис такой же ширины [16]. Кулисы заполняются дополнительно древесной массой вместе с почвой, находящейся на пнях, интенсивно зарастают порослью осины, березы, ольхи и других мягколиственных пород, тем самым исключая перемещение машинно-тракторных агрегатов по данной территории. В результате через 2-3 года прекращаются агротехнические уходы и не проводится осветление лесных культур, что отрицательно сказывается на их сохранности. Полосная расчистка не позволяет применять многорядные (многомашинные) агрегаты при подготовке почвы, посадке и агротехнических уходах. Это сдерживает использование современных тракторов тягово-энергетической концепции, т. е. энергонасыщенных, которые стали энергетической базой сельского хозяйства и должны частично заменить известные лесохозяйственные тракторы [6, 7].

Успех в лесовосстановлении может быть достигнут путем применения технологий сплошной расчистки вырубок и сплошной обработки почвы, превращения древесной массы, остающейся после лесозаготовок, в щепу, а затем в органическое удобрение [10] после смешения ее с почвой. Современные научно-технические достижения в области развития техники позволяют удалять пни способами, которые в сравнении с корчеванием значительно менее энергоемки, более производительны и сохраняют экологию природной среды [9].

Целью настоящей работы является снижение вредного воздействия технологии и техники на почву, энерго- и материалоемкости; повышение технико-экономических показателей процесса лесовосстановления за счет совершенствования технологии и разработки перспективных машин, агрегируемых с энергонасыщенными тракторами, позволяющими совмещать технологические

операции и выполнять их за один проход агрегата, увеличивать ширину захвата и рабочие скорости, применять комбинированные машины с рабочими органами пассивного и активного действия [5, 9].

Объекты и методы исследования

Механизация как часть технологии лесовосстановления в годы своего интенсивного развития ограничивалась и оценивалась увеличением производительности на 20–30 %, надежности и долговечности конструкций машин и орудий, соответствием качественных показателей работы агротехническим требованиям и повышением экономической эффективности. Оценка производилась по разработанным и утвержденным стандартам и методикам. Лесоводственно-агротехническая часть технологии практически не менялась, а определялась одним вопросом – не корчевать пни, а если корчевать, то сколько. Энергетическая база лесного хозяйства – это всего лишь 2–3 марки тяжелых, но слабых по мощности гусеничных тракторов, что явилось тормозом в развитии средств механизации и технологии в целом [11].

При разработке новой техники не уделялось должного внимания ее экологическому воздействию на природную среду, в первую очередь на почву, при выполнении таких технологических операций, как удаление порубочных остатков, валежника и пней, подготовка почвы на вырубках. Во время данных видов работ происходят чрезмерное уплотнение почвы, разрушение ее структуры и снижение плодородия, обнажение нижних бесструктурных горизонтов, вынос гумуса за пределы среды обитания лесных культур, локальное заболачивание на месте подпневых ям и др. Существуют различные пути уменьшения негативного воздействия на экологию почв: снижение количества проходов по одному следу, а также сокращение площади вырубki и удельного давления на почву; исключение скольжения движителей тракторов; совмещение технологических операций и их выполнение за счет работы двигателя и вала отбора мощности (ВОМ) трактора, использование современных энергонасыщенных тракторов тягово-энергетической концепции [10]. Это и является задачей проведенных исследований, которые могут быть в дальнейшем приняты за основу методик комплексной оценки новых средств механизации. Исходя из этого, в качестве объекта изучения приняты обе составляющие технологии лесовосстановления на вырубках – лесоводственно-агротехническая и техническая.

Результаты исследования и их обсуждение

В 40–60-е гг. прошлого столетия восстановление леса на вырубках производилось по технологии сплошной корчевки пней и сплошной подготовки почвы. Применялись корчеватели К-1А и К-2А, корчеватель-собирающий Д-210Г, корневычесыватель ВК-1.7. Выкорчеванные пни и корни складировались в валы по периметру вырубki или непосредственно на ее расчищенной части. Затем следовали сплошная вспашка кустарниково-болотным плугом ПКБ-2-54 и двухкратное дискование тяжелой дисковой бороной БДТ-2.2. Порубочные остатки, пни и корни, сдвинутые в валы, вывозили на транспортных средствах. Так территория вырубki превращалась в своего рода сельскохозяйственное поле, на котором в течение двух лет выращивали травы, овес и бахчевые культуры, обогащая почву азотистыми удобрениями и органическими веществами.

Подобная подготовка площади обеспечивала высокий уровень последующих технологических операций (посадка леса, агротехнический и лесоводственный уход, защита леса от вредителей, болезней и пожара) и механизацию работ, проводимых в течение всей жизни культур вплоть до осуществления рубок главного пользования. Густота закладываемых культур при ширине междурядий 2,5 м и шаге посадки 0,75 и 1,00 м составляла 5300...4000 шт./га, что находится в пределах, установленных нормативными документами, 3500...6000 шт./га [21].

Однако из-за больших материально-денежных и трудовых затрат на расчистку вырубок, отсутствия сбыта и глубокой переработки выкорчеванных пней, валы которых постепенно превращались в резерваты вредителей и болезней не только лесных, но и сельскохозяйственных культур на прилегающих полях и являлись источниками повышенной пожарной опасности, в начале 70-х гг. был осуществлен переход на частичную полосную расчистку вырубок. Ширина полос и оставляемых между ними нерасчищаемых кулис составляла по 2,5–3,0 м, т. е. ширина междурядий была, соответственно, 5–6 м, и количество высаживаемых сеянцев оказалось в 2–3 раза меньше нормативных значений.

Для применения этой технологии были разработаны машины и орудия, обеспечивающие комплексную механизацию лесовосстановления и лесоразведения на базе лесохозяйственных тракторов тяговой концепции ЛХТ-55, ЛХТ-4 и ЛХТ-100, а также ряда тракторов-тягачей общего и сельскохозяйственного назначения (Т-100МГС, Т-130, ДТ-75М, ДТ-75Б, МТЗ-80/82, Т-150К). Основным энергетическим средством в условиях работы на вырубках является трактор ЛХТ-55.

Переход на полосную расчистку вырубок снижает затраты только на выполнение одной технологической операции: количество удаляемых пней уменьшается в 2–2,5 раза. Однако во столько же раз снижается первоначальная полнота насаждений, следовательно, практически исключается получение промежуточного экономического эффекта от рубок ухода.

Порубочные остатки, валежник и корчюемые пни с расчищенных полос удаляются в кулисы. Кулисы интенсивно зарастают порослью мягколиственных пород и уже на 2-3-й год становятся тракторонепроходимыми. По этой причине на 3-м году становится невозможным проводить агротехнические уход и осуществлять осветление. Эти операции проводятся частично с помощью ручных мотоинструментов.

Расчищаемые полосы после удаления пней и выравнивания некоторых подпневых ям представляют собой корытообразное понижение в поперечном сечении глубиной 0,1...0,2 м. Обнаженные нижние почвенные горизонты под действием атмосферных осадков легко и быстро заплывают. Вода стекает, заполняет микропонижения, и происходит локальное заболачивание.

В результате всех этих неблагоприятных условий, складывающихся в почве и над почвой, часть культур находится в угнетенном состоянии, вымокает и погибает. Сохранность хвойных культур не превышает 53 % [16], а культур дуба – 18–23 % [2].

Агрегатирование специальных лесных машин разного назначения и разного тягового сопротивления (корчеватели КМ-1А, МРП-2А и ОРВ-1.5; плуги ПКЛ-70, ПЛ-1, ПЛМ-1.3А и ПЛМ-1.5; лесопосадочные машины МЛУ-1А, СЛГ-1А, ЛМД-81К и др.; культиваторы КЛБ-1.7 и КДС-1.8) с одним и тем же

трактором ЛХТ-55 делает его применение неэффективным. Коэффициент загрузки в этом случае составляет всего лишь 0,10–0,46 (табл. 1). В то же время мощность двигателя данного трактора недостаточна для корчевания пней диаметром более 25...35 см [3].

Таблица 1

Показатели использования силы тяги трактора ЛХТ-55 в лесовосстановлении

| Вид работ | Орудие | Рабочая скорость, км/ч | Сила тяги трактора, кН | Сопротивление орудия, кН | Коэффициент использования силы тяги трактора |
|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| Нарезка двухотвальных борозд | Плуг ПКЛ-70 | 4,7 | 32,0 | 12,6 | 0,40 |
| Образование микроповышений | Плуг ПЛМ-1.5 | 3,6 | 45,8 | 21,0 | 0,46 |
| Посадка | Сажалка МЛУ-1А | 1,8 | 56,0 | 11,5 | 0,20 |
| | Сажалка СЛГ-1А | 1,8 | 56,0 | 13,5 | 0,24 |
| Агротехнический уход | Культиватор КЛБ-1.7 | 4,7 | 32,0 | 3,0 | 0,10 |

Таким образом, в лесохозяйственном производстве сложилась проблемная ситуация, из которой возможны несколько выходов. Первое направление – иметь широкий типаж специальных лесных тракторов класса 0,9; 1,4; 2; 3 и 4; 5; 5 и 9, а также самоходное шасси 0,6, степень загрузки каждого из которых должна быть не ниже 0,85. Второе – повышать рабочие скорости и рабочую ширину захвата машинно-тракторных агрегатов с использованием навесных и гидрофицированных прицепных сцепок.

Реализация первого направления за счет разработки и серийного производства полномасштабного типажа тракторов-тягачей лесохозяйственного назначения нецелесообразна, потому что не будет обеспечена их годовая загрузка. Что касается лесных тракторов ЛХТ-55, ЛХТ-4 и ЛХТ-100, то их выпуск прекращен. Поэтому энергетическая база лесного хозяйства в настоящее время и в будущем может быть представлена современными тракторами тягово-энергетической концепции, ставшими основой развития механизации сельского хозяйства [18].

Коэффициент энергонасыщенности тракторов тягово-энергетической концепции составляет для гусеничных 2,12...2,61 и колесных 1,5...1,75 кВт/кН [17]. Энергонасыщенность гусеничных тракторов-тягачей ЛХТ-55 и ДТ-75М равна 0,5 и 1,05 кВт/кН соответственно, т. е. меньше в 2 раза.

В тракторах тягово-энергетической концепции в отличие от тракторов-тягачей мощность двигателя реализуется не только через движители, создавая этим самым силу тяги, но и через устройства отбора мощности для механического или гидравлического привода рабочих органов активного типа. Энергонасыщенность трактора тягово-энергетической концепции позволяет выполнять одновременно несколько технологических операций за один проход машинно-тракторного агрегата, увеличивать рабочие скорости, производительность в кратное число раз, используя многорядные и широкозахватные агрегаты, заменяя при этом 2–3 трактора меньшего класса тяги [1]. Практический интерес для лесного хозяйства представляют такие марки энергонасыщенных тракторов, как МТЗ-622, МТЗ-311М, МТЗ-1221, МТЗ-952.2, МТЗ-320.4, и ряд других.

Также остаются востребованными и выпускаемые заводами широко известные МТЗ-80/82 и гусеничный «Агромаш 90 ТГ». Энергонасыщенность этих тракторов 1,54...1,90 (табл. 2).

Таблица 2

Энергонасыщенность тракторов общего назначения Минского тракторного завода

| Показатель | МТЗ-320.4 | МТЗ-622 | МТЗ-1220 | МТЗ-952.2 | МТЗ-1221 | МТЗ-80 |
|--|-----------|---------|----------|-----------|----------|--------|
| Мощность двигателя, кВт | 26,5 | 46,0 | 82,3 | 66,0 | 96,0 | 59,0 |
| Эксплуатационный вес трактора, кН | 17,2 | 24,1 | 46,0 | 41,0 | 53,0 | 31,6 |
| Коэффициент энергонасыщенности, кВт/кН | 1,54 | 1,90 | 1,80 | 1,61 | 1,61 | 1,87 |

Эти тракторы могут быть тягово-энергетическими средствами для выполнения следующих видов работ: расчистка вырубок от порубочных остатков, подготовка почвы, посадка и посев, агротехнический и лесоводственный уход, опрыскивание и опыливание насаждений, прокладка противопожарных минерализованных полос, тушение низовых лесных пожаров. Универсально-пропашные тракторы RSM 320, RSM 340, RSM 370 и RSM 400, выпускаемые заводом «Ростсельмаш», могут быть применены для удаления как надземной части пней, так и вместе с корнями на глубине, что обеспечивает высокое качество подготовки почвы, посадки лесных культур и ухода за ними; для тушения наземных лесных пожаров почвогрунтом. Мощность двигателей этих тракторов 243,6...292,0 кВт, коэффициент энергонасыщенности – 1,97...2,15 кВт/кН.

Однако энергонасыщенные тракторы не вписываются в технологию полосной расчистки вырубок и в существующие комплексы машин. Такие тракторы эффективны в технологиях, разработанных для открытых площадей, свободных от механических препятствий и обеспечивающих высокую маневренность широкозахватных машинно-тракторных агрегатов.

Подобные условия в лесовосстановлении могут быть созданы в варианте сплошной расчистки вырубок, но в отличие от ранее применяемой в лесном хозяйстве технологии будут базироваться на совершенно новых научно-технических достижениях, обеспечивающих комплексную механизацию лесовосстановления и ведения хозяйства в лесу, а также минимизацию энергоресурсных затрат; сохраняющих экологию природной среды в процессе удаления порубочных остатков, пней и подготовки почвы; повышающих эффективность использования машинно-тракторных агрегатов.

Основной способ удаления пней – механический, осуществляемый в настоящее время корчевательными машинами (корчевателями и корчевателями-собирающими) рычажного типа. В основе этого способа лежит принцип вытягивания пня из почвы путем статистического и динамического воздействий, приложенных к пню в наклонном, горизонтальном и вертикальном направлениях [25, 27]. В частности, широко известные корчевальные машины КМ-1А и МРП-2А работают по принципу наклонного приложения силы к пню [24, 26].

Корчевка пней весьма трудоемкий, энергоемкий и малопроизводительный процесс, состоящий из нескольких операций: подход машины к пню, заглубление рабочего органа в почву, вытягивание пня (одновременно

в вертикальной и горизонтальной плоскостях), трелевка выкорчеванного пня к месту вывозки пней подъемно-транспортными средствами, возврат и установка машины в исходное положение для продолжения работы.

На усилии извлечения пня из почвы влияет большое количество факторов: порода дерева, размер пня, форма и параметры корневой системы, наличие корневых лап, тип, влажность и плотность почвы и др. При вытягивании пня в его корнях создаются напряжения растяжения, их величина возрастает по мере увеличения сил воздействия рабочего органа корчевальной машины до предела прочности, превышение которого приводит к разрыву корней, и, таким образом, их верхняя часть теряет контакт со средой своего обитания.

Пни диаметром 34...41 см извлекаются из почвы усилием 87,5...120 кН и более. Длительность процесса корчевки пня достигает 20–30 мин [14]. Пни диаметром более 25 см, особенно таких пород как дуб, клен остролистный и др., корчуют с нескольких заходов, маневрируя вокруг пня до 14 раз. При каждом заходе цикл рабочего процесса корчевальной машины повторяется, производя таким образом постепенный обрыв корней по периметру пня [22]. Это является главной причиной низкой производительности корчевателя, которая с учетом трелевки и заполнения подпневых ям почвогрунтом составляет 0,15–0,22 га в смену или 12–20 пней в час сменного времени [13]. С целью уменьшения сопротивления пня корчеванию и повышения производительности корчевателя предложена предварительная подрезка корней [20]. Однако это не решает проблему, а еще больше усложняет работу, поскольку увеличивается количество операций и техники.

В странах Европы и Америки при уходах за городскими парками и в зеленом строительстве применяют измельчители пней на месте их нахождения в почве. Рабочие органы используемой в этом случае машины представляют собой дисковую фрезу [31, 34] либо барабан на горизонтальной оси вращения [30, 32] с закрепленными на них резцами. Эти рабочие органы, вращаясь с окружной скоростью 40...100 м/с, измельчают пни путем фрезерования поперек волокон, превращая их в мелкую стружку. Однако у данного способа есть ряд недостатков: большая энергоемкость процесса фрезерования, быстрое затупление резцов при контакте с почвогрунтом, послойное фрезерование сверху-вниз, что приводит к многократным челночным перемещениям и, следовательно, к снижению производительности.

При применении других устройств, действующих по способу вытягивания пней, т. е. как и обычные корчеватели рычажного типа, но с введением вибрации [28, 33], усилие выдергивания может снизиться на 30 %. Однако вибрация приводит к увеличению жесткости конструкции, массы машины и дополнительным существенным затратам по устранению вредного воздействия на оператора.

Особенностью древесины в отличие, например, от металла является различие ее предела прочности в зависимости от направления действия прикладываемых сил относительно волокон – вдоль или поперек. При растяжении вдоль волокон, что имеет место в работе корчевальных машин, предел прочности таких пород, как лиственница, сосна, ель, дуб, береза и осина, равен 125,0; 103,5; 108,0; 138,8; 168,0 и 125,56 кН соответственно. При растяжении поперек волокон в радиальном/тангенциальном направлениях – 5,6/5,2; 5,4/3,5; 5,0/3,2;

8,0/6,5; 11,1/6,5 и 7,4/4,6 кН соответственно, т. е. меньше, чем при растяжении в 25–40 раз [23].

Удаление пней корчевальными машинами сопровождается рядом негативных факторов экологического характера [24]: минерализация и разрушение структуры почвенных слоев, полное удаление гумусового горизонта с 32 % площади вырубki, снижение вдвое – на 15 % и обнажение горизонта – на 6,6 %. Образуются подпневные ямы глубиной от 25–30 см до 70–90 см, заполнение которых почвогрунтом с прилегающих к ним участков производится теми же корчевальными или бульдозерами. Это ведет к еще большей неравномерности распределения гумуса [27, 29]. В процессе буксования движителей корчевальных машин, когда сопротивление пня корчеванию превышает толкающее усилие трактора, происходит интенсивное колеобразование, что увеличивает количество пылеватых частиц [19].

Технология сплошной расчистки вырубok может быть экологически безопасной и экономически выгодной в случае удаления пней полностью или только их надземной части рабочими органами активного действия, производящими фрезерование, высверливание и дробление за счет энергии двигателя трактора, передаваемой через ВОМ или гидропривод. Во время удаления пня трактор по сравнению с корчевальными машинами находится в стояночном положении. Его движители не используются для создания толкающего усилия с целью выдергивания пня из почвы, а являются средством передвижения между остановками.

Наиболее перспективный вариант – дробление пней рабочим органом, действующим на древесину вдоль волокон в тангенциальном направлении. Этот способ по сравнению с фрезерованием и высверливанием менее энергоемкий и более производительный. Данный способ реализован в конструкции машины для удаления пней МУП-4.

Машина МУП-4 – это агрегат, состоящий из трактора ТДТ-55 (ЛХТ-55А) и размещенного впереди рабочего оборудования, включающего ротор-измельчитель в виде усеченного конуса, стрелы длиной 4 м, гидроцилиндров поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На стойках ротора-измельчителя расположены скальвающие ножи, по окружности нижнего основания – подрезающие резцы. Привод ротора-измельчителя от переднего ВОМ трактора производится через карданную передачу, размещенную в трубе стрелы, и конический редуктор.

Рабочий процесс дробления осуществляется, когда трактор находится в стояночном положении. При вращении ротора-измельчителя с окружной скоростью до 40 м/с и перемещении его в горизонтальной плоскости над поверхностью земли происходят одновременно подрезание пня резцами и дробление ножами по линиям наименьшего сопротивления в тангенциальном направлении, т. е. вдоль волокон, на древесные фракции в виде щепы, отбрасываемой на расстояние до 30 м.

В зависимости от диаметра, физического состояния пня, параметров и формы его комлевой части оператор машины МУП-4 регулирует скорость подачи и частоту вращения ротора-измельчителя. После окончания дробления пня стрелу с ротором-измельчителем переводят в транспортное положение и осуществляют переезд к следующему пню или группе пней.

Испытания, проведенные на лесных вырубках в зоне смешанных лесов, показали, что машина МУП-4 удаляет надземную часть пней осины, березы и сосны диаметром 28...37 см за 20...26 с; дуба семенного происхождения диаметром 30...42 см – за 17...32 с, а двойчатки и тройчатки порослевого происхождения – в несколько приемов за 55...70 с. Производительность МУП-4 по сравнению с корчевальной машиной КМ-1А выше в 7–10 раз [12, 15].

Вместе с тем были выявлены некоторые недостатки: вибрация при дроблении пней твердолиственных пород; трудности в наведении рабочего органа относительно пня и, как следствие, некачественное дробление пней с увеличением частоты маневрирования всего агрегата в целом; агрегатирование с гусеничным трактором устаревшей марки; ограниченность в применении по глубине дробления из-за недостаточной износостойкости резцов в условиях абразивной среды [8, 10].

Большинство отмеченных недостатков устранены в модернизированном образце машины МУП-4А (рис. 1): увеличено количество подрезающих ножей; скальвающие ножи размещены по винтовой линии и имеют дугообразную режущую кромку [12]. Механический привод заменен на гидравлический, вместо стрелы постоянной длины установлен гидроманипулятор телескопического типа ЛВ-210 (Майкопский машиностроительный завод), длина стрелы которого переменна – 2,7...5,4 м, что увеличивает количество удаляемых пней с одной рабочей позиции агрегата в пределах полосы шириной, ограниченной изменяемым вылетом стрелы и углом поворота в 170°. Машина МУП-4А агрегатируется с колесными тракторами ЛТЗ-60, МТЗ-622 класса 0,9. Мощность, потребляемая на дробление пней, составляет 9...12 кВт.

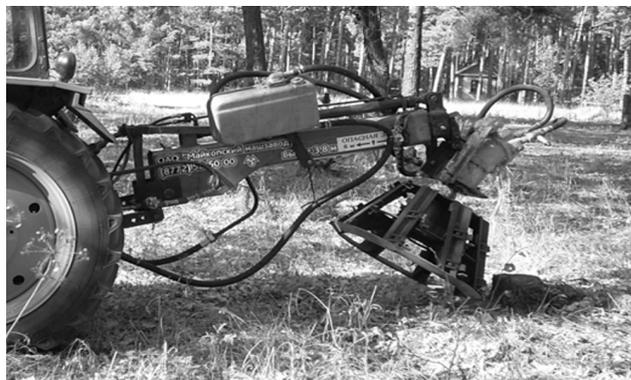


Рис. 1. Модернизированный образец машины МУП-4А

Fig. 1. Upgraded model of the MUP-4A machine

С целью дробления не только надземной части пней, но и находящейся в почве на глубине 0,15...0,20 м, и снижения износа режущих и скальвающих ножей разработана машина [4] (рис. 2), состоящая из двух модулей: очистителя от почвы 5 и измельчителя пней 1, соединенных со стрелой гидроманипулятора 8 на раме 2. В состав управления агрегатом входят гидроцилиндр поворота рамы 3, гидроцилиндр перемещения измельчителя в зависимости от диаметра пней 15, гидромоторы привода измельчителя 9 и секций очистителя 4 через цепную передачу 11 и шарниры Гука 6. Расхождение и схождение секций очистителя в зависимости от диаметра пней производится гидроцилиндром 15, жестко соединенным с рамой 2 через двухплечие рычаги 13 шарнирами 12 и поводкой 14. Измельчитель соединен с рамой с возможностью перемещения в вертикальной

плоскости гидроцилиндром 10 до момента его установки, когда рабочая поверхность займет положение, параллельное поверхности пня, т. е. установится вертикально. Вылет стрелы изменяется гидроцилиндром 7.

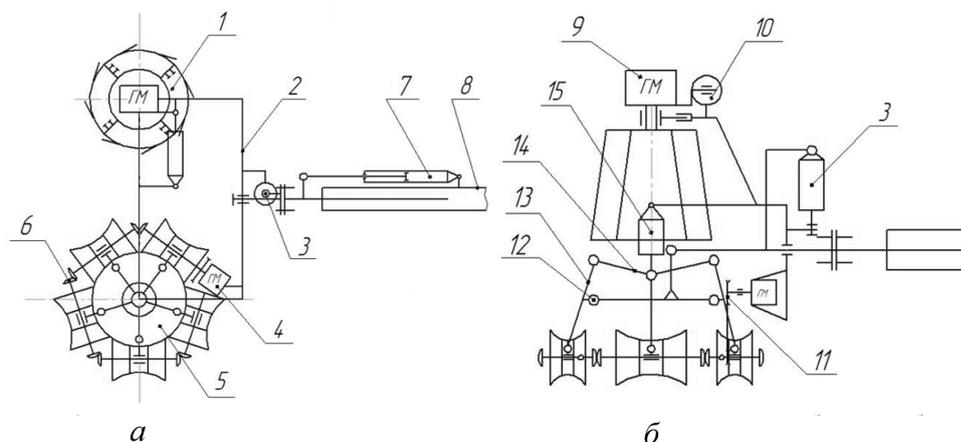


Рис. 2. Двухмодульная машина для удаления пней: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку

Fig. 2. Two-module machine for removing stumps: *a* – top view; *b* – side view

Оба модуля установлены на раме в виде качающегося коромысла, на концах которого размещены модули, работающие поочередно. Сначала очиститель удаляет почвогрунт вокруг пня в радиусе до 0,9 м на глубину до 0,2 м, а затем приходит в действие измельчитель.

Сочетание в одной конструкции рабочих органов для очистки пней от почвы, образования площадки-углубления вокруг пней и затем их дробления снижает денежные затраты, трудо- и материалоемкость процесса удаления пней и обеспечивает эффективное использование энергетических ресурсов.

После удаления пней на всей культивируемой площади на глубине 5–7 см производится сплошное измельчение порубочных остатков, валежника. В случае обнаружения оставшейся части пня применяется мобильный мульчер BERTY EFX/DT (Италия), агрегируемый с трактором МТЗ-1221. Происходит интенсивное перемешивание щепы с верхним слоем почвы. Ширина захвата мульчера 2,3 м, рабочие скорости – до 5 км/ч.

В комплексе с модернизированной машиной для дробления пней МУП-4А BERTY EFX/DT работает борона дисковая клавишная БДК-2.5 (рис. 3), спроектированная в Воронежском государственном лесотехническом университете.

Глубина сплошной обработки почвы 15...17 см. Оставшиеся в земле части пней и их корней не оказывают отрицательного влияния на качество работы. Двукратность во взаимноперпендикулярных проходах агрегата приводит к подавлению корнеотпрысковой способности осины и к образованию слоя хорошо разрыхленной почвы, в том числе и над оставшейся в земле частью пня. Толщина разрыхленного слоя при расположении пней на глубине до 0,15...0,20 м с учетом вспушенности после сплошной основной обработки достаточна для беспрепятственного действия лесопосадочных машин и культиваторов при осуществлении уходов в лесных культурах.



Рис. 3. Борона дисковая клавишная БДК-2.5

Fig. 3. Key-actuated disk harrow BDK-2.5

Таким образом, модернизированная машина МУП-4А, мульчер BERTY EFX/DT и борона дисковая клавишная БДК-2.5 превращают вырубку в поверхность, на которой нет препятствий. Это создает условия для механизированной посадки растений прямолинейными и параллельными рядами с заданной шириной междурядий и дает возможность выполнять работы широкозахватными и многорядными агрегатами на повышенных скоростях, эффективно использовать современные энергонасыщенные колесные тракторы разных по мощности и силе тяги моделей.

Новая технология по удельной металлоемкости и удельной энергоёмкости (табл. 3) в 6,6 и 1,9 раза соответственно эффективнее действующей технологии (табл. 4) и предполагает меньшее количество операций. Исключаются сдвиг и трелевка пней в сторону, очистка их от почвы и заравнивание подпневных ям, сбор и трелевка порубочных остатков и валежника в валы, последующие погрузка и транспортирование их за пределы вырубков. Замена корчевки пней на их дробление снижает энергоёмкость процесса почти в 3,5 раза, а металлоёмкость – в 12 раз.

Таблица 3

Существующая полосная технология лесовосстановления (ширина полос – 2,5 м; ширина кулис – 2,5 м; ширина междурядий – 5 м)

| Операция | Агрегат | | G, кг | N, кВт | W, га/смену | G/W, кг/га | N/W, кВт/га |
|---|---------|---------|----------|-----------|----------------|---------------|----------------|
| | трактор | машина | | | | | |
| Расчистка вырубков от порубочных остатков | ЛХТ-55 | ПС-2.4 | 10900 | 46 | 2,38 | 4500 | 19,4 |
| Корчевание пней, сдвиги их в кулисы, заравнивание подпневных ям | ЛХТ-55 | КМ-1А | 10500 | 46 | 0,21 | 50000 | 218,0 |
| Нарезка двухотвальных борозд | ЛХТ-55 | ПКЛ-70 | 9800 | 46 | 11,50 | 852 | 4,0 |
| Посадка культур | ЛХТ-55 | МЛУ-1А | 9750 | 46 | 4,30 | 2035 | 10,6 |
| Агротехнический уход | ЛХТ-55 | КЛБ-1,7 | 9700 | 46 | 15,10 | 642 | 3,0 |
| <i>Итого</i> | – | – | – | – | – | 58029 | 255 |

Примечание: G – масса агрегата; N – мощность двигателя трактора; W – производительность агрегата; G/W – удельная металлоёмкость технологической операции; N/W – удельная энергоёмкость операции.

Таблица 4

Предлагаемая технология лесовосстановления (ширина междурядий – 2,5 м)

| Операция | Агрегат | | | | G, кг | N, кВт | W, га/смена | G/W, кг/га | N/W, кВт/га |
|---|--------------|----------------------|--------|---|----------|-----------|----------------|---------------|----------------|
| | Трактор | Машина | Сцепка | n | | | | | |
| Дробление пней на глубину до 0,15...0,20 м | МТЗ-1220 | МУП-4А | – | – | 5100 | 82,3 | 1,26 | 4048 | 65,3 |
| Измельчение порубочных остатков | МТЗ-1221 | Мульчер BERTU EFX/DT | – | – | 5460 | 96,0 | 2,40 | 2275 | 40,0 |
| Сплошная обработка почвы. Глубина обработки 17 см. Двухкратный проход | МТЗ-1220 | БДК-2.5 | – | – | 5500 | 82,3 | 8,40 | 654 | 9,8 |
| | МТЗ-1220 | БДК-2.5 | – | – | 5500 | 82,3 | 8,40 | 654 | 9,8 |
| Посадка культур | Агромаш-90ТГ | МЛУ-1А | СН-75 | 3 | 7450 | 66,0 | 8,60 | 832 | 7,7 |
| Агротехнический уход | МТЗ-1220 | КЛ-2,6 | СН-35М | 3 | 5400 | 82,3 | 15,00 | 360 | 5,5 |
| <i>Итого</i> | – | – | – | – | – | – | – | 8823 | 138,1 |

Примечание: n – количество машин в агрегате; СН-75 – полунавесная гидрофицированная сцепка.

Заключение

Сплошная расчистка вырубок от пней путем дробления их на мелкие фракции по линиям наименьшего сопротивления, т. е. вдоль волокон в тангенциальном направлении, на глубине до 15...20 см с разбрасыванием щепы по поверхности почвы и последующее сплошное измельчение порубочных остатков и валежника мобильными мульчерами делают возможным: осуществление на высоком агролесокультурном уровне сплошной обработки почвы, посадки, агротехнических уходов, осветления и других видов рубок ухода; применение современных сельскохозяйственных энергонасыщенных тракторов тягово-энергетической концепции с загрузкой их не ниже 75...85 % за счет совмещения технологических операций и выполнения их комбинированными навесными и полунавесными машинами за один проход и на повышенных скоростях; использование многомашинных (многорядных) агрегатов и полунавесных гидрофицированных сцепок типа СН-75, СН-35М и др. Эти выводы подтверждены научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами,

проведенными учеными Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова. Результаты, полученные по модернизированной машине МУП-4А, мобильным мульчерам BERTY EFX/DT, разработанным бороне дисковой клавишной БДК-2.5, очищающей и измельчающей пни на глубине 15...20 см комбинированной машине, лесопосадочным машинам, работающему на повышенных скоростях комбинированному культиватору, подтверждают целесообразность и эффективность перехода на сплошное освоение под лесные культуры не только вырубок, но и горельников. Основным направлением дальнейших исследований должны быть разработка, промышленное производство и применение комбинированных машин и агрегатов, приводимых в действие мощностью двигателей тракторов тягово-энергетической концепции, реализуемой одновременно через их движители и оборудование отбора и передачи мощности. Сплошное освоение вырубок и превращение их в своего рода поле позволяет отказаться от разработки и производства специальных лесных тракторов, т. к. здесь вполне приемлемы современные сельскохозяйственные тракторы тягово-энергетической концепции, типаж которых достаточен не только для лесовосстановления на вырубках и горельниках, но и для сбора лесных семян, производства посадочного материала в питомниках, защиты леса от вредителей, болезней и пожаров. В пользу заимствования тракторов сельскохозяйственного назначения различного класса тяги в качестве энергетической базы для лесного хозяйства говорит и то, что данные тракторы являются колесными, а это делает их маневренными, высокоскоростными и независимыми в плане переброски с одного места работы на другое. Они также характеризуются низким удельным давлением на почву, высокой проходимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агеев Л.Е., Бахриев С.Х. Эксплуатация энергонасыщенных тракторов. М.: Агропромиздат, 1991. 271 с. Ageyev L.E., Bakhriyev S.Kh. *Operation of High-Energy Tractors*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1991. 271 p.
2. Алентьев П.Н. Проблемы повышения эффективности лесных культур на вырубках, зарастающих лиственными породами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2005. № 6. С. 37–43. Alentjev P.N. Problems of Increasing Efficiency of Forest Cultures on Cleared Space Overgrown by Deciduous Species. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2005, no. 6, pp. 37–43. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b3a/b3a55c4e49c7e27ee4bc438d48587346.pdf>
3. Алябьев А.Ф. Обоснование технологических комплексов машин для лесовосстановления: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 267 с. Alyab'yev A.F. *Substantiation of Technological Complexes of Machines for Reforestation*: Monograph. Moscow, MGUL Publ., 2010. 267 p.
4. Бартнев И.М. Экологизация процесса освоения вырубок под лесные культуры // Лесотехн. журн. 2012. № 1(5). С. 21–27. Bartenev I.M. Ecologization of Process of Developing Cuttings for Forest Cultures. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2012, no. 1(5). pp. 21–27.
5. Бартнев И.М. Природоохранные технологии лесопользования и лесовосстановления // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. № 3, ч. 4(8-4). С. 121–126. Bartenev I.M. Environmental Technologies for Forest Management and Reforestation. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka*:

teoria i praktika [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, no. 3, part 4(8-4), pp. 121–126. DOI: <https://doi.org/10.12737/4354>

6. Бартенеv И.М., Драпалюк М.В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехн. журн. 2012. № 1(5). С. 61–66. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V. Reducing the Harmful Effects of Forest Harvesting Machines and Tractors on the Soil and Plantations. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2012, no. 1(5), pp. 61–66.

7. Бартенеv И.М., Поздняков Е.В. Площадкоделатель вокруг пней // Лесотехн. журн. 2014. № 1(13). С. 156–158. Bartenev I.M., Pozdnyakov E.V. Patch-Maker around the Stumps. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, no. 1(13), pp. 156–158. DOI: <https://doi.org/10.12737/3361>

8. Бартенеv И.М., Родин С.А. Экологизация технологий и машин лесного комплекса. Пушкино: ВНИИЛМ, 2001. 87 с. Bartenev I.M., Rodin S.A. *Greening Technologies and Machines of the Forestry Complex*. Pushkino, VNIILM Publ., 2001. 87 p.

9. Бартенеv И.М., Драпалюк М.В., Казаков В.И. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления: моногр. М.: Флинта, 2013. 208 с. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Kazakov V.I. *Improvement of Technologies and Mechanical Equipment for Reforestation*: Monograph. Moscow, Flinta Publ., 2013. 208 p.

10. Бартенеv И.М., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей: моногр. М.: Флинта, 2007. 208 с. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Designs and Parameters of Machines for Clearing Forest Areas*: Monograph. Moscow, Flinta Publ., 2007. 208 p.

11. Беликов Е.В. Обоснование параметров фрезы с гидроприводом для понижения пней твердолиственных пород на лесных участках: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГЛТА. 2010. 16 с. Belikov E.V. *Substantiation of Parameters of a Hydraulically-Driven Cutter for Lowering Hardwood Stumps in Forest Areas*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Voronezh, VGLTA Publ., 2010. 16 p.

12. Винокуров В.Н., Еремин Н.В. Система машин в лесном хозяйстве. М.: Академия, 2004. 320 с. Vinokurov V.N., Eremin N.V. *Machine System in Forestry*. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 320 p.

13. Горячкин В.П. Собрание сочинений. Т. 6. М.: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. 298 с. Goryachkin V.P. *Collected Works*. Vol. 6. Moscow, OGIZ-SEL'KHOZGIZ Publ., 1948. 298 p.

14. Драпалюк М.В., Батищев С.Н., Посметьев В.В. Оптимизация параметров виброударной машины удаления пней // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 12. С. 111–115. Drapalyuk M.V., Batishev S.N., Posmetyev V.V. Parameter Optimization of the Vibroimpact Machine for Stub Removal. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2010, no. 12, pp. 111–115.

15. Калиниченко Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 380 с. Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A. *Reforestation in Clearcuts*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 380 p.

16. Ксенеvич И.П., Кутков Г.М. Технологические основы и техническая концепция тракторов второго поколения // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1982. № 12. С. 26–28. Ksenevich I.P., Kutkov G.M. Technological Basis and Engineering Concept of the Second Generation Tractors. *Traktory i sel'khozaystvennyye mashiny*, 1982, no. 12, pp. 26–28.

17. Кузьмин Н.В. Повышение эффективности работы почвообрабатывающих агрегатов на базе гусеничного трактора тягово-энергетической концепции: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2008. 20 с. Kuz'min N.V. *Improving the Efficiency of Soil Cultivation Units Based on a Caterpillar Tractor of the Traction and Energy Concept*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 2008. 20 p.

18. Куликов М.И. О взаимодействии системы «движитель – грунт – лесная среда» // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2001. № 3. С. 52–55. Kulikov M.I. On the Interaction of the System “Mover – Soil – Forest Environment”. *Trudy lesoinzhernogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2001, no. 3, pp. 52–55. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2001.2275>
19. Новиков С.В. Обоснование параметров и разработка компоновочной схемы оборудования для полосной расчистки вырубок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984. 18 с. Novikov S.V. *Substantiation of Parameters and Development of a Layout Diagram of Equipment for Strip Clearing of Clearcuts*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Leningrad, 1984. 18 p.
20. Патент 2571798 РФ, МПК А01G23/06. Машина для понижения пней: № 2014144688/13: заявл. 05.11.2014; опубл. 20.12.2015 / И.М. Бартнев, М.В. Драпалюк, Л.Д. Бухтояров, Е.В. Поздняков. Bartenev I.M., Drapaljuk M.V., Bukhtojarov L.D., Pozdnjakov E.V. *Machine for Descending Stumps*. Patent RF, no. RU 2571798 C1, 2015.
21. Справочник лесничего / В.Д. Новосельцев, Д.Ф. Горбов, Г.И. Зинов [и др.]; под ред. В.Д. Новосельцева. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 352 с. Novosel'tsev V.D., Gorbov D.F., Zinov G.I. et al. *Handbook of a Forester*. Ed. by V.D. Novosel'tsev. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 352 p.
22. Толмачев А.Н. Исследование работы гусеничного корчевателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 28 с. Tolmachev A.N. *Study of the Caterpillar Grubber Operation*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1975. 28 p.
23. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с. Ugolev B.N. *Wood Science and Commodity Science*. Moscow, MSFU Publ., 2007. 351 p.
24. Филин А.И. Обоснование способов расчистки вырубок под лесные культуры в подзоне южной тайги: автореф. ... канд. с.-х. наук. Л., 1987. 20 с. Filin A.I. *Substantiation of Methods for Clearing Felling Areas for Forest Crops in the Southern Taiga Subzone*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Leningrad, 1987. 20 p.
25. Фокин С.В. О машинах и орудиях по удалению и измельчению пней // Лесн. хоз-во Поволжья. Саратов: СГАУ, 2000. С. 230–232. Fokin S.V. About Machines and Tools for Removing and Crushing Stumps. *Forestry of the Volga Region: Interuniversity Collection of Academic Papers*. Saratov, SSAU Publ., 2000. pp. 230–232.
26. Фокин С.В., Цыплаков В.В. К технологии полосной расчистки нераскорчеванных вырубок в степной и лесостепной зонах // Вестн. Саратов. госагроун-та им. Н.И. Вавилова. 2007. № 4. С. 91–92. Fokin S.V., Tsyplakov V.V. To the Question of Belt Clearing of the Unstubbing Clearings in the Steppe and Forest-Steppe Zones. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* [The Bulletin of Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov], 2007, no. 4, pp. 91–92.
27. Beck W. Verwendung Von Gleitschutzketten beim Rucken mit Traktoren. *Beiträge für die Forstwirtschaft*, 1993, no. 4, pp. 175–178.
28. Czupy I. Energetic Comparison of Some Stump-Removing Methods. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 2014, vol. 10, iss. 1, pp. 35–51. DOI: <https://doi.org/10.1556/progress.10.2014.3>
29. Guiraud C. La Mecanisation des reboisements. *Revue Forestière Française*, 1969, no. 1424, pp. 421–428. DOI: <https://doi.org/10.4267/2042/20326>
30. Jain T., Sikkink P., Keefe R., Byrne J. *To Masticate or not: Useful Tips for Treating Forest, Woodland, and Shrubland Vegetation*. General Technical Report RMRS-GTR-381. Fort Collins, CO, Rocky Mountain Research Station. 2018. 55 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-381>

31. Jones P.C., Hawkend J.H. *Stump Grinders*. Austin, USA, 2014. 156 p.
32. Luptáčiková V., Hnilica R., Ťavodová M. Increasing the Life of Mulching Tools. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 414–421. DOI: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.51>.
33. Omdal D.W., Shaw C.G., Jacobi W.R. Evaluation of Three Machines to Remove Armillaria- and Annosum-Infected Stumps. *Western Journal of Applied Forestry*, 2001, vol. 16, iss. 1, pp. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.1093/wjaf/16.1.22>
34. Yao L., Wang Y., Zeng Z., Kan J. Vibration Analysis and Optimization of a Vertical Disc Stump Grinder. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018758577>



УДК 621.7-114

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-134-141

**ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА***А.М. Буглаев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAH-2776-2021](https://orcid.org/0000-0001-6923-4815),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6923-4815>**Брянский государственный технический университет, б-р 50-летия Октября, д. 7,
г. Брянск, Россия, 241035; e-mail: an.buglaev@yandex.ru*

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 09.04.20 / Принята к печати 18.06.20

Аннотация. Выбор эффективных методов и устройств для поверхностного упрочнения дереворежущих инструментов затруднен из-за разнообразия их конструкций и условий эксплуатации. В связи с этим разработка таких устройств становится актуальной задачей. По данным литературы, одним из эффективных способов повышения срока службы деталей машин и инструмента является электроискровое упрочнение, или электроискровое легирование. Для него применяются промышленные электроискровые установки типа «ЭФИ» и «Элитрон» с ручными вибраторами. Однако их использование существенно увеличивает трудоемкость и время упрочнения. Кроме того, качество поверхности после упрочнения этим способом часто бывает неудовлетворительным. С целью уменьшения трудоемкости электроискрового упрочнения разработаны различные механизированные установки. Однако подобные установки предназначены для упрочнения конкретных деталей и не позволяют упрочнять инструменты различных конструкций, в том числе и дереворежущие. Качество поверхности после упрочнения на механизированных установках не всегда удовлетворяет потребителя. Для улучшения свойств поверхности после электроискрового упрочнения зачастую используют дополнительную обработку методами поверхностного пластического деформирования, такими как обкатывание и раскатывание роликами и шариками, а также алмазное выглаживание. Качество поверхности после дополнительной обработки этими методами существенно повышается, однако возрастают трудоемкость и себестоимость процесса упрочнения. Для увеличения износостойкости деталей машин и инструмента целесообразно снижение высотных параметров шероховатости, повышение микротвердости, формирование остаточных напряжений сжатия, что обеспечивается методами поверхностного пластического деформирования. Отсюда вытекает необходимость применения электроискрового упрочнения одновременно с поверхностным пластическим деформированием. Исследованы конструкция и особенности использования устройства для упрочнения инструмента. Устройство применяли для упрочнения ножей рейсмусового станка, что позволило повысить их стойкость на 100 %. По сравнению с электроискровым упрочнением ручным вибратором оно снижает шероховатость упрочненной поверхности и увеличивает качество обработки заготовок. Установлены режимы упрочнения, благодаря которым возможно эффективно упрочнять дереворежущие инструменты.

Для цитирования: Буглаев А.М. Электроискровое упрочнение дереворежущего инструмента // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 134–141. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-134-141

Ключевые слова: электроискровое упрочнение, дереворежущий инструмент, шероховатость, режимы упрочнения, стойкость дереворежущих инструментов, устройство для упрочнения дереворежущего инструмента.

DEVICE FOR WOOD-CUTTING TOOL HARDENING

Anatoly M. Buglaev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAH-2776-2021](https://orcid.org/0000-0001-6923-4815), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6923-4815>

Bryansk State Technical University, b-r 50-letiya Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation; e-mail: an.buglaev@yandex.ru

Original article / Received on April 9, 2020 / Accepted on June 18, 2020

Abstract. Choosing effective methods and devices for surface hardening of wood-cutting tools is problematic due to the variety of their designs and operating conditions. In this regard, the development of such devices becomes an urgent task. According to the literature, one of the effective methods for increasing the service life of machine parts and tools is electrospark hardening or electrospark alloying. Industrial electrospark installations such as “EFI” (electrophysical measurements) and “Elitron” with manual vibrators are used for electrospark hardening. However, using manual vibrators significantly increases the labour intensity and hardening time. Moreover, the surface quality after hardening with manual vibrators is often unsatisfactory. Various mechanized installations have been developed in order to reduce the labour intensity of electrospark hardening. Nevertheless, these installations are designed to harden specific parts and do not allow hardening tools of various designs, including wood-cutting tools. The surface quality after hardening in mechanized installations does not always satisfy the customer. Further surface plastic deformation treatments, such as rolling and unrolling with rollers and balls, as well as diamond burnishing, are often used to improve the surface quality after electrospark hardening. The surface quality after additional processing by these methods boosts, although the labour intensity and cost of the hardening process increase. To increase the wear resistance of machine parts and tools, it is reasonable to reduce the height parameters of roughness, increase microhardness, and form the residual compressive stresses, which is ensured by the methods of surface plastic deformation. In this regard, it becomes necessary to use electrospark hardening simultaneously with surface plastic deformation. The work presents the design and features of using the device for hardening. The device was used to strengthen the thicknesser machine knives, which made it possible to almost double their durability. Applying this device, in comparison with using the electrospark hardening with a manual vibrator, reduces the roughness of the hardened surface and improves the surface quality of the processed workpieces. The modes of hardening have been installed, making it possible to effectively harden wood-cutting tools.

For citation: Buglaev A.M. Device for Wood-Cutting Tool Hardening. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 134–141. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-134-141

Keywords: electrospark hardening, wood-cutting tool, roughness, hardening modes, durability of wood-cutting tools, device for wood-cutting tool hardening.

Введение

Дереворежущие инструменты, такие как строгальные ножи, ножи рейсмусовых и фуговальных станков, фрезы, работают в довольно сложных условиях: высокие скорости резания и ударные нагрузки, возможность попадания абразивных частиц в зону резания – что приводит к их быстрому затуплению [1–4, 11, 17–20, 25–29]. В связи с этим проблема повышения стойкости данных инструментов требует установления методов их упрочнения.

Одним из эффективных методов повышения стойкости дереворежущих инструментов является электроискровое упрочнение с использованием промышленных установок «ЭФИ» и «Элитрон» с ручным вибратором. Однако этот метод имеет существенный недостаток – значительную шероховатость упрочненной поверхности, Ra 2,5 мкм и более, что отрицательно сказывается на стойкости инструментов и качестве обработанных деталей [5–16, 21, 22, 30].

Применение механизированных установок при электроискровом упрочнении не всегда возможно из-за особенностей конструкции упрочняемых деталей машин и дереворежущего инструмента [23]. Качество и износостойкость поверхностей после обработки на механизированных установках остается примерно таким же, как и после электроискрового упрочнения с ручным вибратором.

Дополнительная обработка после электроискрового упрочнения методами поверхностного пластического деформирования (обкатывание, раскатывание, алмазное выглаживание) приводит к повышению трудоемкости и себестоимости упрочнения [24], поэтому возникает необходимость разработки и исследования методов и устройств для упрочнения дереворежущего инструмента.

Объекты и методы исследования

Разработано устройство для упрочнения дереворежущего инструмента, позволяющее уменьшить шероховатость упрочненных поверхностей Ra до 0,16–0,32 мкм.

Устройство (см. рисунок) представляет собой диск-электрод 1, изготовленный из легирующего материала, и диск 2, на котором закреплены ролики 3. Диск-электрод и диск, изолированные друг от друга прокладкой 4, установлены на эластичной втулке 5 и скреплены болтами 6, изолированными от диска-электрода, а также гайками 7. Опытным путем установлены оптимальные размеры роликов: диаметр – 10–20 мм, радиус рабочей части – 2–4 мм, величина вылета роликов – 3–5 мм. Радиус рабочей части диска-электрода целесообразно выполнять равным радиусу рабочей части роликов, скорость вращения инструмента 8–30 м/с.

Положительный полюс источника питания подключают через пружину 8 и щетку 9 к поверхности диска-электрода (анод), отрицательный – к обрабатываемой детали (катоде).

Формирование покрытия осуществляют следующим образом: инструмент закрепляют на валу специального привода или серийного станка (например фрезерного), подсоединяют к источнику питания и включают привод вращения диска. При вращении инструмента выступающий над поверхностью диска-электрода ролик размыкает цепь «анод–катод». При этом высвобождается разряд, сопровождающийся переносом материала диска на поверхность детали, и происходит последующее поверхностное пластическое деформирование незастывшего покрытия роликом.

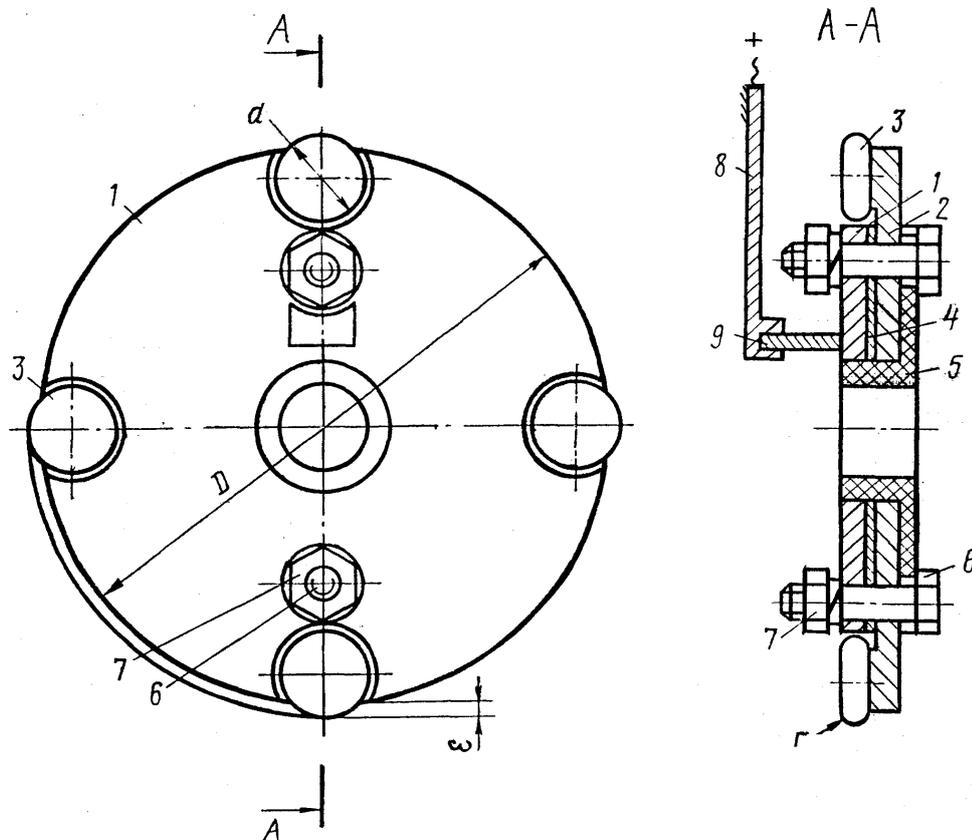


Схема устройства для упрочнения дереворежущего инструмента

Diagram of a device for hardening wood-cutting tools

Под действием эластичной втулки после выхода ролика из контакта с деталью восстанавливается контакт с ней диска-электрода и замыкается цепь «анод–катод». В процессе замыкания происходит новый искровой разряд, обеспечивающий перенос на поверхность детали новой порции легирующего материала, сопровождающийся выглаживанием нанесенного слоя роликом при прохождении тока через участок контакта. Движение подачи детали относительно инструмента производят вручную или механически от привода станка.

Описанное устройство использовали для упрочнения стандартных ножей рейсмусового станка, изготовленных из стали Х6ВФ, по их задней поверхности, на расстояние 10–15 мм, начиная от режущей кромки, с использованием электроискровой установки «Элитрон 22А» и горизонтально-фрезерного станка 6Р82Ш. Испытание ножей выполняли на рейсмусовом станке СР6-7 при обработке сосновых заготовок в течение 8 ч. На ножевой вал устанавливали упрочненный и неупрочненный ножи, что позволяло тестировать их в одинаковых условиях. Износ ножей определяли по изменению радиуса режущей кромки Δr и ширины Δa , замеренных до и после испытаний. Радиус режущей кромки находили с помощью инструментального микроскопа по ее отпечатку на свинцовой пластине, ширину ножа – на оптическом длиннере ИЗВ-2.

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания показали, что значение Δr неупрочненных ножей составило 48–54 мкм, а упрочненных – 27–32 мкм, Δa равна 86–92 мкм у неупрочненных и 47–63 мкм у упрочненных ножей. Эти данные свидетельствуют о снижении износа ножей рейсмусового станка после упрочнения с помощью описанного устройства. Дальнейшая эксплуатация упрочненных ножей показала, что их стойкость составляет в среднем 16 ч, в то время как неупрочненных – только 8 ч.

Электроискровое упрочнение ножей рейсмусового станка с ручным вибратором также позволяет увеличить их срок службы до 16 ч, однако на обработанных поверхностях заготовок визуально можно наблюдать риски. Причиной их появления, как было установлено, являются выступы-шероховатости, сформировавшиеся после упрочнения ножей электроискровым методом с помощью ручного вибратора.

Анализ результатов исследований позволил установить режимы упрочнения: напряжение – 28–32 В; рабочий ток – 0,9–1,0 А; скорость подачи – 4–5 м/с; число проходов – 4–5; скорость вращения электрода-инструмента – 8–30 м/с; материал диска-электрода – твердый сплав ВК60М, ВК6, ВК8; материал деформирующих роликов – твердый сплав ВК20, ВК25.

Заключение

Поверхностное упрочнение дереворежущих инструментов является эффективным способом повышения их срока службы. Однако целесообразность применения того или иного метода поверхностного упрочнения во многом зависит от конструкции инструмента, технологии его изготовления, условий эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость дальнейших исследований с целью разработки и совершенствования методов поверхностного упрочнения, оборудования и устройств для эффективного применения этих методов. Результаты исследований могут быть использованы на производстве для повышения стойкости дереворежущего инструмента и создания банков данных для выбора метода упрочнения дереворежущего инструмента с учетом условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Амалицкий В.В. Деревообрабатывающие станки и инструменты. 5-е изд., стер. М.: Академия, 2009. 400 с. Amalitsky V.V. *Woodworking Machines and Tools*. Moscow, Akademiya Publ., 2009. 400 p.
2. Буглаев А.М., Бокачева М.П. Исследование факторов, влияющих на безопасность станочников деревообрабатывающих станков // Безопасность жизнедеятельности. 2015. № 3. С. 3–6. Buglayev A.M., Bokachyova M.P. Safety – Factor Research of Woodworking Machinery Operators. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti* [Life Safety], 2015, no. 3, pp. 3–6.
3. Буглаев А.М., Бокачева М.П., Сиваков В.В. Станки для обработки круглых сортиментов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 6. С. 122–129. Buglaev A.M., Bokacheva M.P., Sivakov V.V. The Roundwood Assortment Machines. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 6, pp. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.122>

4. Буглаев А.М., Бокачева М.П., Сиваков В.В. Исследование возможности снижения вибрации деревообрабатывающего оборудования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 132–142. Buglaev A.M., Bokacheva M.P., Sivakov V.V. Study into the Feasibility of Reducing Woodworking Equipment Vibration. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.132>
5. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Пушкин И.А. Микрогеометрия и несущая способность поверхности, образованная электроискровой наплавкой // Технология машиностроения. 2001. № 4. С. 29–34. Burumkulov F.Kh., Lyalyakin V.P., Pushkin I.A. Microgeometry and Bearing Capacity of the Surface Formed by Electric Spark Surfacing. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2001, no. 4, pp. 29–34.
6. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Пушкин И.А., Фролов С.Н. Электроискровая обработка металлов – универсальный способ восстановления изношенных деталей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 4. С. 23–28. Burumkulov F.Kh., Lyalyakin V.P., Pushkin I.A., Frolov S.N. Electric Spark Treatment of Metals – Universal Method of Restoring Worn Parts. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, 2001, no. 4, pp. 23–28.
7. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Иванов В.И., Черкасов В.В. Восстановление и упрочнение деталей и инструментов концентрированными источниками тепла // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 9. С. 35–39. Burumkulov F.Kh., Lyalyakin V.P., Ivanov V.I., Cherkasov V.V. Restoration and Hardening of Parts and Tools with Concentrated Heat Sources. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2003, no. 9, pp. 35–39.
8. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с. Burumkulov F.Kh., Lezin P.P., Senin P.V., Ivanov V.I., Velichko S.A., Ionov P.A. *Electrospark Technology for Restoration and Hardening of Machine Parts and Tools (Theory and Practice)*. Saransk, Krasnyy Oktyabr' Publ., 2003, 504 p.
9. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с. Verkhoturov A.D. *The Formation of the Surface Layer on Metals during ESA Process*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1995. 323 p.
10. Гнесин Б.А., Поддубняк В.Я., Бурумкулов Ф.Х., Иванов В.И., Борисенко Е.Б., Гнесин И.Б. Электроискровое легирование поверхности на углеродистых сталях и чугуне с помощью электродов из силицидов молибдена и вольфрама // Материаловедение. 2007. № 7. С. 41–54. Gnesin B.A., Poddubnyak V.Ya., Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Borisenko E.B., Gnesin I.B. Electric-Spark Alloying of Surfaces on Carbon Steels and Cast Iron by Means of Electrodes from Molybdenum and Tungsten Silicides. *Materialovedenie* [Material Science], 2007, no. 7, pp. 41–54.
11. Зотов Г.А., Памфилов Е.А. Повышение стойкости дереворежущего инструмента. М.: Экология, 1991. 304 с. Zotov G.A., Pamfilov E.A. *Increasing the Durability of Woodworking Tools*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 304 p.
12. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Погожев Ю.С., Вакаев П.В., Свиридова Т.А., Замулаева Е.И., Милонич С., Тодорович М. Исследование влияния параметров импульсных разрядов на массоперенос, структуру, состав и свойства электроискровых покрытий на основе TiC-NiAl, модифицированных нанодисперсными компонентами // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2004. № 6. С. 39–46. Levashov E.A., Kudryashov A.E., Pogozhev Yu.S., Vakaev P.V., Sviridova T.A., Zamulaeva E.I., Milonich S., Todorovich M. Investigation of the Effect of Pulsed Discharge Parameters on Mass Transfer, Structure, Composition, and Properties of Electrospark Coatings on Basis of TiC–NiAl Modified by Nanodispersed Components. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy], 2004, no. 6, pp. 39–46.

13. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д., Климов Л.А., Власенко В.Д. Исследование износостойких несплошных покрытий, образованных электроискровым легированием // Трение и износ. 2004. № 6. С. 650–655. Mulin Yu.I., Verkhoturov A.D., Klimova L.A., Vlasenko V.D. Investigation of Discontinuous Wear Resistant Coatings Formed by Spark Alloying. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2004, no. 6, pp. 650–655.

14. Николенко С.В. Наноструктурирование поверхности стали 35 электроискровой обработкой новыми электродными материалами на основе карбида вольфрама с добавкой нанопорошка Al_2O_3 // Вестн. машиностроения. 2011. № 6. С. 47–51. Nikolenko S.V. Surface Nanostructuring of Steel 35 by Electrospark Machining with Electrodes Based on Tungsten Carbide and Added Al_2O_3 Nanopowder. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 2011, no. 6, pp. 47–51. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11060189>

15. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 1995. 218 с. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D. *New Electrode Materials for Electrospark Alloying*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1995. 218 p.

16. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Комарова Г.П. Закономерности образования измененного поверхностного слоя при электроискровом легировании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 4. С. 20–28. Nikolaenko S.V., Verhoturov A.D., Komarova G.P. Laws of Formation of the Changed Superficial Layer at Electrospark Alloying. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2008, no. 4, pp. 20–28.

17. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А. Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 129–141. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A. Possibilities and Prospective Ways to Increase Working Capacity of Forest Sector Machines and Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry journal], 2013, no. 5, pp. 129–141. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/716/le1.pdf>

18. Патент 2573357, МПК В27С 9/04. Станок для обработки бревен: № 2014143820/13; заявл. 29.10.2014; опубл. 20.01.2016 / А.М. Буглаев, М.П. Бокачева, В.В. Сиваков, патентообладатель ФГБОУ ВПО «Брянск. гос. инж.-технол. акад.». 7 с. Buglaev A.M., Bokacheva M.P., Sivakov V.V. *Machine for Log Processing*. Patent RF no. RU 2573357 C1, 2016.

19. Пилюшина Г.А. Повышение износостойкости деталей и инструментов деревообрабатывающего оборудования // Качество и жизнь, 2014. № 1. С. 44–49. Pilyushina G.A. Increase of Wear Resistance of Details and Tools of the Wood Processing Equipment. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and Life], 2014, no. 1, pp. 44–49.

20. Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А., Шевелева Е.В. Повышение износостойкости сучкорезных ножей многооперационных лесозаготовительных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 174–184. Pilyushina G.A., Pamfilov E.A., Shevelova E.V. Wear Resistance Improvement of Delimiting Knives of Multifunctional Logging Machines. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 174–184. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.174>

21. Подлесов В.В. Электроискровое легирование сталей электродными материалами TiC-интерметаллид. Свойства электродов и нанесение покрытий // Электронная обработка материалов. 1995. № 3. С. 9–12. Podlesov V.V. Electrospark Alloying of Steels with Electrode Materials TiC-Intermetallic. Properties of Electrodes and Coating. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 1995, no. 3, pp. 9–12.

22. Пячин С.А., Завадинский В.Г., Пугачевский М.А. Перенос металлов с анода на катод при электроискровом воздействии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 11. С. 7–13. Pyachin S.A., Zavodinsky V.G., Pugachevsky M.A. Transfer of Metals from Anode to Cathode at the Electric Discharge Influence. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2007, no. 11, pp. 7–13.

23. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наук. думка, 1976. 220 с. Samsonov G.V., Verkhoturov A.D., Bovkun G.A., Sychev V.S. *Electrospark Alloying of Metal Surfaces*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1976. 220 p.

24. Технология конструкционных материалов. 6-е изд., испр. и доп. / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, А.Ф. Вязов и др. М.: Машиностроение, 2005. 592 с. Dal'skiy A.M., Barsukova T.M., Vyazov A.F. et al. *Technology of Structural Materials*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2005. 592 p.

25. Axelsson S.Å. The Mechanization of Logging Operations in Sweden and Its Effect on Occupational Safety and Health. *Journal of Forest Engineering*, 1998, vol. 9, iss. 2, pp. 25–31.

26. Darmawan W., Rahayu I.S., Tanaka C., Marchal R. Chemical and Mechanical Wearing of High Speed Steel and Tungsten Carbide Tools by Tropical Woods. *Journal of Tropical Forest Science*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 255–260.

27. Engsås J. *Accidents in Small-Scale Forestry*. Research Note 251. Swedish University of Agricultural Sciences, 1993. 121 p.

28. Liden E. *Forest Machine Contractors in Swedish Industrial Forestry*. Report 195. Garpenberg, Swedish University of Agricultural Sciences, 1995. 43 p.

29. Pamfilov E.A., Pilushina G.A., Polosov V.I. Conditions of Maintenance of Stable Frictional Contact of Submitting Rollers Woodworking Machines. *Proceedings of the BALTRIB 2007 International Scientific Conference*. Kaunas, 2007, pp. 67–71.

30. Topalá P., Slătineanu L., Stoicev P. Physical and Chemical Processes during the Machining by Means of the Electro-Erosive Method. *Nonconventional Technologies Review*. 2010, vol. 14, no. 1, pp. 50–54.

УДК 674.023

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-142-149

ПЛАСТИНЧАТЫЕ АМОРТИЗАТОРЫ-ДЕМПФЕРЫ В НАТЯЖНЫХ УСТРОЙСТВАХ ЛЕНТОЧНОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ

А.Е. Алексеев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ABG-3167-2020](https://orcid.org/0000-0001-7164-5007),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7164-5007>

И.О. Думанский, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAH-8771-2020](https://orcid.org/0000-0002-9277-901X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9277-901X>

А.В. Прохоров, ст. преп.; ResearcherID: [ABG-1913-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-0782),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-0782>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: a.alekseev@narfu.ru, i.dumanskij@narfu.ru, a.prohorov@narfu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 12.04.20 / Принята к печати 26.06.20

Аннотация. Проанализированы преимущества и недостатки ленточнопильных станков. Выявлена связь недостатков с таким параметром, как усилие натяжения ленточной пилы. Ее использование в качестве режущего инструмента приводит к понижению поперечной жесткости и устойчивости режущего участка на рабочей ветви. Это становится причиной колебания ширины реза, снижения геометрической точности пиломатериалов и роста шероховатости боковых поверхностей пропила. Определены основные виды механизмов натяжных устройств, усиливающих натяжение и поддерживающих его стабильность во время работы, описаны распространенные недостатки конструкции. Маслонаполненные пластинчатые металлические амортизаторы-демпферы могут быть использованы для создания компактных и малоинерционных демпферных устройств для ленточнопильных станков с любыми основными механизмами натяжения пильной ленты. Исследовано влияние устройства на уровень динамических колебаний силы натяжения, вызванных искусственным эксцентриситетом натяжного шкива. Оценку эффективности осуществляли путем компьютерного осциллографирования сигнала датчика усилия натяжения и последующей компьютерной обработки полученных осциллограмм. Действенность применения демпферных устройств подтверждается качеством пиления, которое характеризуется более низким уровнем шероховатости боковых поверхностей реза при одновременном сокращении разнотолщинности заготовки. Рассмотрены методы устранения недостатков с помощью различных видов натяжных устройств и оценена эффективность использования демпферных устройств с маслонаполненными пластинчатыми амортизаторами. Приведена методика исследования и параметры экспериментальной установки. Сделаны выводы об эффективности применения демпферных устройств.

Для цитирования: Алексеев А.Е., Думанский И.О., Прохоров А.В. Пластинчатые амортизаторы-демпферы в натяжных устройствах ленточнопильных станков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 142–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-142-149

Ключевые слова: ленточнопильный станок, система натяжения, амортизатор-демпфер, усилие натяжения.

PLATE DAMPERS IN THE TENSIONING UNITS OF BANDSAW MACHINES

Alexandr E. Alekseev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABG-3167-2020](https://orcid.org/0000-0001-7164-5007).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7164-5007>

Igor O. Dumanskij, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAH-8771-2020](https://orcid.org/0000-0002-9277-901X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9277-901X>

Alexey V. Prokhorov, Senior Lecturer; ResearcherID: [ABG-1913-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-0782).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-0782>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: a.alekseev@narfu.ru, i.dumanskij@narfu.ru, a.prokhorov@narfu.ru

Original article / Received on April 12, 2020 / Accepted on June 26, 2020

Abstract. The article analyses strengths and weaknesses of bandsaw machines. While analysing we have found the relationship between the weaknesses and the tension of a band saw. Its use as a cutting tool leads to a decrease in the lateral rigidity and stability of the cutting section on the pulling chain. This leads to fluctuations in the cutting width, a decrease in the geometric accuracy of sawn timber and an increase in the roughness of the side surfaces of a kirf. The main types of tensioning unit mechanisms, which strengthen the tension and maintain its stability during operation, are defined, and common design flaws are described. Oil-filled metal plate dampers promote space-saving and low-inertia dampers for bandsaw machines with any basic saw blade tensioning mechanisms. The influence of the device on the level of dynamic fluctuations of the tensile force caused by the artificial eccentricity of the tension pulley was studied. The efficiency was evaluated by computer oscillography of the tensile load sensor signal and subsequent computer processing of the obtained oscillograms. The effectiveness of using damper devices is confirmed by the quality of sawing, which is characterized by a lower level of roughness of the lateral surfaces of the cut while reducing the variation in thickness of a workpiece. Methods of eliminating flaws with different types of tensioning units are reviewed, and the effectiveness of using oil-filled plate dampers is evaluated. The article presents the research technique and parameters of the experimental unit as well as the conclusions on the effectiveness of damping devices.

For citation: Alekseev A.E., Dumanskij I.O., Prokhorov A.V. Plate Dampers in the Tensioning Units of Bandsaw Machines. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 142–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-142-149

Keywords: bandsaw machine, tension system, dampers, tensile load.

Введение

В современных технологиях лесопиления и деревообработки широко используются ленточнопильные станки (ЛПС). Это связано с их существенными преимуществами по сравнению с другими видами лесопильного оборудования. К таким преимуществам можно отнести высокую производительность, малую ширину пропила, возможность разделки древесины различных (в т. ч. и больших) поперечных размеров, способность обеспечивать криволинейные резы, низкий уровень вибрационных воздействий и т. д. [1, 3, 15, 16]. Однако наряду с неоспоримыми преимуществами ЛПС обладают и рядом серьезных недостатков. Они связаны прежде всего с особенностями рабочего органа ЛПС – ленточной пилы [2, 6, 17, 18]. Использование ее в качестве режущего инструмента

часто приводит к относительно низкой поперечной жесткости и, как следствие, к пониженной устойчивости режущего участка на рабочей ветви. Из-за этого колеблется ширина реза, снижается геометрическая точность пиломатериалов и обрабатываемых заготовок, а также растет шероховатость боковых поверхностей пропила.

Анализ процесса резания ЛПС показывает, что названные недостатки в значительной степени определяются усилием натяжения ленточной пилы, стабильностью этого усилия во время работы и динамикой восстановления усилия после возмущающих воздействий, вызванных изменениями условий резания: переменной твердостью древесины, наличием сучковых участков и околосучковых зон, вариацией влажности и слоистости распиливаемой древесины.

Функцию создания усилия натяжения пильной ленты и поддержания его стабильности в ЛПС выполняет механизм натяжения. Способность механизма натяжения оперативно реагировать на изменение условий резания, т. е. на изменение усилия натяжения, определяется его типом и конструктивными особенностями [11, 13]. В ЛПС используют различные виды таких устройств [1, 3]: механические, рычажно-грузовые, пружинные, гидравлические и пневматические. Анализ их динамических характеристик [4, 6] показывает, что все перечисленные механизмы не обеспечивают необходимого быстродействия, а значит и необходимой реакции на колебания усилия натяжения в процессе резания. Это связано либо с отсутствием демпфирующих способностей конструкции механизма натяжения (механические и рычажно-грузовые), либо со значительными неподрессоренными массами (пружинные), либо с высокой инерционностью системы регулирования и стабилизации усилия натяжения (гидравлические и пневматические) [1, 3].

Одним из рациональных методов устранения отмеченных выше недостатков натяжных механизмов различных типов является дооснащение ЛПС демпферным устройством, которое устанавливается на холостой ветви пильной ленты [1, 10, 14, 19]. Оно состоит из специальных опор скольжения, или роликовых кареток, создающих дополнительное поперечное отклонение пильной ленты от прямолинейного положения и таким образом влияющих на усилие натяжения ленты, причем степень влияния пропорциональна величине отклонения. Ряд авторов [4, 7, 12] предлагают использовать в качестве приводов для подобных устройств адаптивные гидро- и пневмосистемы, управляемые сигналами датчиков усилия натяжения, однако такие системы достаточно сложны, дорогостоящи и малоэффективны ввиду своей инерционности, особенно если они применяются для доработки уже существующих и эксплуатируемых ЛПС.

Известны маслonaполненные пластинчатые металлические амортизаторы-демпферы [5], позволяющие создать простые компактные и поэтому малоинерционные демпферные устройства для ЛПС, которые могут быть применены как в проектируемых конструкциях, так и в уже существующих ЛПС с любыми основными механизмами натяжения пильной ленты. Целью данной работы является оценка эффективности демпферных устройств с маслonaполненными пластинчатыми амортизаторами-демпферами в качестве силовых элементов.

Объекты и методы исследования

Оценку эффективности применения пластинчатых амортизаторов-демпферов в демпферном устройстве ЛПС осуществляли на экспериментальной установке, созданной на базе ленточнопильного станка марки «Стандарт» (Германия) с диаметром шкивов 1000 мм и рычажно-грузовой системой натяжения. В качестве режущего инструмента использовали ленточную пилу с поперечным сечением 1,0×85 мм, шагом зубьев 40 мм и уширением на сторону 0,5 мм. В основной механизм натяжения вмонтировали тензометрический датчик усилия, сигнал с которого через аналого-цифровой преобразователь передавался на компьютер, используемый в качестве регистрирующего прибора. Сигнал обрабатывали и анализировали. На холостой ветви пильной ленты устанавливали дополнительный демпферный механизм, состоящий из траверсы с роликами, подрессоренной маслonaполненным пластинчатым амортизатором-демпфером, закрепленным на перемещаемой ходовым винтом площадке. Это перемещение обеспечивало настройку величины бокового отжима пильной ленты в диапазоне 0...50 мм. Верхний (натяжной) шкив установки дооборудовали приспособлением, дающим возможность получения высокоточного эксцентриситета внешней цилиндрической поверхности относительно оси вращения в диапазоне 0...0,5 мм. Регулируемый эксцентриситет позволял искусственно изменять неравномерность усилия натяжения пильной ленты для экспериментального изучения эффективности демпфирования этой неравномерности.

Экспериментальную оценку эффективности демпферного устройства осуществляли в два этапа. На первом этапе исследовали влияние устройства на уровень динамических колебаний силы натяжения $\Delta N_{\text{дин}}$, вызванных искусственным эксцентриситетом натяжного шкива Δr , равным 0,2 и 0,3 мм. Эффективность демпфирования оценивали сравнением колебаний $\Delta N_{\text{дин}}$ при включенном демпферном устройстве и без него. Среднее значение $\Delta N_{\text{дин}}$ определяли путем компьютерной обработки осциллограмм сигнала датчика усилия. Исследования стабильности усилия натяжения в пильной ленте проводили при статических напряжениях натяжения σ_0 , равных 85 и 110 МПа, при скорости резания 30 м/с и начальных усилиях бокового отжима 3 и 6 кН.

На втором этапе проводили исследования эффективности демпферного устройства в условиях реального технологического процесса пиления. Распиливание подвергали сосновые заготовки с сучковыми зонами и высотой пропила 150 мм, длиной 1200 мм, средней влажностью 10 % при скорости подачи 20 м/мин. Оценку эффективности осуществляли так же, как и на первом этапе, т. е. путем компьютерного осциллографирования сигнала датчика усилия натяжения и последующей компьютерной обработки полученных осциллограмм. Помимо этого, используя теоретическую методику расчета напряженного состояния пильной ленты как передачи с гибкой связью [8, 9, 20], на втором этапе определяли колебания напряжений в материале пильной ленты, а также степень понижения коэффициента запаса прочности при этих колебаниях без демпфирования и с демпфированием.

Результаты исследования и их обсуждение

Планиметрический компьютерный анализ осциллограмм усилия натяжения, полученных на первом этапе эксперимента при показателях эксцентриситета натяжного шкива 0,2 и 0,3 мм и двух начальных уровнях напряжений в пильной ленте (85 и 110 МПа), показывает существенное положительное влияние демпферного устройства на динамические колебания $\Delta N_{\text{дин}}$ (рис. 1, 2). Так, при начальном напряжении $\sigma_0 = 85$ МПа и уровне усилия упругого отжима 4 кН эти колебания при наличии демпфера составили 64 Н по сравнению с 98 Н без демпферного устройства. Увеличение усилия упругого отжима до 6 кН привело к росту эффекта демпфирования. В этом случае колебания усилия натяжения снижались до 53 Н.

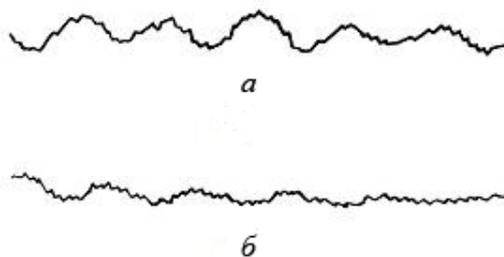


Рис. 1. Осциллограмма динамических колебаний силы натяжения ΔN пильной ленты при напряжении $\sigma_0 = 85$ МПа для эксцентриситета $\Delta r = 0,2$ мм: *a* – без демпфирующего устройства; *б* – с демпфирующим устройством

Fig. 1. Oscillogram of dynamic fluctuations of tensile force ΔN of a saw blade at tension $\sigma_0 = 85$ МПа for eccentricity $\Delta r = 0,2$ mm: *a* – no damping device; *б* – with a damping device

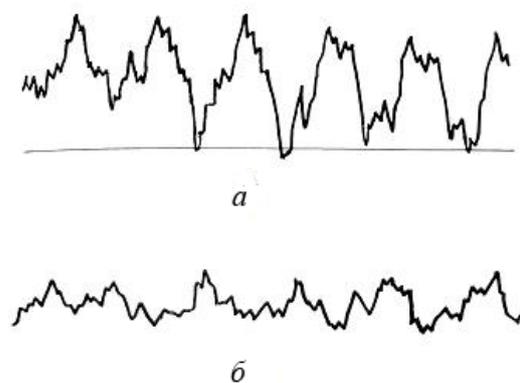


Рис. 2. Осциллограмма динамических колебаний силы натяжения ΔN пильной ленты при напряжении $\sigma_0 = 85$ МПа для эксцентриситета $\Delta r = 0,3$ мм: *a* – без демпфирующего устройства; *б* – с демпфирующим устройством

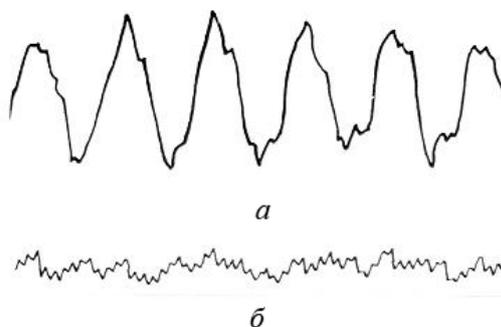
Fig. 2. Oscillogram of dynamic fluctuations of tensile force ΔN of a saw blade at tension $\sigma_0 = 85$ МПа for eccentricity $\Delta r = 0,3$ mm: *a* – no damping device; *б* – with a damping device

К некоторому росту эффекта демпфирования ведет и увеличение начального уровня напряжений в пильной ленте σ_0 до 110 МПа (рис. 3). При этом $\Delta N_{\text{дин}}$ снижается до 48 Н по сравнению с 109 Н без демпфирования.

Оценка изменения напряженного состояния пильной ленты по методике [8, 9] при использовании демпферного устройства также подтверждает положительное влияние демпфирования.

Рис. 3. Осциллограмма динамических колебаний силы натяжения ΔN пильной ленты при напряжении $\sigma_0 = 110$ МПа для эксцентриситета $\Delta r = 0,3$ мм: *a* – без демпфирующего устройства; *б* – с демпфирующим устройством

Fig. 3. Oscillogram of dynamic fluctuations of tensile force ΔN of a saw blade at tension $\sigma_0 = 110$ MPa for eccentricity $\Delta r = 0.3$ mm: *a* – no damping device; *б* – with a damping device



В случае демпфирования колебания напряжений в ленте уменьшаются до 2,6 % по сравнению с 22 % без него. Такую же тенденцию наблюдали и на уровне относительного снижения коэффициента запаса прочности при увеличении эксцентриситета натяжного шкива до 0,3 мм, что в 8,3 раза меньше по сравнению с механизмом натяжения без демпфирования. Подобное замедление эквивалентно повышению долговечности ленточных пил до 1,5–2 раз при эксплуатации ЛПС, оборудованных демпферным устройством.

Анализ осциллограмм усилия натяжения в режиме реального пиления, полученных на втором этапе эксперимента, позволяет сделать заключение, что в процессе врезания рост усилия натяжения достигает 1050 Н без демпфирования по сравнению с 830 Н при наличии демпфирующего механизма. При этом последующее затухание всплеска усилия натяжения от врезания при наличии демпфера наступает через 90–110 мм реза против отсутствия такого затухания на всей длине реза без демпфирования, что говорит о существенном эффекте повышения устойчивости и поперечной жесткости пильной ленты на рабочем участке. Похожее поведение механизма натяжения проявляется и при распиливании сучковых и околосучковых зон.

Эффективность применения демпферных устройств подтверждается ростом качества пиления, которое характеризуется значительно более низким уровнем шероховатости боковых поверхностей реза при одновременном (до 1,4 раза) снижении разнотолщинности заготовки.

Выводы

1. Применение демпфирования с рычажно-грузовой системой натяжения ленточных пил обеспечивает значительное уменьшение динамических нагрузок в механизме резания ленточнопильных станков и создает предпосылки для повышения долговечности инструмента.

2. Введение в систему натяжения демпферного устройства на базе низкочастотного пластинчатого маслonaполненного амортизатора-демпера способствует стабилизации силы натяжения.

3. Демпфирующее устройство в зоне холостой ветви может эффективно снижать влияние возмущающих факторов на динамику механизма резания ленточнопильных станков.

4. С замедлением относительного снижения коэффициента запаса прочности повышение долговечности ленточных пил при использовании демпфирования достигает 1,5–2 раз по сравнению с применением рычажно-грузовой системы натяжения без демпфирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Веселков В.И., Веселкова Б.А., Исупова Т.С. Исследование работоспособности различных конструкций механизмов натяжения пил ленточных станков // Машины и инструменты деревообрабатывающих производств. Л.: ЛТА, 1981. С. 60–64. Veselkov V.I., Veselkova B.A., Isupova T.S. Study of the Performance of Various Designs of Tensioning Mechanisms for Saws of Bandsaw Machines. *Machines and Tools for Woodworking Industries*. Leningrad, LTA Publ., 1981, pp. 60–64.
2. Добрынин Е.Д. Исследование причин аварийного расхода ленточных пил // Механическая технология древесины. Л.: ЛТА, 1976. С. 45–46. Dobrynin E.D. Study of the Causes of Emergency Consumption of Band Saws. *Mechanical Technology of Wood*. Leningrad, LTA Publ., 1976, pp. 45–46.
3. Исупова Т.С. Стабилизация усилия натяжения полотна ленточной пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 1982. № 3. С. 76–79. Isupova T.S. Stabilization of Tensioning Force of Band Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1982, no. 3, pp. 76–79. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1982/%E2%84%963-1982.pdf>
4. Патент на полезную модель 26475 РФ, МПК В27В 13/08. Ленточнопильный станок: № 2002108407/20; заявл. 04.04.2002; опубл. 10.12.2002 / Л.Т. Свиридов, А.И. Максименков, С.Н. Черных, В.И. Соломахин. Sviridov L.T., Maksimenkov A.I., Chernykh S.N., Solomakhin V.I. *Bandsaw Machine*. Patent RF no. RU 26475 U1, 2002.
5. Патент на полезную модель 135041 РФ, МПК F16F 1/32. Упругий элемент: № 2013115964/11; заявл. 09.04.2013; опубл. 27.11.2013 / И.О. Думанский, С.И. Думанский, В.Н. Шиловский, А.В. Прохоров. Dumanskij I.O., Dumanskij S.I., Shilovskiy V.N., Prokhorov A.V. *Springing Element*. Patent RF no. RU 135041 U1, 2013.
6. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 240 с. Prokof'yev G.F. *Intensification of Wood Sawing with Frame and Band Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 240 p.
7. Свиридов Л.Т., Максименков А.И. Ленточнопильное оборудование для лесоматериалов: моногр. Воронеж: ВГЛТА, 2004. 239 с. Sviridov L.T., Maksimenkov A.I. *Band Sawing Equipment for Timber*: Monograph. Voronezh, VGLTA Publ., 2004. 239 p.
8. Феоктистов А.Е. Ленточнопильные станки. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 152 с. Feoktistov A.E. *Bandsaw Machines*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 152 p.
9. Шилько В.К. Совершенствование двушквивных механизмов резания деревообрабатывающих ленточнопильных станков: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2005. 279 с. Shil'ko V.K. *Improvement of Two-Beam Cutting Mechanisms of Woodworking Bandsaw Machines*: Dr. Eng. Sci. Diss. Tomsk, 2005. 279 p.
10. Andersson C., Andersson M.T., Ståhl J.-E. Bandsawing. Part I: Cutting Force Model Including Effects of Positional Errors, Tool Dynamics and Wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, iss. 2, pp. 227–236. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00064-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00064-X)
11. Andersson C., Ståhl J.-E., Hellbergh H. Bandsawing. Part II: Detecting Positional Errors, Tool Dynamics and Wear by Cutting Force Measurement. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, iss. 2, pp. 237–253. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00065-1)
12. Bonac T. *Bandsaw Mechanism*. Patent CA no. CA 1071978 A, 1980.

13. Chen G.J., Ni J., Liu T.T., Chen H.P., Gong Y.P. Study on Optimizing the Process Parameters for the Band Saw Equipment. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 328, pp. 208–212. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.328.208>

14. Gendraud P., Roux J.-C., Berghau J.-M. Vibrations and Stresses in Band Saws: A Review of Literature for Application to the Case of Aluminium-Cutting High-Speed Band Saws. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 135, iss. 1, pp. 109–116. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01109-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01109-3)

15. Kondratyuk A.A., Shilko V.K., Rudnev V.D. Estimation of Band Mill Traction Performances. *Proceedings of the 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS 2004)*. Tomsk, 2005, vol. 3, pp. 24–27.

16. Naguleswaran S., Williams C.J.H. Lateral Vibration of Band-Saw Blades, Pulley Belts and the Like. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1968, vol. 10, iss. 4, pp. 239–250. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(68\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0020-7403(68)90009-X)

17. Sarwar M., Persson M., Hellbergh H. Wear and Failure Modes in the Bandsawing Operation when Cutting Ball-Bearing Steel. *Wear*, 2005, vol. 259, iss. 7-12, pp. 1144–1150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.032>

18. Sarwar M., Persson M., Hellbergh H. Wear of the Cutting Edge in the Bandsawing Operation when Cutting Austenitic 17-7 Stainless Steel. *Wear*, 2007, vol. 263, iss. 7-12, pp. 1438–1441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.066>

19. Thompson P.J. A Theoretical Study of the Cutting Action of Power Hacksaw Blades. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1974, vol. 14, iss. 2, pp. 199–209. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(74\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0020-7357(74)90027-4)

20. Wei C.C., Chung H.Y., Zhang J.B. The Study of Band Sawing Vibration and Cutting Performance. *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 642, pp. 236–241. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.642.236>



УДК 543.635.252

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-150-162

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ КАРТОНА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАХМАЛА ФЕРМЕНТАТИВНЫМ МЕТОДОМ

*И.А. Хадыко, ст. преп.; ResearcherID: [N-1537-2017](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7128-1688>**Е.В. Новожилов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-9738-2015](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3642-3307>**Д.Г. Чухчин, канд. техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-9487-2015](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: i.hadiko@narfu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 30.04.20 / Принята к печати 18.06.20

Аннотация. Ферментативным методом определено количество крахмала в различных образцах гофрокартона: в образце, произведенном из первичных полуфабрикатов, и в гофрокартоне из 100 %-й макулатуры. При ферментативной деструкции крахмала необходимо извлечение его из структуры картона, а процессы сжатия и ороговения целлюлозных волокон уменьшают доступность крахмала для экстракции. Ферментативная обработка требует применения комплексного амилолитического препарата с целью полного гидролиза крахмала до глюкозы. Механическими методами, такими как разволокнение в воде и деструкция в среде жидкого азота, удалось определить соответственно 70 и 84 % крахмала, добавленного на стадии производства гофрокартона, полученного из первичных полуфабрикатов. Для более полного извлечения крахмала необходима экстракция щелочными реагентами. Выполнен анализ влияния щелочной обработки на характеристики волокон макулатурных фракций, полученных на Сухонском целлюлозно-бумажном комбинате. Происходит набухание волокон в щелочи, что приводит к увеличению ширины волокна и его укорочению, а также снижение кристалличности – положительная предпосылка для более полного извлечения крахмала. Данные процессы проходят интенсивнее у коротковолокнистой фракции по сравнению с длиноволокнистой. По стандартной методике SCAN-P 91:09 SCAN-W 13:09 не удалось определить весь крахмал, добавленный на стадии производства гофрокартона из первичных полуфабрикатов. Также обработка по данной методике ведет к деструкции частично гидролизованного крахмала. Наиболее полного извлечения крахмала из гофрокартона удалось достичь в результате проведения двух этапов щелочной экстракции при следующих условиях: 5 %-й раствор NaOH, температура – 20 °С, продолжительность каждой экстракции – 2 ч. В гофрокартоне, произведенном из первичных полуфабрикатов с известным расходом крахмала, при данных условиях обработки удалось определить весь крахмал (22,8 кг/т), в гофрокартоне, сделанном из 100 %-й макулатуры, содержание крахмала составило 48,2 кг/т.

Для цитирования: Хадыко И.А., Новожилов Е.В., Чухчин Д.Г. Влияние предварительной подготовки картона на определение крахмала ферментативным методом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 150–162. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-150-162

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-04-00457 «Поры в анатомических элементах ксилемы высших растений: формирование, морфология и функции».

Благодарность: Работы с применением электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа осуществлены с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ), с применением анализатора L&W Fiber Tester – оборудования ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (САФУ).

Ключевые слова: гофрокартон, крахмал, определение крахмала, амилолитические ферменты, разволокнение, макулатура.

INFLUENCE OF CARDBOARD PRETREATMENT ON THE DETERMINATION OF STARCH CONTENT BY THE ENZYMATIC METHOD

Igor A. Khadyko, Senior Lecturer; ResearcherID: [N-1537-2017](https://orcid.org/0000-0001-7128-1688),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7128-1688>

Evgeny V. Novozhilov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9738-2015](https://orcid.org/0000-0003-3642-3307),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3642-3307>

Dmitry G. Chukhchin, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: i.hadiko@narfu.ru

Original article / Received on April 30, 2020 / Accepted on June 18, 2020

Abstract. We determined the amount of starch by the enzymatic method in different samples of corrugated cardboard, including the sample produced of primary semi-finished products and corrugated cardboard made of 100 % waste paper. For starch enzymatic degradation, it is necessary to extract it from the corrugated board structure, since the processes of compression and keratinization of pulp fibers reduce the availability of starch for extraction. Enzymatic treatment requires the use of a complex amyolytic preparation for complete hydrolysis of starch to glucose. We were able to determine, respectively, 70 and 84 % of starch obtained from primary semi-finished products by mechanical methods, such as defibrillation in water and degradation in a liquid nitrogen medium, and added at the production stage of corrugated cardboard. It was shown that extraction with alkaline agents was necessary for more complete extraction of starch from corrugated cardboard. The influence of alkaline treatment on the characteristics of fibers of waste paper fractions obtained at the Sukhonsky Cardboard and Paper Mill has been analyzed. The fibers swell in alkali, resulting in an increase in fiber width and its shortening, as well as a decrease in crystallinity, which can be a positive opportunity for more complete starch extraction. Fiber swelling and crystallinity reduction are more intensive for the short fiber fraction compared to the long fiber fraction. When determining starch in corrugated cardboard using the standard method SCAN-P 91:09 SCAN-W 13:09 it was not possible to detect all the starch added at the production stage of corrugated cardboard from primary semi-finished products. Also the processing conditions of this methodology lead to degradation of the partially hydrolyzed starch. The most complete extraction of starch from corrugated cardboard was achieved by two stages of alkaline extraction under the following conditions: 5 % NaOH, temperature of 20 °C, the duration of each extraction – 2 h. Under these processing conditions it was possible to determine all the starch (22.8 kg/t) in the corrugated cardboard produced of primary semi-finished products with known consumption of starch; the starch content in the corrugated cardboard produced of 100 % waste paper was 48.2 kg/t.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

For citation: Khadyko I.A., Novozhilov E.V., Chukhchin D.G. Influence of Cardboard Pretreatment on the Determination of Starch Content by the Enzymatic Method. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 150–162. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-150-162

Funding: The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project No. 20-04-00457 “Pits in the Anatomical Elements of the Xylem of Higher Plants: Formation, Morphology and Functions”.

Acknowledgements: The studies with the use of electron microscopy and X-ray structure analysis were carried out using the equipment of the Core Facility Center “Arktika”, NArFU. The studies with the use of L&W Fiber Tester were carried out using the equipment of the Innovative facilities Engineering and Innovation Center “Advanced Northern Bioresources Processing Technologies”, NArFU.

Keywords: corrugated cardboard, starch, starch determination, amylolytic enzymes, defibrillation, waste paper.

Введение

Необходимость снижения себестоимости картоннобумажной продукции ведет к значительному увеличению доли использования вторичного волокна при производстве картона и бумаги. При этом сам гофрокартон и есть один из основных источников вторичного сырья на бумажных фабриках [1].

Для склеивания гофрированных и плоских слоев картона используют крахмал и его производные, которые играют важную роль при дальнейшей переработке картона. Различные виды и производные крахмала также применяются для поверхностной проклейки и увеличения прочности бумаги и картона.

При вторичной переработке макулатуры содержащиеся в ней крахмалопродукты удаляются не полностью, некоторая их часть остается на поверхности и внутри целлюлозных волокон. Это приводит к аккумуляции крахмала в оборотной воде, что становится причиной повышения уровня химического потребления кислорода сточными водами предприятия [3, 11].

В работе [14] был описан эксперимент, наглядно показывающий накопление крахмала при вторичной переработке. На первом этапе из целлюлозы, не содержащей крахмал, изготовили бумагу с добавлением проклеющего агента и 1 % катионного крахмала. Затем бумагу подвергали разволокнению, полученное волокно вновь использовали для производства бумаги с добавлением проклеющего агента и 1 % катионного крахмала. После 7-го цикла в бумаге было определено 2,5 % крахмала.

Остаточный крахмал, содержащийся в макулатуре, оказывает отрицательное влияние на механическую прочность бумажного листа, и удаление крахмала значительно улучшает прочностные характеристики бумажной продукции [2, 4, 6, 7, 19].

Удаление примесей, в т. ч. отработанного крахмального связующего, важно для подготовки макулатурной массы к вторичной переработке на бумажных фабриках. При роспуске гофромакулатуры и размоле крахмалопродукты частично растворяются или диспергируются в водной среде бумажной массы, но основная их часть остается ассоциированной с волокном и не удаляется при фильтрации [5]. Ороговение, сжатие и усадка целлюлозных волокон при сушке гофрокартона способствуют удержанию компонентов клейстера в пористой структуре листа.

При его производстве в процессе сушки часть пор целлюлозных волокон необратимо закрывается, а компоненты, способные проникнуть через них, оказываются запертыми в стенке волокна. При этом меняются их механические и сорбирующие свойства, вследствие чего возникают сложности при повторной переработке таких волокон [8, 15, 18]. Ферментативная обработка позволяет интенсифицировать процесс перехода крахмальных компонентов связующего гофрокартона из макулатурной массы в водную среду.

Для разработки эффективных методов борьбы с отработанными крахмалопродуктами необходимы методы определения крахмала в продукции и технологических потоках.

Крахмал в бумаге можно определить по методике TAPPI T 419 om-11 [17]. Она предполагает разволокнение бумаги и удаление крахмала из полученного волокна сначала на кипящей водяной бане, затем раствором соляной кислоты концентрацией 6 н. при 20 °С. Крахмал в растворе находят иодометрическим методом. Способ имеет ряд существенных недостатков. Иод может вступать в реакцию с остаточным лигнином, сильное влияние на результаты анализа будут оказывать мутность раствора, степень деструкции и тип крахмала, поскольку по данной методике можно определить только природный, окисленный и ферментативно обработанный крахмал.

Катионный крахмал в бумаге, даже в присутствии других типов крахмала, можно установить методом пиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии. Содержание крахмала находят расчетом продуктов пиролиза катионной группы [12].

Перспективными методами определения крахмала в различных средах и объектах являются методы, основанные на действии ферментов амилолитического типа [9, 16]. При последовательном действии α - и глюкоамилаз, крахмал можно полностью гидролизовать до глюкозы, которую определяют различными способами. Для увеличения доступности крахмала действию ферментов необходима его предварительная обработка.

В соответствии со стандартной методикой SCAN-P 91:09 SCAN-W 13:09 [16] (далее – методика SCAN) картон сначала подвергают действию КОН при высокой температуре, после чего проводят ферментативную обработку и определяют глюкозу в растворе.

На кафедре биологии, экологии и биотехнологии Северного (Арктического) федерального университета была разработана методика для определения крахмала в бумаге и картоне (далее – методика САФУ) [10]. На первом этапе проводят их разволокнение. Далее осуществляют экстракцию крахмала раствором NaOH с концентрацией 5 %, затем нейтрализацию щелочи и ферментативную обработку. Также разработан вариант методики для оборотной воды, не включающий щелочную обработку.

При механическом разволокнении картона структура волокон остается целой, и крахмал, сорбированный на поверхности волокон, в основном может оставаться на волокне и не переходить в воду. Для более глубокого разрушения структуры применимо механическое разрушение волокон в жидком азоте [13].

Целью работы было проверить доступность крахмала картона для действия амилолитических ферментов после предварительного механического разрушения структуры картона и применения химических реагентов для извлечения крахмала.

Объекты и методы исследования

Характеристика образцов картона. Для испытаний был выбран трехслойный гофрокартон Архангельского целлюлозно-бумажного комбината марки Т-23 (Кабардинский) массой 450 г/м² (далее – картон АЦБК). Картон произведен из картона крафт-лайнера и гофробумаги, сырьем для которых служили первичные полуфабрикаты (небеленая сульфатная хвойная целлюлоза и лиственная нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза). Оба вида полуфабрикатов изготовлены без добавления крахмала. Расход крахмального связующего, взятого для склеивания слоев гофрокартона, был определен по данным производства. Расчетное количество крахмала составило 22,5 кг на 1 т гофрокартона.

Испытаниям подвергли также трехслойный гофрокартон Брянской бумажной фабрики, изготовленный из вторичного волокна (далее – картон ББФ). При производстве данного картона расход крахмального связующего по данным фабрики составил 15 кг/т товарного продукта.

Для анализа использованы длиноволокнистая и коротковолокнистая фракции (ДВФ и КВФ соответственно), отобранные из производственного потока Сухонского целлюлозно-бумажного комбината.

Характеристика ферментных препаратов. На стадии ферментативной обработки с целью гидролиза крахмала до глюкозы использовали коммерческие амилолитические препараты производства компании Novozymes A/S (Дания). Их характеристики представлены в табл. 1. Оба препарата являются высококонцентрированными, BAN 480 L содержит α -амилазу, Saczyme – глюкоамилазу, а также кислую α -амилазу для полного завершения процесса гидролиза.

Таблица 1

Характеристика ферментных препаратов

| Ферментный препарат | Класс фермента | Активность фермента | Продуцент фермента | Диапазон работы фермента | |
|---------------------|----------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------|
| | | | | Температура, °С | pH |
| BAN 480 L | Амилаза | 480 KNU/g | <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> | 30–75 | 3,0–6,0 |
| Saczyme | Глюкоамилаза | 750 AGU/g | <i>Aspergillus niger</i> | 30–70 | 4,0–6,0 |

Примечание: Единица KNU (Kilo Novo Unit alpha-amylase) – количество фермента, которое в стандартных условиях (pH – 7,1; 37 °С) расщепляет 5,26 г крахмала в ч; единица AGU (Amyloglucosidase Unit) – количество фермента, которое в стандартных условиях (pH – 5,0; 37 °С; концентрация мальтозы – 10 г/л; продолжительность гидролиза – 30 мин) расщепляет 1 мкмоль мальтозы в мин.

Механическое разволокнение образцов картона. Образцы картона разрезали на квадратные кусочки размером примерно 5×5 мм. В течение 60 мин нарезанные кусочки замачивали в дистиллированной воде при концентрации 2 %, температуре 20 °С и периодическом перемешивании. Далее смесь диспергировали трехкратно по 1 мин на миксере фирмы Waring мощностью 330 Вт. Полученную волокнистую массу обезвоживали на воронке Бюхнера с тканым хлопчатобумажным фильтром. Обезвоженную массу разбавляли дистиллированной водой до концентрации волокна 2 %. Полученную суспензию и фильтрат использовали для анализа.

Криомеханическая обработка. Навеску гофрокартона массой 3 г замачивали в 50 мл дистиллированной воды и оставляли на 1 ч для набухания. Ручную мельницу покрывали теплоизоляционным материалом и перед ее рабочим выходом закрепляли пластиковую емкость. Мельницу заполняли жидким азотом на $\frac{1}{4}$ рабочего объема и поддерживали уровень этого газа на протяжении всего эксперимента. Картон вместе с замочной водой переносили в мельницу, где происходила их заморозка. Замороженный картон и лед пропускали через мельницу, затем они попадали в пластиковую емкость перед рабочим выходом мельницы. Далее через мельницу пропускали дополнительно 50 мл воды. Мельницу оставляли для испарения жидкого азота, а также для нагрева размолотого картона и воды до температуры 20 °С. Остатки картона в мельнице вымывали дополнительными 50 мл воды. В итоге в приемной емкости получали суспензию волокон концентрацией 2 %.

Ферментативный гидролиз волокнистой суспензии. В 50 мл волокнистой суспензии добавляли 2,5 см³ 1 М ацетатного буфера с рН 5,0, вносили α -амилазу BAN 480L (0,1 см³ на 100 см³ суспензии) и выдерживали 1 ч при перемешивании и температуре 60 °С, после этого вводили глюкоамилазу Saczyme (0,1 см³ на 100 см³ суспензии) и оставляли еще на 1 ч при той же температуре и перемешивании. На тканном фильтре отделяли и промывали волокно. Фильтрат количественно переносили в мерную колбу вместимостью 200 см³ и разбавляли водой до метки. В полученном фильтрате определяли концентрацию глюкозы и рассчитывали содержание крахмала (X , кг/т) по следующей формуле:

$$X = (DCV \cdot 0,9) / m,$$

где D – разбавление; C – концентрация глюкозы, кг/м³; V – исходный объем суспензии, м³; 0,9 – коэффициент перерасчета глюкозы в крахмал; m – абсолютно сухая масса исходной навески картона, т.

Приготовление раствора крахмала и получение растворов олигосахаридов. Для приготовления основного стандартного раствора крахмала с концентрацией 10 г/л в 10 мл воды размешивали до получения однородной смеси 1 г нативного крахмала, затем этот раствор медленно вливали, перемешивая, в 80 мл воды температурой 100 °С и кипятили 2...3 мин. Раствор пропускали через плотный обеззоленный фильтр, трижды промывали горячей водой, охлаждали до 20 °С и доводили водой до 100 мл. Готовили рабочий раствор крахмала с концентрацией 0,1 г/л, для чего в мерную колбу вместимостью 1000 мл помещали 10 мл основного раствора с концентрацией 10 г/л и доводили до метки дистиллированной водой. Для получения раствора олигосахаридов приготовленный рабочий раствор крахмала обрабатывали ферментом BAN 480L на водяной бане при температуре 60 °С в течение 2 ч.

Методика SCAN-P 91:09 SCAN-W 13:09. Методика предназначена для определения содержания крахмала в бумаге, картоне и технологических водах. Основана на кратковременной высокотемпературной щелочной обработке исследуемого образца в целях извлечения крахмала и увеличения его доступности для действия ферментов, последующем полном ферментативном гидролизе крахмала и определении концентрации образующейся в результате этого глюкозы. Разволокнение образцов картона и бумаги не проводят. Способ описан в [16]. В соответствии с рекомендациями, содержащимися в данном источнике, уровень крахмала для его определения в любых образцах бумаги и картона должен быть не менее 1 кг/т, для технологических вод – превышать 5 мг/л.

Методика САФУ для определения крахмала. Метод основан на двухчасовой щелочной обработке исследуемого образца при нормальной температуре для извлечения крахмала и увеличения его доступности действию ферментов, последующем полном ферментативном гидролизе крахмала и определении концентрации глюкозы, образующейся в результате гидролиза. Образцы бумаги и картона предварительно разволокняют, крахмал определяют как в волокнистой массе, так и в фильтрате. Текст и особенности методики представлены в [10].

Определение концентрации глюкозы. Концентрацию глюкозы в гидролизатах определяли глюкозооксидазно-пероксидазным методом на глюкозиметре «Энзискан-Ультра» (ООО «Лабовэй», Россия). Для проведения измерений рабочий раствор при необходимости предварительно разбавляли до ориентировочной концентрации глюкозы 2 г/л. Прибор позволяет определять глюкозу в растворах при ее концентрации 0,9...5,4 г/л.

Электронная микроскопия. Исследуемые образцы высушивали методом лиофильной сушки на аппарате Labconco Freezone. Для улучшения качества снимков образцов их покрывали слоем золото-палладиевой смеси толщиной до 5 нм с помощью напылительной установки Q 150 T ES (Quorum). Исследования проводили с применением электронного сканирующего микроскопа ZEISS «SIGMA VP».

Рентгеноструктурный анализ. Степень кристалличности фракций макулатурной массы определяли на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 Shimadzu при следующих параметрах: угол измерения Θ 10...70°; скорость измерения – 0,5° в мин; напряжение – 50 кВ; ток – 30 мА; скорость вращения образца – 30 об./мин. Образцы фракций прессовали в таблетки массой 1 г (пресс 10 т), перед прессованием дополнительно не измельчали. Проанализированы воздушно-сухие образцы. При измерениях использовали неотражающий держатель для образцов. Количество точек при расчете кристалличности – 25 и 7.

Определение длины и ширины волокон. Структурно-морфологические характеристики волокон устанавливали на автоматическом анализаторе L&W Fiber Tester.

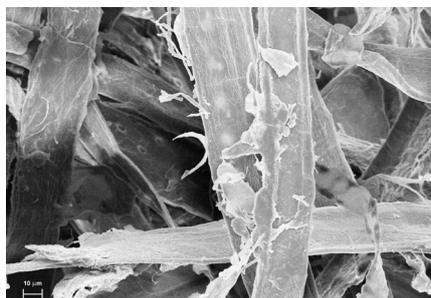
Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке представлены снимки картона АЦБК, подвергнутого криомеханической обработке, а также механическому разволокнению в воде, полученные с помощью электронного микроскопа.

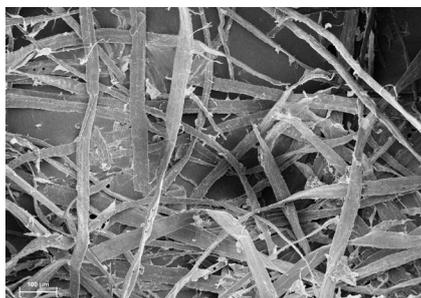
На снимках *а, б* видно сохранение волокнами после разволокнения в воде целостности, присутствие на их поверхности крахмального связующего. На фотографиях *в, г* можно наблюдать, что разрушение волокон при криомеханической обработке идет как в поперечном, так и продольном направлениях.

Обработанный картон и фильтрат после механического разволокнения подвергали ферментативной обработке в 1 цикл без предварительной экстракции реагентами. Количество определенного крахмала представлено в табл. 2.

Предварительное разволокнение картона, а также его криомеханическая дезинтеграция не позволяют определить все количество крахмала, содержащееся в образце картона из первичных полуфабрикатов. Таким образом, уже на первом цикле производства гофрокартона после склейки листов часть крахмалсодержащего связующего проникает в структуру волокон. Стоит учитывать, что крахмал распределяется неравномерно по волокнам и проникает в волокна, находящиеся в зоне склеивания.



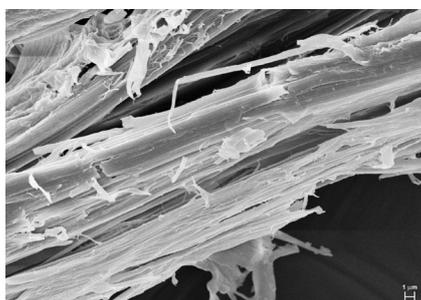
a



б



в



г

Фотографии картона после механического разволокнения в воде (а, б) и криомеханической обработки (в, г)

Photos of cardboard after mechanical defibrillation in water (a, б) and cryomechanical treatment (в, г)

Таблица 2

Определение крахмала в гофрокартоне

| Метод обработки | Количество крахмала, кг/т | |
|------------------------------------|---------------------------|------------|
| | Картон АЦБК | Картон ББФ |
| Криомеханическая | 19,0±0,8 | 32,0±1,0 |
| Механическое разволокнение в воде: | | |
| волокнистая масса | 9,7±0,5 | 21,4±0,7 |
| раствор | 6,2±0,3 | 6,8±0,2 |
| <i>Всего</i> | 15,9±0,8 | 28,2±0,9 |

Образец картона ББФ был полностью из макулатуры. Для картоно-бумажной продукции, изготовленной с добавлением макулатуры, неясным остается количество вторичных волокон в композиции, число предыдущих циклов переработки, уровень содержания крахмала, добавленного и оставшегося в массе макулатуры.

При криомеханической обработке благодаря большему разрушению волокон по сравнению с механическим разволокнением для действия амилолитических ферментов становится доступно дополнительное количество крахмала, вследствие чего криомеханическая обработка позволила определить на 12...16 %

больше крахмала, чем в случае предварительного разволокнения в воде. Для определения содержания крахмала в картоне необходимо применение химических реагентов, обеспечивающих экстракцию крахмала из структуры волокон.

Волокна макулатурной массы подвергаются необратимым изменениям по ходу переработки, что изменяет и характеристики волокон в сравнении с первичным волокном. Макулатурную массу требуется фракционировать с целью повышения качества ее подготовки. Получают, как правило, ДВФ и КВФ. В первые попадают длинные хвойные сульфат-целлюлозные волокна, отличающиеся большей длиной и низкой степенью помола. Разрушенные сульфат-целлюлозные волокна и короткие волокна лиственной нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы формируют КВФ.

Чтобы извлечь крахмал из волокон максимально полно, необходимо провести обработку раствором щелочи. Ее применение обусловлено тем, что в щелочи волокно набухает, «раскрывается», крахмал, содержащийся в волокне, переходит в раствор практически без разрушения.

Для щелочной экстракции (ЩО) крахмала использовали раствор NaOH концентрацией 5 %. Выход волокна после щелочной экстракции составил для ДВФ 83,0 %, для КВФ – 81,8 %. Результаты испытаний на приборе FiberTester волокон фракций ДВФ и КВФ до и после экстракции раствором NaOH представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика волокон ДВФ и КВФ

| Фракция | Стадия | Средняя длина, мм | Средняя ширина, мкм |
|---------|----------|-------------------|---------------------|
| ДВФ | До ЩО | 1,55 | 28,0 |
| | После ЩО | 1,42 | 30,0 |
| КВФ | До ЩО | 1,21 | 27,1 |
| | После ЩО | 1,13 | 28,8 |

Волокна в щелочи набухают, что приводит к увеличению ширины волокна и его некоторому укорочению. Особенно сильно набухают волокна КВФ, о чем свидетельствуют более значительные изменения характеристик этих волокон по сравнению с характеристиками волокон ДВФ.

Волокна КВФ обладают большей кристалличностью по сравнению с волокнами ДВФ (табл. 4).

Таблица 4

Определение кристалличности волокнистых фракций

| Фракция | Обработка | Кристалличность, % (дифрактометр) |
|---------|-----------|-----------------------------------|
| КВФ | – | 57,3 |
| | ЩО | 53,4 |
| ДВФ | – | 54,7 |
| | ЩО | 53,1 |

Высушивание приводит к увеличению значения кристалличности фракций макулатурной массы, что связано с усадкой и ороговением волокон. Степень кристалличности фракций после щелочной обработки стала меньше.

Это обусловлено действием щелочи: волокна набухают в ширину, степень упорядоченности уменьшается. Компоненты крахмала также обладают кристаллическостью. Следовательно, может наблюдаться определенная степень упорядоченности амилозы при упаковке крахмала в структуре ороговевшего волокна.

Определение крахмала в гофрокартоне по методике SCAN. Поскольку нам известно, что картон АЦБК произведен из первичных полуфабрикатов, расход крахмала на производстве, равный 22,5 кг/т, возьмем за 100 % содержания крахмала в данном картоне.

В первой серии опытов анализ проводили в соответствии с методикой SCAN (табл. 5, серия опытов 1). В картоне АЦБК определили 60 % крахмала от добавленного на производстве. Таким образом, не весь крахмал был извлечен при щелочной экстракции.

В картоне ББФ определено в 2 раза больше крахмала, чем было добавлено при его производстве. Можно предполагать, что макулатура, из которой произведен картон, содержала значительное количество крахмала, который остался на волокне с предыдущих циклов производства. Ороговение целлюлозных волокон препятствует удалению крахмалопродуктов из вторичных волокон. Макулатура, сырье для промышленных образцов картона, содержит неизвестное количество крахмала, из-за чего возникают проблемы анализа уровня крахмала и оценки точности его определения.

Поскольку за один цикл щелочной экстракции извлечь весь крахмал не получилось, была проведена вторая серия опытов, в которой осуществили две последовательные экстракции щелочью в соответствии с методикой SCAN (табл. 5, серия опытов 2). Дополнительный цикл обработки позволил извлечь еще 3,3 кг/т крахмала из картона АЦБК и 8,3 кг/т из картона ББФ.

Таблица 5

Определение крахмала в гофрокартоне по методике SCAN

| Серия опытов | Количество крахмала, кг/т | |
|--------------|---------------------------|------------|
| | Картон АЦБК | Картон ББФ |
| 1 | 13,4±0,4 | 30,7±0,7 |
| 2 | 16,7±0,5 | 39,0±0,8 |

Часть крахмального связующего, использованного для склеивания слоев гофрокартона, удалось определить за счет его доступности для экстракции. Но уже после первого цикла производства, крахмал, вероятно, оказался «упакован» внутри структуры клеточных стенок из-за процесса сжатия и усадки волокон при высушивании.

Щелочная обработка не позволила полностью извлечь крахмал. В картоне АЦБК удалось определить только 74 % крахмала, добавленного на стадии производства. Отсутствие стадии разволокнения и короткая продолжительность стадии щелочной экстракции приводят к тому, что структура картона практически сохранена, доступ щелочного реагента к волокнам внутри листа и внутрь самих волокон затруднен. Для ускорения и интенсификации процесса экстракции, а также извлечения крахмала из некоторых композитов применяют температуру 95 °С, что также сокращает продолжительность обра-

ботки. Используют термостабильные амилазы, а для экстракции крахмала из картона – высокотемпературную щелочную обработку, которая может приводить к деструкции компонентов частично разрушенного крахмала.

Чтобы убедиться, что обработка по методике SCAN приводит к деструкции продуктов неполного гидролиза крахмала, был проведен контрольный эксперимент. С помощью препарата α -амилазы получили раствор частично разрушенного крахмала. Первую пробу обрабатывали в щелочной среде по методике SCAN с последующей нейтрализацией щелочи, вторую пробу кипятили для инактивации фермента. Далее осуществляли полный ферментативный гидролиз, устанавливали концентрации глюкозы и крахмала в растворе. В первой пробе, с проведенной щелочной обработкой, было определено только 22 % крахмала от крахмала, определенного во второй пробе, т. е. значительная доля частично гидролизованного крахмала подверглась деструкции и не может быть обнаружена данным методом.

Определение крахмала в гофрокартоне по методике САФУ. Поскольку условия щелочной обработки по методике SCAN не позволяют обнаружить весь крахмал, нами было предложено изменить условия щелочной обработки, а также ввести стадию разволокнения картона для обеспечения доступа щелочи ко всем волокнам исследуемых образцов. Количество крахмала в образцах картона рассчитывали как сумму количеств крахмала, определенных в разволокненной массе и фильтрате. И в волокне, и в воде крахмал находили по методике САФУ (табл. 6). Данные по определению крахмала в картоне АЦБК с применением этого метода были представлены в работе [10]. В табл. 6 обобщены результаты по картонам АЦБК и ББФ.

Таблица 6

Определение крахмала в гофрокартоне после разволокнения

| Стадия определения | Количество крахмала, кг/т | |
|-------------------------------|---------------------------|------------|
| | Картон АЦБК | Картон ББФ |
| В волокне, I цикл экстракции | 15,8±0,7 | 35,5±0,6 |
| В волокне, II цикл экстракции | 0,2±0,1 | 6,1±0,3 |
| В воде | 6,8±0,3 | 6,6±0,3 |
| <i>Сумма</i> | 22,8±0,6 | 48,2±0,7 |

При разволокнении образцов картонов АЦБК и ББФ в воду перешло примерно равное количество крахмала, при этом его общее содержание в картоне ББФ более чем в 2 раза выше, чем в картоне АЦБК. Таким образом, можно сделать вывод, что крахмал в составе картона ББФ менее доступен для механического удаления при разволокнении, поскольку существенная его доля находится внутри структуры волокон, накопивших крахмал предыдущих циклов производства.

При одном цикле щелочной обработки по методике САФУ (табл. 6, I цикл экстракции) было определено 70 % крахмала, добавленного на стадии производства, в картоне ББФ – 74 % от общего количества крахмала, найденного в ходе эксперимента. Промытое волокно после первой щелочной экстракции подвергли второй щелочной обработке с теми же условиями. В образце картона АЦБК дополнительно был извлечен 1 % крахмала от общего количества,

в образце картона ББФ – 13 % от общего найденного количества. Таким образом, крахмал, содержащийся во вторичных волокнах, менее доступен для щелочной экстракции.

В картоне АЦБК по методике САФУ с двумя стадиями щелочной экстракции удалось определить 100 % крахмала, добавленного на стадии производства. В картоне ББФ – 48,2 кг/т крахмала, что на 19 % больше, чем по методике SCAN.

Заключение

Главной сложностью определения крахмала в картоне и бумаге является его труднодоступность для экстракции в раствор. Пористая структура целлюлозных волокон, их сжатие и ороговение при сушке становятся основными причинами закрепления крахмалопродуктов в структуре волокна. Использование таких методов, как разволокнение или разрушение волокон в жидком азоте, является недостаточным для перевода крахмала в раствор: удается определить только 70 и 84 % соответственно от количества крахмала, добавленного на стадии производства для гофрокартона из первичных полуфабрикатов. Необходимо применение щелочных реагентов.

Щелочная экстракция по стандартной методике SCAN-P 91:09 SCAN-W 13:09 не только недостаточна для экстракции всего крахмала, но и ведет к деструкции частично гидролизованного крахмала, хотя он также имеет влияние на технологические параметры бумажных фабрик. Для картона АЦБК по данной методике удалось определить 74 % крахмала.

Практически весь крахмал, который содержится в гофрокартоне и добавлялся на стадии производства, можно определить по методике САФУ, включающей в себя стадию разволокнения, две стадии экстракции крахмала (5 %-й раствор NaOH, 2 ч, 20 °C), нейтрализацию, ферментативный гидролиз до глюкозы и определение глюкозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск: АГТУ, 2007. 1118 с. Dul'kin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. *Current State and Prospects of the Use of Recycled Fiber from Waste Paper in the Global and Domestic Paper Industry*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 1118 p.
2. Дьякова Е.В., Дулькин Д.А., Комаров В.И. Переработка макулатуры. Архангельск: АГТУ, 2009. 172 с. D'yakova E.V., Dul'kin D.A., Komarov V.I. *Waste Paper Recycling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2009. 172 p.
3. Залевская Ю.М., Белик Е.С., Бурмистрова М.В. Проблема очистки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. 2015. Т. 1. С. 137–144. Zalevskaya Yu.M., Belik E.S., Burmistrova M.V. *Wastewater Treatment Pulp and Paper Industry. Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists "Ecology, Scientific and Technological Progress. Urban Studies"*. Perm, PNRPU, 2015, vol. 1, pp. 137–144.
4. Лапин В.В., Смоляков А.И., Кудрина Н.Д. Загрязнения в бумажной массе из 100 % макулатуры: влияние на степень помола и прочность бумаги и картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2001. № 7-8. С. 32–34. Lapin V.V., Smolyakov A.I., Kudrina N.D. *Impurities in Paper Pulp Made of 100 % Waste Paper: Influence on the Degree of Grinding and Strength of Paper and Cardboard*. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2001, no. 7-8, pp. 32–34.

5. Лапин В.В., Смоляков А.И., Кудрина Н.Д. Проблема прочностных свойств бумаги для гофрирования и картона для плоских слоев из 70...100 % макулатуры: роль помола // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2002. № 9-10. С. 32–34. Lapin V.V., Smolyakov A.I., Kudrina N.D. The Problem of Strength Properties of Corrugated Paper and Cardboard for Liners of 70–100 % Waste Paper: The Role of Grinding. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2002, no. 9-10, pp. 32–34.

6. Михайлова О.С., Крякунова Е.В., Канарский А.В., Казаков Я.В., Дулькин Д.А. Влияние ферментативной обработки крахмала картофельного на физико-механические свойства бумаги // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 4. С. 203–207. Mihailova O.S., Kryakounova E.V., Kanarskii A.V., Kazakov Y.V., Dulkin D.A. Effect of Enzymatic Treatment of Potato Starch on the Physical and Mechanical Properties of Paper. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 4, pp. 203–207.

7. Новожилов Е.В. Применение ферментных технологий в целлюлозно-бумажной промышленности: моногр. Архангельск: САФУ, 2013. 364 с. Novozhilov E.V. *Application of Enzyme Technologies in Pulp and Paper Industry*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2013. 364 p.

8. Фляте Д.М. Свойства бумаги. 5-е изд., стер. СПб.: Лань, 2012. 384 с. Flyate D.M. *Properties of Paper*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2012. 384 p.

9. Хадыко И.А., Казаков Я.В., Новожилов Е.В., Канарский А.В. Применение ферментов для оценки биodeградации материалов экспресс методом // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 13. С. 277–280. Khadyko I.A., Kazakov Y.V., Novozhilov E.V., Kanarskii A.V. The Use of Enzymes for the Assessment of Biodegradation of Materials by the Express Method. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2014, vol. 17, no. 13, pp. 277–280.

10. Хадыко И.А., Новожилов Е.В., Пригодич Я.А., Канарский А.В. Ферментативный метод определения крахмала в бумаге и картоне // Вестн. технол. ун-та. 2017. Т. 20, № 7. С. 156–159. Khadyko I.A., Novozhilov E.V., Prigodich Y.A., Kanarskiy A.V. Enzymatic Method for Determination of Starch in Paper and Cardboard. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2017, vol. 20, no. 7, pp. 156–159.

11. Alexandersson T. *Water Reuse in Paper Mills. Measurements and Control Problems in Biological Treatment*. Licentiate Thesis. Lund, Sweden, Lund University, 2003. 126 p.

12. Bacerra V., Odermatt J. Direct Determination of Cationic Starches in Paper Samples Using Analytical Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, vol. 105, pp. 348–354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.11.024>

13. Bogolitsyn K.G., Zubov I.N., Gusakova M.A., Chukhchin D.G., Krasikova A.A. Juniper Wood Structure under the Microscope. *Planta*, 2015, vol. 241, iss. 5, pp. 1231–1239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2252-1>

14. Hernadi A., Lele I. Improving the Recycled Fibre Performance by Means of α -Amylase Treatment. *Papiripar*, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 97–106.

15. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What Happens to Cellulosic Fibers during Papermaking and Recycling? A Review. *BioResources*, 2007, vol. 2(4), pp. 739–788. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.2.4.739-788>

16. SCAN-P 91:09 SCAN-W 13:09. *Paper, Board and Process Waters – Starch Content*. Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, 2008. 10 p.

17. TAPPI/ANSI T 419 Om-18. *Starch in Paper*. ANSI, 2011. 6 p.

18. Topgaard D., Söderman O. Changes of Cellulose Fiber Wall Structure during Drying Investigated Using NMR Self-Diffusion and Relaxation Experiments. *Cellulose*, 2002, vol. 9, iss. 2, pp. 139–147. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020158524621>

19. Wistara N., Young R.A. Properties and Treatments of Pulps from Recycled Paper. Part I. Physical and Chemical Properties of Pulps. *Cellulose*, 1999, vol. 6, iss. 4, pp. 291–324. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009221125962>

УДК 663.15

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-163-173

ПРИМЕНЕНИЕ СУЛЬФИТНЫХ ЩЕЛОКОВ В КАЧЕСТВЕ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ПРОДУЦЕНТА МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ *Rhizopus oryzae F-1030*

Л.А. Мингазова, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

Е.В. Крякунова, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

З.А. Канарская, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

А.В. Канарский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420015; e-mail: zleisan1@mail.ru, Oscillatoria@rambler.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru, alb46@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 19.04.20 / Принята к печати 26.06.20

Аннотация. Мицелиальные грибы *Rhizopus oryzae* хорошо известны своей способностью гидролизовать полисахариды растительного происхождения. Эти грибы широко используют для производства различных продуктов, таких как органические кислоты (молочная кислота, фумаровая кислота), этанол и гидролитические ферменты (гликоамилазы, полигалактуроназы). Для синтеза экзопродуктов *R. oryzae* необходимы различные источники углерода, богатые 5- и 6-углеродными сахарами. При производстве молочной кислоты микробиологическим методом в промышленных масштабах применяют дорогостоящее растительное сахаросодержащее сырье, а это существенно увеличивает конечную стоимость продукта. В статье показано, что в качестве альтернативного источника углерода для микробиологического синтеза молочной кислоты можно использовать более дешевые субпродукты целлюлозно-бумажного производства – сульфитные щелока. Они содержат большое количество углеводов – продуктов неполного гидролиза целлюлозы – гемицеллюлоз, моно- и олигомерных сахаров. Состав сульфитных щелоков позволяет рассматривать их в качестве потенциального субстрата для синтеза молочной кислоты микробиологическим методом. Изучена зависимость выхода молочной кислоты от состава питательной среды на основе сульфитного щелока и метода культивирования гриба *R. oryzae F-1030*. В качестве дополнительных источников азота и фосфора в питательную среду вносили $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и KH_2PO_4 . Использованы два способа культивирования: отъемно-доливный, когда по мере истощения редуцирующих сахаров полностью заменяли питательную среду; периодический, в этом случае недостаток редуцирующих сахаров в среде компенсировали добавлением упаренного сульфитного щелока. Поскольку питательная среда на основе сульфитного щелока содержит продукты неполного гидролиза целлюлозы и ксиланы, определяли ксиланазную и целлюлазную активность гриба *R. oryzae F-1030*, что позволило судить об эффективности усвоения им содержащихся в питательной среде углеводов. Установлено, что для получения большего выхода молочной кислоты культивирование гриба *R. oryzae F-1030* на питательной среде из сульфитного щелока целесообразнее проводить отъемно-доливным способом, при этом добавление минеральных источников азота и фосфора практически не влияет на конечный выход молочной кислоты.

Для цитирования: Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Канарская З.А., Канарский А.В. Применение сульфитных щелоков в качестве питательной среды для культивирования продуцента молочной кислоты *Rhizopus oryzae F-1030* // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 163–173. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-163-173

Благодарность: Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета.

Ключевые слова: сульфитный щелок, *Rhizopus oryzae*, молочная кислота, целлюлаза, ксиланаза, отъемно-доливной способ культивирования, периодический способ культивирования.

APPLYING SULFITE LIQUORS AS A NUTRIENT MEDIUM FOR CULTIVATION OF LACTIC ACID PRODUCER *Rhizopus oryzae F-1030*

Leysan A. Mingazova, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

Elena V. Kryakunova, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

Zosya A. Kanarskaya, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

Albert V. Kanarsky, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; e-mail: zleisan1@mail.ru, Oscillatoria@rambler.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru, alb46@mail.ru

Original article / Received on April 19, 2020 / Accepted on June 26, 2020

Abstract. The filamentous fungi *Rhizopus oryzae* are well known for their ability to hydrolyze plant polysaccharides. Representatives of this species are widely used for the production of various products, such as organic acids (lactic acid, fumaric acid), ethanol, and hydrolytic enzymes (glucoamylases, polygalacturonases). Various carbon sources such as pentose and hexose sugars are used for the synthesis of *R. oryzae* exoproducts. Expensive plant sugar-containing raw materials are used in the lactic acid production by the microbiological method, which significantly increases the final cost of the product. The article demonstrates the possibility of using cheaper by-products of pulp and paper production such as sulphite liquors as an alternative source of carbon for microbiological synthesis of lactic acid. Sulphite liquors contain a large amount of carbohydrates – products of incomplete hydrolysis of cellulose such as hemicelluloses, mono- and oligomeric sugars. The composition of sulfite liquors allows us to consider them as a potential substrate for the synthesis of lactic acid by using different microorganisms. The paper considers the dependence of the lactic acid yield on the composition of the nutrient medium based on sulfite liquor and the cultivation method of the fungus *R. oryzae F-1030*. As additional sources of nitrogen and phosphorus, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and KH_2PO_4 were introduced to the nutrient medium. The fungus *R. oryzae F-1030* was cultivated by two methods: the semicontinuous culture method, when the nutrient medium was completely replaced after depletion of the reducing sugars in it; the batch culture method, when the lack of reducing sugars in the medium was compensated by the addition of concentrated sulfite liquor. Since the nutrient medium based on sulfite liquor contains the products of incomplete cellulose hydrolysis and xylans, the xylanase and cellulase activities of the fungus *R. oryzae F-1030* were measured in order to determine its absorption degree of carbohydrates, contained in the nutrient medium. It was found that it is more expedient to use

the semicontinuous method for the fungus *R. oryzae* F-1030 cultivation on a nutrient medium based on sulfite liquor in order to obtain more synthesized lactic acid. The addition of mineral sources of nitrogen and phosphorus has practically no effect on the final yield of lactic acid.

For citation: Mingazova L.A., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A., Kanarsky A.V. Applying Sulfite Liquors as a Nutrient Medium for Cultivation of Lactic Acid Producer *Rhizopus oryzae* F-1030. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 163–173. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-163-173

Acknowledgements: The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Ecology, Biotechnology and Processes for Producing Environmentally Friendly Energy Carriers” of the Volga State University of Technology.

Keywords: sulphite liquor, *Rhizopus oryzae*, lactic acid, cellulase, xylanase, semicontinuous culture method, batch culture method.

Введение

Молочная, или 2-гидроксипропановая кислота, открытая шведским химиком К.В. Шееле в 1780 г., является наиболее широко встречающейся гидроксикарбоновой кислотой [13]. В настоящее время известны 2 способа синтеза молочной кислоты: химический и микробиологический. Органический синтез молочной кислоты осуществляется на основе различных предшественников (ацетальдегид, уксусная кислота, ацетонитрил и др.) Однако получаемая при органическом синтезе молочная кислота является рацемической, содержащей в равном количестве правые и левые изомеры молочной кислоты, что затрудняет применение синтетической молочной кислоты [21].

Микробиологический (ферментативный) способ синтеза молочной кислоты основан на сбраживании сахаросодержащих субстратов [14] и имеет преимущества по сравнению с синтетическим способом, поскольку дает на выходе молочную кислоту с более высокой стереохимической чистотой. Молочная кислота, полученная микробиологически, находит широкое применение в пищевой промышленности, что обусловлено уникальными свойствами этой кислоты, позволяющими использовать ее в качестве ароматизатора, окислителя и ингибитора роста бактерий [2]. В косметической промышленности молочную кислоту применяют для создания уникальной структуры увлажняющих кремов [11, 28, 29]. Модифицированная поли-L-молочная кислота позволяет изготавливать протезы, сохраняющие необходимую прочность в организме человека в течение длительного времени [6]. Для кормления сельскохозяйственных животных существуют премиксы, стимулирующие рост, которые содержат молочную кислоту [7].

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению объемов использования молочной кислоты в технических целях [9, 23]. Перспективным является ее применение в производстве биополимеров [15, 17, 20], в том числе строительных материалов [19, 24].

Потребности мирового рынка в молочной кислоте удовлетворяют преимущественно компании, которые производят этот продукт микробиологическим синтезом. В качестве продуцентов молочной кислоты используют разнообразные виды бактерий, грибов и дрожжей [8, 10, 22, 25].

Совершенствование технологии микробиологического синтеза молочной кислоты обусловлено необходимостью снижения себестоимости производства. В настоящее время для получения молочной кислоты широко применяют такие дорогостоящие сахаросодержащие субстраты, как картофель, кукуруза, ячмень, меласса, сахарный сироп и т. п., что приводит к значительному увеличению себестоимости продукта [27]. В этой связи поиск доступных и дешевых сырьевых источников для синтеза молочной кислоты актуален. В качестве такого сырьевого источника может рассматриваться сульфитный щелок, получаемый при производстве целлюлозы сульфитным способом, содержащий продукты частичного гидролиза целлюлозы и ксиланы. Эффективность культивирования молочной кислоты на питательных средах, содержащих олигомерные углеводы, будет определяться ферментативной активностью продуцента молочной кислоты – мицелиального гриба *Rhizopus oryzae F-1030*, а также составом питательной среды и способом культивирования.

Цель работы – определить зависимость выхода молочной кислоты от состава питательной среды на основе сульфитного щелока и способа культивирования гриба *R. oryzae F-1030*. Задачи – установить целлюлазную и ксиланазную активность гриба *R. oryzae F-1030* при культивировании, его способность утилизировать олигомерные углеводы с последующим синтезом молочной кислоты; выявить зависимость выхода молочной кислоты от минеральных источников азота и фосфора; оценить влияние отъемно-доливного и периодического способов культивирования на выход молочной кислоты.

Объекты и методы исследования

Штамм *R. oryzae F-1030*, продуцент молочной кислоты, был получен из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Культуру гриба выращивали на картофельно-глюкозном агаре при температуре 28...30 °С в течение 7 дней. Состав картофельного агара: 200 г мелкоизмельченных клубней картофеля, 20 г глюкозы, 20 г агара, 1000 см³ воды. Использовали питательные среды, приготовленные из сульфитного щелока, предоставленного ОАО «Выборгская целлюлоза».

Сульфитный щелок очищали и готовили для выращивания микроорганизмов по стандартной схеме, рекомендованной в промышленности для культивирования дрожжей [12]. Биохимическая подготовка питательных сред включала следующие стадии: улавливание мелкого целлюлозного волокна; удаление летучих веществ из щелока посредством продувки горячим воздухом; доведение pH до 6,0 известковым молоком; добавление 8–9 г/дм³ сульфата аммония и 0,3–0,5 г/дм³ однозамещенного фосфата калия. После завершения предварительной подготовки питательная среда содержала 10...11 % сухих веществ, 28,7 г/л редуцирующих веществ и имела pH 5,8.

Стерилизацию питательных сред проводили автоклавированием при температуре 115 °С в течение 60 мин. Выращивание *R. oryzae F-1030* осуществляли внесением части мицелия в питательную среду и последующим культивированием при температуре 28±2 °С и непрерывном перемешивании. В культуральной жидкости контролировали pH, температуру, содержание редуцирующих веществ, концентрацию молочной кислоты.

Культивирование гриба проводили в 4 стадии, окончание каждой стадии определяли по полному истощению редуцирующих (восстанавливающих) веществ в питательной среде. Продолжительность 1-й стадии составляла $14 \pm 0,5$ дн., 2-й – 12 ± 2 дн., 3-й – 12 ± 3 дн., 4-й – 10 ± 3 дн.

Использованы 2 способа культивирования *R. oryzae F-1030*: отъемно-доливной и периодический. При отъемно-доливном способе культивирования по мере исчерпания редуцирующих сахаров в среде полностью отбирали культуральную жидкость и доливали аналогичный объем стерильной питательной среды. К половине образцов в начале культивирования и при каждой смене среды добавляли сульфат аммония и однозамещенный фосфат калия для большего обогащения среды азотом и фосфором. В ходе процесса культивирования гриба периодическим способом вносили простые сахара в составе упаренного сульфитного щелока. По окончании 4-й стадии проводили осаждение синтезированной молочной кислоты внесением в культуральную жидкость стерильной гашеной извести для доведения рН до 7,5. К половине исследуемых образцов в начале культивирования также добавляли сульфат аммония и однозамещенный фосфат калия.

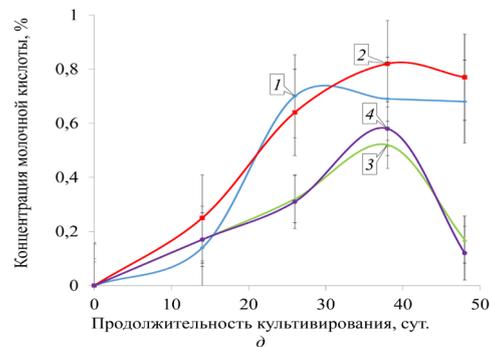
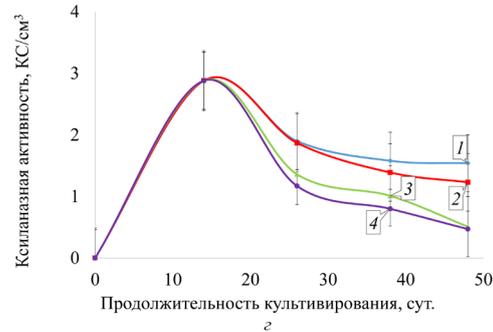
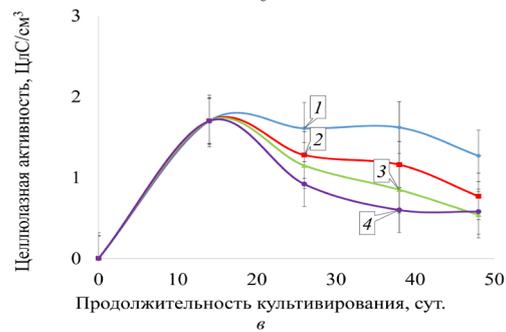
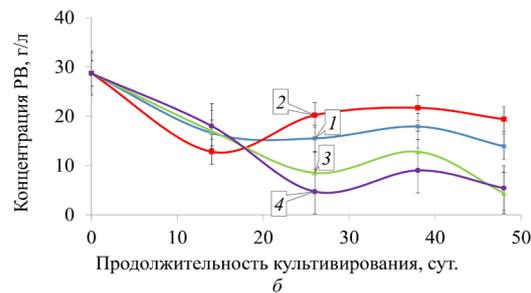
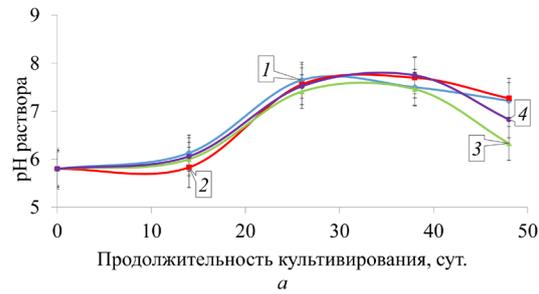
Измерение рН проводили с помощью лабораторного рН-метра рН-150МИ в каждой контрольной точке до отбора пробы и после доведения рН среды до значения 7,5. Содержание редуцирующих веществ (РВ) в питательной среде и культуральной жидкости определяли по методике [3]; ксиланазную активность *R. oryzae F-1030* – по стандартной методике (ГОСТ Р 55302–2012), основанной на количественном определении редуцирующих (восстанавливающих) сахаров, образующихся в результате действия фермента ксиланазы на ксилан [18]; целлюлазную активность – по ГОСТ Р 55293–2012, через определение редуцирующих сахаров, образующихся под действием фермента целлюлазы на субстрат натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы [16]; содержание молочной кислоты в культуральной жидкости – спектрофотометрическим методом [1].

Извлечение молочной кислоты из культуральной жидкости осуществляли переводом ее в лактат кальция при добавлении гашеной извести и доведении рН до 10,0. Образовавшийся лактат кальция отделяли центрифугированием.

Осадок лактата кальция диспергировали в дистиллированной воде и доводили рН концентрированной серной кислотой до 1,5...2,5. Выпавший сульфат кальция отделяли центрифугированием, а содержащую молочную кислоту надосадочную жидкость дополнительно очищали от гипса фильтрованием через бумажный фильтр. Математическую обработку полученных экспериментальных результатов проводили с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Высокую скорость роста микроорганизмов полезных метаболитов определяет наличие в питательной среде достаточного количества соединений углерода и азота, а также минеральных веществ, содержащих фосфор, калий, натрий и т. п. Питательные среды, используемые для культивирования микроорганизмов, должны быть сбалансированы по составу, изотоничны по концентрации растворенных веществ и оптимальны по уровню рН. По окончании каждой стадии культивирования контролировали рН среды (см. рисунок а).



Динамика изменения pH (а), содержания РВ (б), целлюлазной (в), ксиланазной (г) активностей гриба *R. oryzae F-1030* и динамика синтеза им молочной кислоты (д) при культивировании на питательных средах на основе сульфитного щелока: отъемно-доливным способом с добавлением (1) и без добавления (2) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и KH_2PO_4 ; периодическим способом с добавлением (3) и без добавления (4) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и KH_2PO_4

Dynamics of changes in pH (а), content of reducing agents (б), cellulase (в) and xylanase (г) activities of the fungus *R. oryzae F-1030* and dynamics of lactic acid synthesis (д) by the fungus during cultivation on the nutrient media based on sulfite liquor: by the semicontinuous culture method with (1) and without (2) addition of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and KH_2PO_4 ; by the batch culture method with (3) and without (4) addition of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and KH_2PO_4

Как видно из данных, представленных на рисунке *a*, характер изменения рН питательных сред на основе сульфитного щелока не зависит от применяемого способа культивирования *R. oryzae F-1030*. В течение первых 14 сут. (1-я стадия) оптимальный для роста гриба рН = $5,8 \pm 0,5$ не изменяется, затем происходит незначительное подщелачивание среды до рН = $7,5 \pm 0,3$ (вызванное, вероятнее всего, формированием лактата кальция), в результате реакция образующейся молочной кислоты с кальцием, избыточное содержание которого в растворе сохраняется на протяжении следующих 25 сут. (2-я и 3-я стадии), продолжается до истощения катионов кальция в среде. Последующее снижение рН среды объясняем накоплением молочной кислоты, активно синтезируемой грибом *R. oryzae F-1030*. Расхождения в значениях рН среды наблюдали только на 35-й день (4-я стадия), когда начинался процесс старения гриба. При периодическом способе культивирования более выраженное снижение рН на конечных этапах культивирования, очевидно, связано с истощением имеющихся в среде минеральных солей, в частности соединений азота и фосфора, и накоплением молочной кислоты. При отъемно-доливном способе культивирования снижение рН было менее выражено, т. к. в начале каждой стадии проводили полную замену питательной среды.

В качестве источника углерода низшие грибы используют в первую очередь простые углеводы – гексозы и пентозы. Грибы ассимилируют азот как из органических, так и из неорганических соединений, таких как белки, аминокислоты, соли аммония, нитраты и т. д. Для компенсации возможного дефицита источников фосфора и азота в питательные среды добавляли сульфат аммония и однозамещенный фосфат калия.

Как видно из рисунка *б*, в начальный период культивирования происходит закономерное снижение содержания РВ в питательной среде, связанное с ассимиляцией их грибом *R. oryzae F-1030* в качестве источника углерода. Однако примерно со 2-й стадии содержание РВ растет, что более выражено при отъемно-доливном способе культивирования.

Многие микроскопические грибы, включая *R. oryzae*, имеют ферменты, способные гидролизовать целлюлозу и гемицеллюлозу. Целлюлаза представляет собой комплекс ферментов, которые могут осуществлять гидролиз гликозидных связей в различных лигноцеллюлозных субстратах. Целлюлазы делят на 3 основных класса: эндо-1,4-β-D-глюканаза, экзо-1,4-β-глюканаза и β-D-глюкозидаза. Ксиланы – самый распространенный класс гемицеллюлоз. Ксиланаза гидролизует связи β-1,4 в основной цепи ксилана с образованием коротких олигомеров, гидролизующихся с образованием отдельных единиц ксилозы под действием β-ксилозидазы. Грибы значительно увеличивают синтез целлюлаз и ксиланаз при наличии в среде специфических веществ-индукторов, как правило, являющихся продуктами неполного гидролиза субстрата [5, 26].

Как видно из данных, представленных на рисунках *в* и *г*, в течение 1-й стадии культивирования грибом *R. oryzae F-1030* обладает наибольшей активностью целлюлазных и ксиланазных ферментов, т. к. в среде находится большое количество доступных для расщепления субстратов – олигомеров целлюлозы и ксилозы. На более поздних стадиях наблюдается закономерное снижение ферментативной активности гриба, более выраженное при периодическом способе культивирования, что связано с истощением питательной среды. В случае применения

отъемно-доливного способа культивирования снижение активности целлюлаз и ксиланаз гриба не так сильно проявляется, потому что на каждой стадии происходит полное обновление питательной среды и доступные для расщепления ферментами гриба субстраты не истощаются. Постепенное снижение ферментативной активности гриба в данном случае, вероятно, связано с его старением.

Характер изменения ферментативной активности гриба *R. oryzae F-1030* согласуется с некоторым ростом содержания РВ в питательной среде, начиная с середины 1-й стадии культивирования, когда после истощения имеющихся в изначальной питательной среде простых сахаров происходит образование новых за счет расщепления олигомеров целлюлозы и ксилозы ферментными системами гриба.

Основным продуктом, синтезируемым грибом *R. oryzae F-1030*, является молочная кислота. Для ее синтеза гриб использует различные источники углерода, богатые гексозными и пентозными сахарами, такие как различные виды крахмала, гидролизаты древесины, ксилоза и т. п. [27].

На рисунке *д* показано, что на протяжении первых 3 стадий культивирования происходит постепенное увеличение количества синтезируемой грибом *R. oryzae F-1030* молочной кислоты. При этом отъемно-доливной способ не дает постепенного снижения концентрации молочной кислоты, выделяемой грибом в культуральную жидкость, в отличие от периодического способа. Стабилизация количества синтезируемой грибом молочной кислоты на конечной стадии культивирования при использовании отъемно-доливного способа объясняется наличием в питательной среде достаточного количества сахаров для синтеза молочной кислоты даже стареющими клетками гриба.

Суммарный выход биомассы гриба и молочной кислоты по окончании 4 стадий культивирования представлен в таблице. Завершение культивирования после 4-й стадии связано с замедлением скорости утилизации РВ и синтеза молочной кислоты грибом *R. oryzae F-1030*, это объясняется его старением.

Итоговый выход биомассы и молочной кислоты в зависимости от способа культивирования гриба *R. oryzae F-1030*

| Способ культивирования* | Сухая биомасса, г/дм ³ | Выход молочной кислоты, % | Концентрация молочной кислоты, г/дм ³ |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|
| 1 | 9,1±0,5 | 40,8±2,0 | 6,5±0,5 |
| 2 | 6,9±0,5 | 32,8±2,0 | 5,9±0,5 |
| 3 | 9,2±0,5 | 29,5±2,0 | 3,0±0,5 |
| 4 | 9,6±0,5 | 33,5±2,0 | 3,0±0,5 |

*Цифра соответствует номеру на рисунке.

При отъемно-доливном способе культивирования, что отражают данные таблицы, наблюдали больший выход молочной кислоты, чем при использовании периодического способа. Добавление в питательную среду сульфата аммония и однозамещенного фосфата калия при отъемно-доливном способе культивирования привело к лучшему усвоению РВ и большему приросту биомассы. Однако значительного увеличения конечной концентрации молочной кислоты не происходило. В случае применения периодического способа культивирования существенных отличий в приросте биомассы и выходе молочной кислоты

в зависимости от наличия в питательной среде дополнительных солей не выявили.

Таким образом, для культивирования гриба *R. oryzae F-1030* на питательной среде на основе сульфитного щелока целесообразнее использовать отъемно-доливной способ, при этом добавление сульфата аммония и однозамещенного фосфата калия не влияет на конечный выход молочной кислоты. Полученные результаты дополняют ранее опубликованные авторами [4].

Выводы

Определено наличие у гриба *Rhizopus oryzae F-1030* целлюлазной и ксиланазной активностей, связанных с ферментативным гидролизом имеющихся в питательной среде на основе сульфитного щелока гемицеллюлоз и увеличением концентрации доступных для гриба редуцирующих веществ.

Внесение в состав питательной среды сульфата аммония и однозамещенного фосфата калия не влияет на конечный выход молочной кислоты. Питательную среду обогащали минеральными источниками азота и фосфора, что достаточно для поддержания физиологической активности гриба *R. oryzae F-1030* на высоком уровне. При отъемно-доливном способе культивирования гриба *R. oryzae F-1030* выход молочной кислоты выше, чем при периодическом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Борщевская Л.Н., Гордеева Т.Л., Калинина А.Н., Синеокий С.П. Спектрофотометрическое определение молочной кислоты // Журнал аналит. химии. 2016. Т. 71, № 8. С. 787–790. Borshchevskaya L.N., Gordееva T.L., Kalinina A.N., Sineokii S.P. Spectrophotometric Determination of Lactic Acid. *Zhurnal analiticheskoy khimii* [Journal of Analytical Chemistry], 2016, vol. 71, no. 8, pp. 787–790. DOI: <https://doi.org/10.7868/S004445021608003X>
2. Евелева В.В., Новицкая И.Б., Черпалова Т.М., Никулина И.Д. Технологические инновации в производстве пищевой молочной кислоты // Пищевая пром-сть. 2014. № 4. С. 26–28. Eveleva V.V., Novitskaya I.B., Cherpalova T.M., Nikulina I.D. Technological Innovations in Production of Food Lactic Acid. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 2014, no. 4, pp. 26–28.
3. Коренман И.М. Фотометрический анализ. Методы определения органических соединений. М.: Химия, 1970. 343 с. Korenman I.M. *Photometric Analysis. Methods for Determination of Organic Compounds*. Moscow, Khimiya Publ., 1970. 343 p.
4. Мингазова Л.А., Канарский А.В., Крякунова Е.В., Канарская З.А. Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae F-1030* на питательных средах из сульфитных щелоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 146–158. Mingazova L.A., Kanarsky A.V., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A. Lactic Acid Synthesis by Fungus *Rhizopus oryzae F-1030* on Growth Media Based on Sulphite Liquors. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 146–158. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-146-158>
5. Морозова Ю.А., Скворцов Е.В., Алимова Ф.К., Канарский А.В. Биосинтез ксиланаз и целлюлаз грибами рода *Trichoderma* на послеспиртовой барде // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2012. Т. 15, № 19. С. 120–122. Morozova Yu.A., Skvortsov E.V., Alimova F.K., Kanarsky A.V. The Biosynthesis of Xylanase and Cellulase by Fungi of *Trichoderma* Genus on DDGS. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2012, vol. 15, no. 19, pp. 120–122.
6. Намханов В.В., Будаев Б-Ж.А., Товаршинов А.И., Борбоев Л.В. Влияние материалов зубных протезов на органы полости рта // Вестн. БГУ. 2009. № 12. С. 143–149. Namhanov V.V., Budaev B-Zh.A., Tovarshinov A.I., Borboev L.V. Influence of Materials

of Dental Artificial Limbs on Bodies of Oral Cavity. *Vestnik Buryatskogo gosuniversiteta* [BSU bulletin], 2009, no. 12, pp. 143–149.

7. Никанова Л.А. Влияние органических кислот на продуктивность, резистентность, микробиоценоз кишечника и биохимические показатели сыворотки крови свиней // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32, № 7. С. 65–67. Nikanova L.A. Influence of Organic Acids on Productivity, Resistance, Intestinal Microbiocenosis and Biochemical Parameters of Blood Serum of Pigs. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AIC], 2018, vol. 32, no. 7, pp. 65–67. DOI: [10.24411/0235-2451-2018-10715](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10715)

8. Новожилов Е.В. Оценка биоресурса сульфитных щелоков как сырья для производства кормовых дрожжей // Изв. вузов. Лесн. журн. 1999. № 2-3. С. 179–188. Novozhilov E.V. Assessment of Sulfite Liquors Bioresource as a Raw Material for Nutrient Yeast Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1999, no. 2-3, pp. 179–188. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/eea/179_188.pdf

9. Няникова Г.Г., Комиссарчик С.М., Хрусталёва М.В. Исследование условий культивирования *Rhizopus oryzae* для получения молочной кислоты и биосорбента // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2012. Т. 17, № 43. С. 56–60. Nyankova G.G., Komissarchik S.M., Khrustaleva M.V. A Study of the *Rhizopus oryzae* Cultivation Conditions for Lactic Acid and Biosorbent Preparation. *Izvestiya SPbGTI (TU)* [Bulletin of St PbSIT (TU)], 2012, vol. 17, no. 43, pp. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.1002/chin.201240145>

10. Самуйленко А.Я., Гринь С.А., Еремец В.И., Шинкарев С.М., Неминущая Л.А., Скотникова Т.А., Лермонтов С.А., Зимагулова Л.А., Галиева А.Р. Тенденции развития производства молочной кислоты // Вестн. технол. ун-та. 2017. Т. 20, № 1. С. 162–166. Samujlenko A.Ya., Grin S.A., Eremets V.I., Shinkarev S.M., Neminuschiy L.A., Skotnikova T.A., Lermontov S.A., Zimagulova L.A., Galieva A.R. Lactic Acid Production Trends. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2017, vol. 20, no. 1, pp. 162–166.

11. Филиппова В.Н. Фруктовые кислоты. Их роль в косметике // Сервис в России и за рубежом. 2007. Т. 2, № 2. С. 163–165. Filippova V.N. Fruit Acids and Their Role in Cosmetics. *Servis v Rossii i za rubezhom* [Services in Russia and abroad], 2007, vol. 2, no. 2, pp. 163–165.

12. Шарков В.И., Сапотницкий С.А., Дмитриева О.А., Туманов И.Ф. Технология гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 407 с. Sharkov V.I., Sapotnitskiy S.A., Dmitriyeva O.A., Tumanov I.F. *Technology of Hydrolysis Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 407 p.

13. Abd Alsaheb R.A., Aladdin A., Othman N.Z., Malek R.A., Leng O.M., Aziz R., El Enshasy H.A. Lactic Acid Applications in Pharmaceutical and Cosmeceutical Industries. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2015, vol. 7, iss. 10, pp. 729–735.

14. Abdel-Rahman M.A., Tashiro Y., Sonomoto K. Recent Advances in Lactic Acid Production by Microbial Fermentation Processes. *Biotechnology Advances*, 2013, vol. 31, iss. 6, pp. 877–902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.04.002>

15. Abdel-Rahman M.A., Xiao Y., Tashiro Y., Wang Y., Zendo T., Sakai K., Sonomoto K. Fed-Batch Fermentation for Enhanced Lactic Acid Production from Glucose/Xylose Mixture without Carbon Catabolite Repression. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2015, vol. 119, iss. 2, pp. 153–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.07.007>

16. Adney B., Baker J. *Measurement of Cellulase Activities*. Technical Report NREL/TP-510-42628. Golden, CO, National Renewable Energy Laboratory, 2008. 8 p.

17. Ahring B.K., Traverso J.J., Murali N., Srinivas K. Continuous Fermentation of Clarified Corn Stover Hydrolysate for the Production of Lactic Acid at High Yield and Productivity. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, vol. 109, pp. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.01.012>

18. Bailey M.J., Biely J., Poutanen K. Interlaboratory Testing of Methods for Assay of Xylanase Activity. *Journal of Biotechnology*, 1992, vol. 23, iss. 3, pp. 257–270. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(92\)90074-J](https://doi.org/10.1016/0168-1656(92)90074-J)
19. Choudhary J., Singh S., Nain L. Thermotolerant Fermenting Yeast for Simultaneous Saccharification and Fermentation of Lignocellulosic Biomass. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2016, vol. 21, pp. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.02.007>
20. Gao C., Ma C., Xu P. Biotechnological Routes Based on Lactic Acid Production from Biomass. *Biotechnology Advances*, 2011, vol. 29, iss. 6, pp. 930–939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.07.022>
21. Hofvendahl K., Hahn-Hägerdal B. Factors Affecting the Fermentative Lactic Acid Production from Renewable Resources. *Enzyme and Microbial Technology*, 2000, vol. 26, iss. 2–4, pp. 87–107. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(99\)00155-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(99)00155-6)
22. Kleerebezem R., van Loosdrecht M.C.M. Mixed Culture Biotechnology for Bioenergy Production. *Current Opinion in Biotechnology*, 2007, vol. 18, iss. 3, pp. 207–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2007.05.001>
23. Komesu A., Rocha de Oliveira J.A., da Silva Martins L.H., Wolf Maciel M.R., Maciel Filho R. Lactic Acid Production to Purification: A Review. *BioResources*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 4364–4383. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.Komesu>
24. Nakano S., Ugwu C.U., Tokiwa Y. Efficient Production of D-(–)-Lactic Acid from Broken Rice by *Lactobacillus delbrueckii* Using Ca(OH)₂ as a Neutralizing Agent. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 104, pp. 791–794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.017>
25. Nancib A., Nancib N., Boudrant J. Production of Lactic Acid from Date Juice Extract with Free Cells of Single and Mixed Cultures of *Lactobacillus casei* and *Lactococcus lactis*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2009, vol. 25, pp. 1423–1429. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0029-z>
26. Ofongo R.T.S., Ohimain E.I., Iyayi E.A. Cellulase and Hemicellulase Activity under Submerged Fermentation of Rice Mill Feed by Fungi. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2019, vol. 4, iss. 1, pp. 233–239. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijeab/4.1.35>
27. Taherzadeh M.J., Fox M., Hjorth H., Edebo L. Production of Mycelium Biomass and Ethanol from Paper Pulp Sulfite Liquor by *Rhizopus oryzae*. *Bioresource Technology*, 2003, vol. 88, iss. 3, pp. 167–177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00010-5)
28. Wee Y.-J., Kim J.-N., Ryu H.-W. Biotechnological Production of Lactic Acid and Its Recent Applications. *Food Technology and Biotechnology*, 2006, vol. 44, no. 2, pp. 163–172.
29. Yadav A.K., Chaudhari A.B., Kothari R.M. Bioconversion of Renewable Resources into Lactic Acid: An Industrial View. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, vol. 31, no. 1, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3109/07388550903420970>

УДК 676.017

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-174-184

REGULATING THE DEFORMATION PROPERTIES OF PAPER BY VARYING THE DEGREE OF ITS ANISOTROPY*Didier Rech*¹, *Researcher**Anastasiia N. Potasheva*², *Postgraduate Student*; *ResearcherID: [AAP-9396-2021](#)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8216-3844>**Yakov V. Kazakov*², *Doctor of Engineering, Prof.*; *ResearcherID: [J-4634-2012](#)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>*¹Techpap SAS, B.P. 251, Cedex 9, Grenoble, 38044, France; e-mail: didier.rech@techpap.com²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: a.romanova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru

Original article / Received on March 20, 2020 / Accepted on June 8, 2020

Abstract. Mechanical properties are crucial in assessing the paper quality. Deformation and strength properties of paper are determined by the strength and stiffness of the interfiber and intermolecular hydrogen bonds. The contribution ratio of interfiber and intermolecular hydrogen bonds to the strength of paper can be changed by adjusting the degree of its anisotropy. The article presents the results on a study of the deformation properties of laboratory anisotropic paper samples from kraft bleached softwood pulp with a beating degree of 30 °SR. The samples had basic weight of 90 g/m² and the degree of stiffness anisotropy $TSI_{MD/CD}$ of 1.75–4.08. They were made by using Techpap SAS automatic dynamic handsheet former (Grenoble, France), with varying forming parameters – diameter of the nozzle, motion speed of the forming wire, and injecting speed of pulp. Deformation properties were determined by tensile test and processing of the stress-strain dependence (σ – ε). The outcomes have shown that, an increase of the fiber orientation degree in paper structure by changing the forming parameters caused a change in the nature of the paper deformation under tension. Increasing the fiber orientation degree in the structure of paper made it possible to increase the strength by 55 %, tensile stiffness by 63 % in the machine direction, while reducing the extensibility by 10 %. In the cross direction, it was possible to decrease tensile stiffness by 33 %, strength by 55 %, and increase the extensibility by 5 %. Anisotropy of tensile strength was 1.73–6.00. The greatest effect was obtained for the elasticity modulus in the pre-failure zone E_2 (2.8–38.6). It means that, fiber orientation had a key importance when large deformations in the samples took place. The established quantitative regularities allowed optimizing the values of the deformation and strength properties of paper, and their ratio in the machine direction and cross direction due to the variation of the forming parameters.

For citation: Rech D., Potasheva A.N., Kazakov Ya.V. Regulating the Deformation Properties of Paper by Varying the Degree of Its Anisotropy. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 174–184. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-174-184

Keywords: forming, FDA, fiber orientation, anisotropy, stiffness, strength.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БУМАГИ ПУТЕМ ВАРЬИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ ЕЕ АНИЗОТРОПИИ

Д. Рёч¹, науч. сотр.

А.Н. Поташева², аспирант; *ResearcherID*: [AAP-9396-2021](https://orcid.org/0000-0002-8216-3844),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8216-3844>

Я.В. Казаков², д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

¹Techpap SAS, а/я 251, Седекс 9, г. Гренобль, Франция, 38044;

e-mail: didier.rech@techpap.com

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Се-

верной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: a.romanova@narfu.ru;

j.kazakov@narfu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 20.03.20 / Принята к печати 08.06.20

Аннотация. Механические свойства являются ключевыми при оценке качества бумаги и определяются прочностью и жесткостью межволоконных и межмолекулярных водородных связей. Вклад разных видов связей в прочность образца возможно менять регулированием степени анизотропии бумаги. Исследованы деформационные свойства лабораторных анизотропных образцов бумаги из белой хвойной целлюлозы при степени помола 30 °ШП, массе 90 г/м², со степенью анизотропии жесткости $TSI_{MD/CD}$ (отношение индексов жесткости при растяжении, TSI_{MD} к TSI_{CD}) 1,75...4,08. Образцы были изготовлены на динамическом листоотливном аппарате TechPap SAS (г. Гренобль, Франция) при переменных параметрах отлива: скорости сетки, скорости струи, диаметре форсунки. Деформационные и прочностные свойства определены испытанием на растяжение с получением зависимости «напряжение–деформация». Показано, что увеличение степени ориентации волокна за счет варьирования параметров отлива делает прочность в машинном направлении больше на 55 %, жесткость при растяжении – на 63 %, снижает растяжимость на 10 %; в поперечном направлении возможно уменьшение жесткости при растяжении на 33 %, прочности – на 55 %, увеличение растяжимости на 5 %. Анизотропия прочности при растяжении составила 1,73...6,00. Наибольший эффект получен для модуля упругости в области предразрушения – 2,8...38,6, т. е. ориентация волокна имеет ключевое значение при больших деформациях образцов. Установленные количественные закономерности позволяют оптимизировать величины деформационных и прочностных показателей бумаги и их соотношение в машинном и поперечном направлениях за счет варьирования параметров отлива.

Для цитирования: Rech D., Potasheva A.N., Kazakov Ya.V. Regulating the Deformation Properties of Paper by Varying the Degree of Its Anisotropy // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 174–184. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-174-184

Ключевые слова: формование, динамический листоотливный аппарат, ориентация волокон, анизотропия, жесткость, прочность.

Introduction

Strength and deformation characteristics are key markers to evaluate the quality of pulp and paper products. Achieving the requested level of consumer properties for these materials is closely related to the process of forming their structure. Thus, the prediction of the deformation behavior of paper and cardboard at the stage of modeling their structure has a particular scientific, economic and practical interest [4].

Paper is a material of anisotropic, discrete fibrous net-like structure [1, 10]. The strength of structure is formed by hydrogen bonds (HB). The deformation and strength properties of paper are determined by the strength and stiffness of interfiber and intermolecular HB. Intermolecular bonds determine the intrinsic strength of fibers. The intensity of interfiber bonds is regulated by beating the plant fibers at the stage of refining. The contribution ratio of interfiber and intermolecular HB to the strength of a paper sample can be changed through adjusting the degree of paper anisotropy [5, 7].

The modern scientific approach and the latest engineering technologies make it possible to model the structure of pulp and paper materials, to test and analyze their properties at a stage of laboratory research. Moreover, they give a chance to obtain anisotropic laboratory samples with characteristics like or similar to those of final products of papermaking and cardboard machines (PM and CM, respectively). As a result, it was found that the degree of anisotropy of the sample has a significant effect on the paper mechanical properties. However, for each study using laboratory equipment, it is necessary to select its own conditions for making samples in order to achieve compliance of properties with industrial paper [3, 17, 20, 21].

Techpap SAS laboratory equipment (France), operating in the Laboratory of modeling and researching compositions of paper and cardboard of the Innovative Facilities Engineering and Innovation Center “Advanced Northern Bioresources Processing Technologies” based at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), provides an opportunity to implement stage by stage the full range of activities to study anisotropic paper and cardboard samples. The complex enables to bring the properties of laboratory samples closer to those of real products [18, 21].

The anisotropy of the paper structure determines the anisotropy of its deformation and strength properties [1, 4, 11]. The direction of the preferred fibers orientation in the sample largely determines its response to the application of an external load [8]. The difference in the properties of such specimens is most clearly determined by the shape of the stress-strain curves [4, 6]. When modeling the structure and properties of a fibrous material based on discrete fibers, taking into account anisotropy is a necessary condition for obtaining adequate results [2, 13, 19]. The correspondence of the stress-strain dependence of the model sample with the experimental data is the most frequent proof of the efficiency of the proposed modeling method [2, 13].

The aim of this work is to establish quantitative regularities that connect the parameters of the paper forming on the dynamic sheet former and the degree of anisotropy of laboratory paper samples, which make it possible to control the values of their deformation and strength properties, including optimizing the ratio of these values in the machine direction (MD) and cross direction (CD).

Research objects and methods

Techpap SAS laboratory equipment includes the automatic dynamic handsheet former (FDA) (fig. 1), laboratory press (fig. 2) and dryer (fig. 3). The complex closely simulates the work of industrial paper machines and produces rectangular sheets with dimensions up to 25×90 cm with the motion speed of the forming wire from 700 to 1300 m/min. It allows researchers to obtain anisotropic paper and cardboard samples and maximize their properties to those of the products of PM and CM.

The rectangular form of handsheets has great advantages when carrying out analyses under production conditions as well as research developments. Such handsheets can be calendered and coated. Their size allows making a big number of tests for a one sheet. In addition, it is possible to produce multi-layer handsheets and handsheets with a large range of basis weight [5, 7].

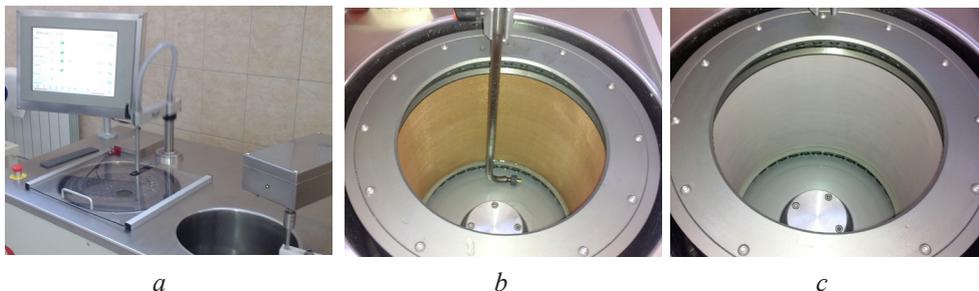


Fig. 1. The elements of the FDA, Techpap SAS: *a* – forming device and its control panel; *b* – cylindrical jar with the forming wire inside before testing; *c* – finished wet web of a handsheet on the wire



Fig. 2. Pressing the handsheet by means of a pneumatic single-drum press



Fig. 3. Drying the sheet by means of a temperature controlled laboratory dryer

The principle of dynamic sheet forming is as follows. The main part of the FDA is a cylindrical jar rotating around a vertical axis (fig. 4). The jar has a perforated wall. Water enters into the jar centrifugally through the nozzle and forms a vertical water wall when the rotation speed is over 700 rpm. The water wall covers the perforated wall and moves along with it [15].

The forming wire is installed on the inner side of the perforated wall before testing. Together they are covered with the water wall of 5 mm thick. The injector nozzle is fixed on a delivery tube at a certain angle. The nozzle sweeps vertically up and down evenly distributing a diluted fibrous mass onto the water wall under pressure. The fibers go through the water wall to the wire forming a layer of fibrous mass. It takes place until a given basis weight is reached.

Upon completion of fiber injection water is removed from the jar. The layer of a wet fibrous mass remains on the wire. As the jar stops its rotating, the handsheet is taken out from the jar together with the wire. To separate a wet handsheet from the forming wire they are covered by filter paper and rolled with a roller on top.

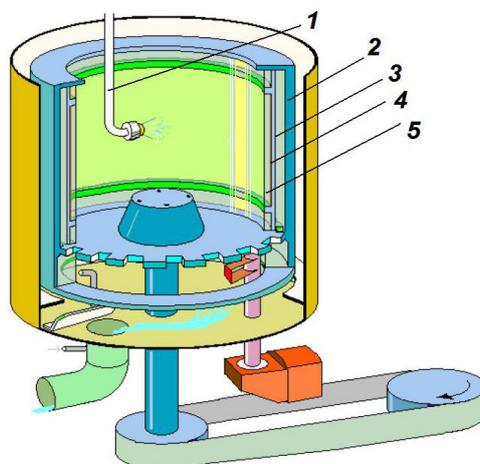


Fig. 4. Structural units of the FDA forming device: 1 – sweeping flat jet nozzle; 2 – forming jar; 3 – perforated cylinder; 4 – forming wire; 5 – water wall

The handsheet undergoes pressing and drying between layers of filter paper. It provides to form a handsheet similar to a sheet obtained by an industrial method. Moreover, adjusting the ratio of the speed of nozzle and of wire motion makes it possible to obtain laboratory handsheets with varying degree of anisotropy.

To model the anisotropic macrostructure of paper samples we varied the forming parameters of the FDA such as circumferential motion speed of the forming wire, the pressure of fibrous mass injection on the wire through the nozzle by changing the speed of the feeding pump, and the diameter of the nozzle. Thus, we adjusted the degree of paper anisotropy by changing the ratio of jet and wire speed.

An additional factor was the duration of the forming process that was increasing due to a smaller diameter of the nozzle. Consequently, fibers near the forming wire were subjected to a supplementary orientation in MD.

Preliminary experiments have shown [7] that in order to increase the degree of anisotropy, it is necessary to increase the rotation speed of the forming drum and reduce the pressure in the pump feeding the pulp to the wire. Reducing the diameter of the nozzle orifice also increases the jet speed. However, the final result depends on the furnish composition and the basic weight of the samples. And they must be specified in each individual case.

The forming parameters we used to make laboratory paper samples from kraft softwood bleached pulp with a beating degree of 30 °SR are given in table 1. The values of the FDA process parameters were chosen close to the average and extreme allowable according to the technical characteristics of the FDA. A total of 6 paper samples were made and analyzed. This made it possible to obtain a series of paper samples with different properties. The obtained handsheets had weight of 90 g/m², dimensions of 25×90 cm and different degree of anisotropy.

In order to evaluate deformation properties of laboratory paper samples we carried out the uniaxial tensile tests and mathematically processed the obtained “stress-strain” dependence (σ – ϵ) [10, 12]. The test with a uniaxial static loading was conducted by means of the laboratory test complex at a loading rate of 5 cm/min.

Table 1

The parameters of the FDA used for modeling the structure of laboratory handsheets

| Regulated parameter | Parameter value for modes | | | | | |
|---|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| The rotation speed of the forming wire of the FDA v , m/min | 800 | 800 | 950 | 1000 | 1200 | 1350 |
| The pump revolution feeds the mass onto the wire p , rpm | 1400 | 1400 | 1200 | 900 | 600 | 300 |
| Nozzle grade d (size, mm) | 2504 (1.0×1.0) | 2510 (2.0×1.8) | 2510 (2.0×1.8) | 2506 (1.8×1.2) | 2504 (1.0×1.0) | 2504 (1.0×1.0) |

The complex includes the vertical tensile testing machine “TEST SYSTEM 101” and personal computer (PC) that are used according to the method [12] by applying the software [9]. To carry out the test we cut the paper samples into strips with a width of 1.5 cm. Distance between jaws of tensile tester was 10.0 cm.

Research results and discussion

On mill paper machines, in order to change the degree of paper anisotropy, the ratio of jet/wire speeds is changed. An increase in the lag of the pulp jet speed from the wire speed (efflux) leads to an increase in the degree of fiber orientation and an increase in anisotropy. Filtration begins as soon as the paper pulp comes into contact with the wire, and the duration of the drain is several seconds.

On the applied dynamic sheet former, the pulp is first pumped onto the moving wire for several minutes. And then quickly, in a few seconds, water is removed after the command of the operator. Thus, the laboratory conditions of formation are still different from the industrial ones, although they make it possible to obtain anisotropic samples.

A quantitative estimation of anisotropy degree was performed by several methods [1, 11]. The most popular characteristic is stiffness anisotropy $TSI_{MD/CD}$ (the ratio of the tensile stiffness, TSI_{MD} by TSI_{CD}) measured by the ultrasonic method using the L&W TSO tester [14].

The variation of the forming modes presented in table 1 gave us a chance to obtain samples with $TSI_{MD/CD}$ values from 1.75 to 4.08 (table 2). In fact, for white paper grades produced by PM, $TSI_{MD/CD}$ values are usually from 2.3 to 3.0. Thus, we obtained samples with a greater range of $TSI_{MD/CD}$ values. Hence, we managed the task to make samples with different degree of anisotropy.

Additionally, the degree of fiber orientation λ was determined in accordance with the method [8, 16] (table 2). The λ values ranged from 0.51 to 0.65 and, as we can see, correlated well with the $TSI_{MD/CD}$ values.

The physical characteristics of the obtained paper samples such as thickness δ μm , density ρ , g/cm^3 , and porosity, mL/min , were determined (table 2). It has been found that the forming conditions also affected the density of the fibrous structure while forming on the wire. The extreme values of the degree of anisotropy caused a decrease of thickness and an increase of density, not exceeding 8 %.

Table 2

Deformation properties of the obtained anisotropic paper samples

| Characteristic | Units | Direction | Forming mode | | | | | |
|--|-----------------|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| Thickness, δ | μm | | 115 | 114 | 122 | 121 | 118 | 112 |
| Density, ρ | g/cm^3 | | 0.743 | 0.740 | 0.719 | 0.717 | 0.737 | 0.752 |
| Porosity | mL/min | | 134 | 173 | 143 | 166 | 149 | 168 |
| Degree of fiber orientation, λ | – | | 0.511 | 0.533 | 0.601 | 0.615 | 0.636 | 0.650 |
| Tensile stiffness index (TSI) | Nm/kg | MD | 13.60 | 16.08 | 18.41 | 19.03 | 19.73 | 19.95 |
| | | CD | 7.75 | 7.84 | 5.59 | 5.27 | 5.01 | 4.88 |
| | – | MD/CD | 1.75 | 2.05 | 3.29 | 3.61 | 3.93 | 4.08 |
| Breaking length, L | m | MD | 11750 | 14200 | 16900 | 17300 | 18100 | 17750 |
| | | CD | 6850 | 7450 | 4100 | 3600 | 3200 | 3050 |
| | – | MD/CD | 1.72 | 1.91 | 4.12 | 4.81 | 5.66 | 5.82 |
| Initial modulus of elasticity, E_1 | MPa | MD | 6260 | 7380 | 8210 | 8600 | 9230 | 9800 |
| | | CD | 3280 | 3572 | 2430 | 2190 | 2070 | 2120 |
| | – | MD/CD | 1.91 | 2.07 | 3.38 | 3.93 | 4.46 | 4.62 |
| Tensile energy absorption (TEA) | J/m^2 | MD | 175 | 204 | 257 | 252 | 262 | 250 |
| | | CD | 169 | 187 | 126 | 115 | 97 | 92 |
| | – | MD/CD | 1.04 | 1.09 | 2.04 | 2.19 | 2.70 | 2.72 |
| Limit of elasticity, σ_1 | MPa | MD | 16.65 | 20.69 | 20.23 | 21.68 | 24.42 | 25.92 |
| | | CD | 8.24 | 8.00 | 6.65 | 6.08 | 5.82 | 5.09 |
| | – | MD/CD | 2.02 | 2.59 | 3.04 | 3.57 | 4.20 | 5.09 |
| Limit of elastic deformation, ε_1 | % | MD | 0.27 | 0.28 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.27 |
| | | CD | 0.26 | 0.27 | 0.23 | 0.28 | 0.29 | 0.29 |
| | – | MD/CD | 1.19 | 1.04 | 1.09 | 0.93 | 0.93 | 0.93 |
| Stress-at-failure, σ_f | MPa | MD | 87.2 | 104.1 | 116.7 | 122.4 | 132.6 | 135.2 |
| | | CD | 50.5 | 55.3 | 30.3 | 26.0 | 23.3 | 22.5 |
| | – | MD/CD | 1.73 | 1.88 | 3.86 | 4.70 | 5.68 | 6.00 |
| Strain-to-failure, ε_f | % | MD | 2.83 | 2.66 | 2.74 | 2.68 | 2.62 | 2.57 |
| | | CD | 4.42 | 4.39 | 4.66 | 4.58 | 4.50 | 4.37 |
| | – | CD/MD | 1.56 | 1.65 | 1.70 | 1.71 | 1.72 | 1.70 |
| Modulus of elasticity in the pre-failure zone, E_2 | MPa | MD | 1620 | 2050 | 2350 | 2700 | 2880 | 3090 |
| | | CD | 570 | 610 | 190 | 140 | 110 | 80 |
| | – | MD/CD | 2.84 | 3.36 | 12.37 | 19.29 | 26.18 | 38.63 |

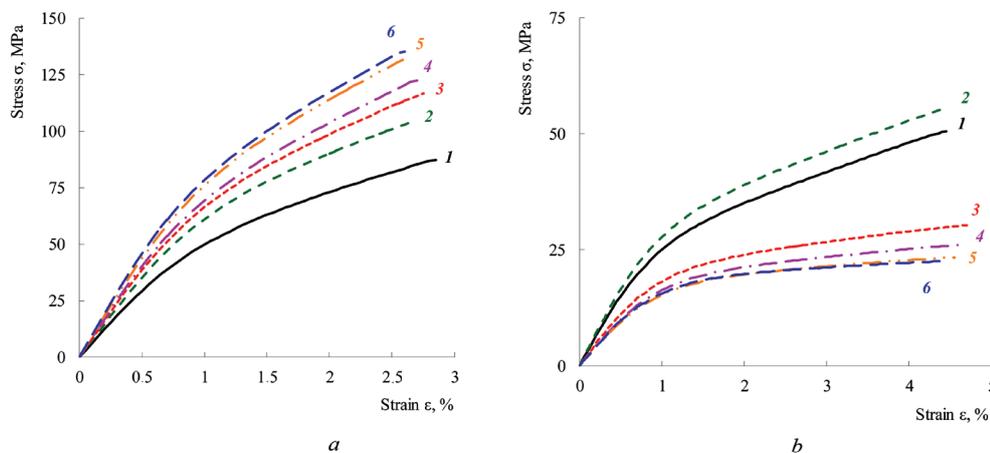


Fig. 5. The stress-strain curves for paper samples from kraft softwood bleached pulp: *a* – MD; *b* – CD; 1–6 – modes of the forming process (table 1)

In order to evaluate deformation properties of laboratory paper samples we carried out the uniaxial tensile tests and mathematically processed the obtained “stress-strain” dependence (σ – ε), see fig. 5 [6, 12].

Fig. 5 shows the following: in the MD, with rose the degree of anisotropy, the curves σ – ε went higher (strength increased) and had a greater steepness (stiffness increases), but their length decreased (elongation decreased). The curve for a sample with a $TSI_{MD/CD}$ value of less than 2 is quite different from the others – it goes much lower. For the rest of the samples, the change in the course of the curve corresponds to the change in the degree of anisotropy.

In the CD, on the contrary, as the degree of anisotropy rose, the curves went lower and had their longer length. Accordingly, the strength and rigidity decreased, elongation increased. Here, too, for the sample with $TSI_{MD/CD}$ values of 1.75 and 2.05, they are quite different from the others – the curves are much higher than the others. For the rest of the samples, a change in the course of the curve corresponds to a change in the degree of anisotropy.

Thus, the change in the nature of the paper deformation under tension was clearly demonstrated. It was reflected in the values of the deformation and strength characteristics (table 2).

In this case, anisotropy of the tensile strength (1.73–6.00) was significantly higher than of the TSI stiffness measured by the ultrasonic method (1.75–4.08). The greatest effect was obtained for the elasticity modulus in the pre-failure zone E_2 (2.8–38.6). The fiber orientation had its key importance with large deformations of the samples. The smallest influence was on the anisotropy of the elastic strain limit (0.93–1.19).

With an increase in the degree of anisotropy, in the machine direction the breaking length of the paper increases by 51 % (from 11750 m for samples with low anisotropy, to 17550 m for samples with high anisotropy). Elastic modulus increases by 56 % (from 6260 to 9800 MPa), tensile energy absorption (TEA) – by 43 % (from 175 to 250 J/m²). The elastic limit increases by 56 % (from 16.6 to 25.9 MPa). The limit of elastic deformation practically does not change and is 0.26–0.27 %. Strain at fracture is reduced by 9 % (from 2.83 to 2.57 %).

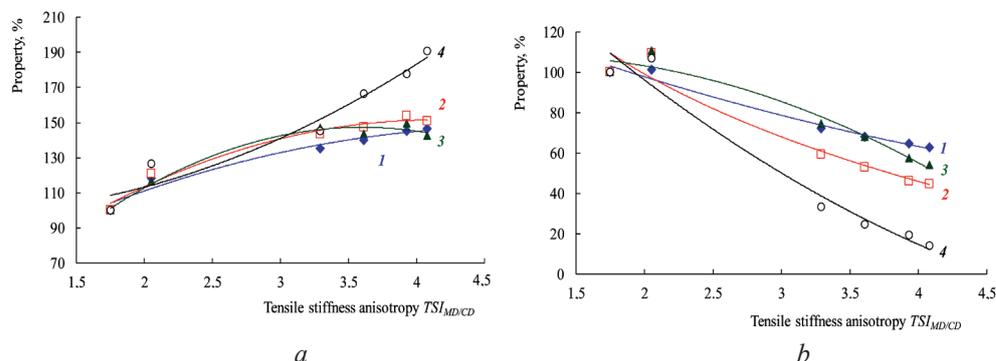


Fig. 6. Deformation and strength properties versus degree of anisotropy for hand-made samples: *a* – MD; *b* – CD; 1 – TSI ; 2 – tensile strength; 3 – TEA ; 4 – modulus of elasticity in the pre-failure zone E_2 , MPa

In the CD, the breaking length of the paper reduced by 55 % (from 6800 m for samples with low anisotropy, to 3050 m for samples with high anisotropy). The elastic modulus decreased by 35 % (from 3280 to 2120 MPa), TEA – by 46 % (from 169 to 92 J/m²). The elastic limit reduced by 38 % (from 8.2 to 5.1 MPa). The limit of elastic deformation practically does not change and is 0.26–0.29 %. The strain at fracture increases by 5 %, having a maximum of 4.66 % at a $TSI_{MD/CD}$ of 3.29, and then decreases to 4.37 %.

Fig. 6 shows the relative change in the main deformation characteristics of the samples depending on the degree of anisotropy according to $TSI_{MD/CD}$. Values for samples with minimal anisotropy are taken as 100 %. As it is shown in fig. 6, when the degree of stiffness anisotropy – $TSI_{MD/CD}$ rose, the stiffness and strength characteristics of the samples increased in the MD and decreased in the CD.

Dependencies shown in fig. 6 are non-linear. For the TSI value, which characterizes the elasticity and stiffness of the material, the rigidity (curve 1), and the breaking length, which characterizes the strength (curve 2), the increase in characteristics in MD and their decrease in the CD slows down in specimens with high anisotropy. This is explained by the predominant contribution of the fibers themselves to the mechanical behavior of the sample in the MD and interfiber bonds in the transverse direction. With a strong orientation of the fibers, close to orthotropy, the influence of the degree of anisotropy decreases. At a low degree of fiber orientation, on the contrary, it is of key importance.

The change in the value of the TEA (curve 3), which characterizes the dynamic strength of the sample, is determined by the simultaneous change in strength and elongation. Therefore, in the MD, the stabilization of its value is observed at high anisotropy, and the decrease in the CD, is observed.

Conclusion

When optimizing the forming mode, it is necessary to take into account the simultaneous and multidirectional change of the paper properties in the MD and CD.

By increasing the degree of fiber orientation in the structure of paper from kraft softwood pulp, it is possible to increase the strength by 55 %, tensile stiffness by 63 % while reducing the extensibility by 10 % in the MD. Dynamic strength, as measured by the TEA failure performance, increased by almost 50 %.

In the CD, on the contrary, by increasing the degree of fiber orientation, it is possible to decrease the tensile stiffness by 33 %, decrease the strength by 55 %, and increase the extensibility by 5 %.

Due to the variation of the forming parameters, the established quantitative regulations allow optimizing the values of the deformation and strength properties of paper and their ratio in the MD and CD.

REFERENCES

1. Beloglazov V.I., Komarov V.I., Gurjev A.V. Anisotropy of Deformational and Strength Characteristics of Kraft-Liner. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2005, no. 5, pp. 113–118. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/513/513fd048ed1675b4a8742e24cd337e24.pdf>
2. Hansson M.T., Rasmuson A. Finite Element Analysis of Three Dimensional Fibre Networks. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.3183/npprj-2004-19-01-p105-111>
3. Horng A.J., Fletcher R.S., Mickleborough C.L., Sasaki K.R. A Novel Use of the Dynamic Sheet Former in Paper Recycling: Simulates the Function of New Recycling Devices. *Pulp and Paper Canada*, 1996, vol. 97, iss. 12, pp. 135–137.
4. Kazakov Y.V. Practice of Using of Deformation Characteristics for an Estimation of Paper and Cardboard Quality. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 1st International Conference*. Arkhangelsk, NArFU, 2011, pp. 88–94.
5. Kazakov Y.V. The Structure and Properties of Laboratory Anisotropic Samples of Pulp and Paper Materials. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2013, no. 6, pp. 56–60.
6. Kazakov Y.V. Kinetics of Deformation of Pulp and Paper Materials at Tensile Test. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 5th International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU, 2019, pp. 23–31.
7. Kazakov Y.V., Koncevaya V.I. Mechanics of Anisotropic Laboratory Hand-Made Samples of Pulp-and-Paper Materials. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 2nd International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU, 2013, pp. 201–207.
8. Kazakov Y.V., Romanova A.N., Chukhchin D.G. Effect of Fiber Orientation Anisotropy on the Paper Deformation Properties. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 3rd International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU, 2015, pp. 298–303.
9. Kazakov Ya.V., Komarov V.I. *The Software of the Laboratory Test Complex for the Deformability and Strength Evaluation of Pulp and Paper Materials (KOMPLEX)*. Certificate of the Computer Software Official Registration No. 2001610526, 2001. 1 p.
10. Komarov V.I. Analysis of the Stress-Strain Relationship under Tensile Testing of Pulp and Paper Materials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1993, no. 2-3, pp. 123–131. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ef4/123_130.pdf
11. Komarov V.I., Beloglazov V.I., Gurjev A.V., Sysoeva N.V. Study of the Factors Influencing the Anisotropy of Tensile Stiffness of Cardboard Liner. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2005, no. 7, p. 48.
12. Komarov V.I., Kazakov Y.V. Analysis of Mechanical Behavior of Pulp and Paper Materials under Tensile Load. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2000, no. 3(12), pp. 52–62.
13. Kulachenko A., Uesaka T. Direct Simulations of Fiber Network Deformation and Failure. *Mechanics of Materials*, 2012, vol. 51, pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.03.010>
14. Lindblad G., Fürst T. *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board*. Kista, Sweden, Lorentzen and Wettre, 2001. 98 p.

15. Mourad S., Skali-Lami S., Trehoult C. Instability of the Flow in a Closed Cylindrical Cavity and in a Short-Dwell Cavity. *Coating Conference Proceedings*. Toronto, 1999, pp. 447–455.
16. Romanova A.N., Kazakov Y.V. Measurement of Fiber Orientation Degree in Anisotropic Paper Structure. *Actual Problems of Metrological Support for Applied Research Practice: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduate Students and Students*. Arkhangelsk, NArFU, 2016, pp. 219–227.
17. Skowroński J.W. Modeling of Refining to Save Energy and Define the Impact of Refining Variables on Printability of Inkjet Paper. Part 3. Model to Predict Properties of Oriented Laboratory Sheets. *Przegląd Papierniczy*, 2011, vol. 67(10), pp. 625–631.
18. Tosto F.J., Chen J., Oliver J.F. Application of the Dynamic Sheet Former to Simulate Paper Grades Produced from Western Canadian Pulps. *Proceedings of the Annual Meeting of the Pulp and Paper Technical Association of Canada*, 2001, vol. 87, iss. B, pp. B31–B41.
19. Uesaka T., Juntunen J. Time-Dependent, Stochastic Failure of Paper and Box. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2012, vol. 27, iss. 2, pp. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.3183/npprj-2012-27-02-p370-374>
20. Volkel H-G. Economical Lab-Sheet Forming Methods. *Proceedings of the European Conference on Pulp and Paper Research: The Present and the Future*. Stockholm, 1996, pp. 179–185.
21. Zhang F.-D., Pei J.-C., Li J., Liu W., Zhou C.-X. The Effect of Speeds of Jet and Wire on the Physical Properties of Paper Sheets Forming in a Dynamic Sheet Former. *China Pulp and Paper*, 2014, vol. 33(6), pp. 25–30.



УДК 630*161+581.45

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-185-191

APPLICATION OF THE ADOBE PHOTOSHOP SOFTWARE PACKAGE IN LEAF BLADE AREA MEASUREMENT OF WOODY PLANTS

Ramis N. Babaev, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABE-8753-2020](https://orcid.org/0000-0003-1604-5505),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1604-5505>

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: lp-ram17@yandex.ru

Original article / Received on March 3, 2020 / Accepted on May 14, 2020

Abstract. There are a number of applied methods for determining morphometric parameters, including the area of leaf blades of woody plants: millimeter graph paper method, method of direct measurements, punching method, and planimetric method. The analysis and practical application of the methods in the test mode revealed their shortcomings related to inaccuracy of measurements, experiment duration, and equipment inaccessibility. Many researchers have successfully acquired digitized images. However, capturing the parameters of the considered structure from the monitor screen is often impossible due to the low availability of morphometric programs and their high cost. The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of existing methods for determining the area of leaf blades on the example of the birch genus (*Betula* L.) trees and to accumulate the algorithm for determining morphometric parameters of birch leaf blades in the Adobe Photoshop software package. We have developed a method for determining morphometric parameters of leaf blades of woody plants using the Adobe Photoshop software package. The research subject is the leaf blades of birch trees. This method requires: blank A4 sheets; a ruler with an angle of 90°; transparent adhesive tape (scotch tape); and a scanner. We draw a reference square of random (but fixed) dimensions in a random corner of each sheet, step by 10 mm from its borders, on a blank A4 sheet using a ruler with an angle of 90°. The square is placed strictly parallel to the sheet borders. Then, leaf blades of the desired wood species are attached to the sheet with scotch tape. Using the scanner, we convert the workpiece into electronic form and upload the image to Adobe Photoshop. In order to receive morphometric parameters, you can use the following program tools: “ruler”, “magic wand”, “magnetic lasso tool”. At the same time, it is possible to automatically select the borders of the studied object, which helps to avoid subjective errors. The resulting measurements are displayed in pixels and then converted to the required units. The obtained data is verified using the reference square. Verification showed that the method accuracy is more than 99.9 %. The proposed method allows to perform fast and accurate measurements of morphometric parameters of leaf blades, without requiring the purchase of expensive equipment, which makes it available to any researcher who faces with the task of measuring the surface of leaf blades of woody plants.

For citation: Babaev R.N. Application of the Adobe Photoshop Software Package in Leaf Blade Area Measurement of Woody Plants. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 185–191. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-185-191

Keywords: Adobe Photoshop, silver birch, morphometric parameters, leaf blade area.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ADOBE PHOTOSHOP ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЛОЩАДИ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

Р.Н. Бабаев, аспирант; ResearcherID: [ABE-8753-2020](https://orcid.org/0000-0003-1604-5505),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1604-5505>

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; e-mail: lp-ram17@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 03.03.20 / Принята к печати 14.05.20

Аннотация. Существует ряд методик определения морфометрических показателей, в т. ч. площади листовых пластин древесных растений: метод нанесения контуров листьев на миллиметровую бумагу, метод промеров, метод высечек, планиметрический метод. Методы проанализированы и применены в тестовом режиме. Выявлены их недостатки, связанные с неточностью измерений, продолжительностью опыта, недоступностью оборудования. Проблема получения оцифрованного изображения успешно решается многими исследователями, но снятие параметров рассматриваемого объекта с экрана монитора часто невозможно по причине малой доступности морфометрических программ и их высокой стоимости. Цель работы – оценить эффективность существующих методов определения площади листовых пластин на примере березы (*Betula L.*) и актуализировать алгоритм определения морфометрических показателей листовых пластин в пакете программ Adobe Photoshop. Нами разработана методика определения морфометрических показателей листовых пластин древесных пород с использованием Adobe Photoshop. Предмет исследования – листовые пластины деревьев рода береза. Для применения данной методики использованы чистые листья формата А4, линейка с углом 90°, прозрачная клейкая лента (скотч), сканер. В произвольном углу каждого листа на расстоянии по 10 мм от его границ и строго параллельно им при помощи линейки был вычерчен поверочный квадрат простых размеров. Скотчем на бумаге закрепляли листовые пластины. При помощи сканера переносили заготовку в электронный вид и загружали изображение в Adobe Photoshop. Для получения морфометрических параметров можно использовать следующие инструменты данной программы: «линейка», «волшебная палочка», «магнитное лассо». При этом есть возможность автоматического выделения границ исследуемого объекта, что позволяет избежать субъективных оценок. Результаты отображены в пикселях, а после их переводят в необходимые единицы измерения. При помощи эталонного квадрата производят проверку полученных данных. Точность составляет более 99,9 %. Предлагаемый метод позволяет быстро и без ошибок определять морфометрические параметры листовых пластин, при этом не нужно дорогостоящего оборудования, что делает метод доступным для любого исследователя, перед которым стоит задача измерения поверхности листовой пластины древесных растений.

Для цитирования: Babaev R.N. Application of the Adobe Photoshop Software Package in Leaf Blade Area Measurement of Woody Plants // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 185–191. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-185-191

Ключевые слова: Adobe Photoshop, береза повислая, морфометрические параметры, площадь листовых пластин.

Introduction

Due to a wide range of useful features and properties, representatives of the birch genus (*Betula* L.) are constantly within the field of view of foresters, botanists, and environmentalists [2–6, 9, 11, 13, 19, 20]. When carrying out scientific work associated with the determination of the biological potential of trees belonging to this genus, and when introducing them, a necessary condition for substantiating the prospects for their practical use is the study of morphometric parameters of leaves and the determination of the assimilation apparatus strength. The scientific value of these parameters is related to the determination of photosynthetic potential and net productivity of photosynthesis, which is the basis for productivity assessment [7, 8, 15]. The current methods of finding morphometric parameters of the leaf surface are rather cumbersome, not accurate and in some cases their disadvantage is due to the research duration. However, a large volume of tests requires speed and high accuracy of analysis.

The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of existing methods for determining the area of leaf blades using the example of birch trees and to accumulate the algorithm for determining morphometric parameters of birch leaf blades in the Adobe Photoshop software package.

Research objects and methods

The research objects were existing methods for determining the area of leaf blades and the proposed method using the Adobe Photoshop software package. Currently, several methods for determining the surface area of leaf blades of woody plants are most commonly used. They are discussed below in descending order from the most used in practice to the least.

Millimeter graph paper method (hereinafter referred to as Method 1). During its implementation, a birch leaf blade was circled along its edges. Then, the area was counted based on the 1×1 mm cells inside the contour. This method for determining the leaf blade area is fairly objective and quite accurate; however, it is a very laborious and time-consuming process that is not suitable for measuring a large number of leaves.

Method of direct measurements (hereinafter – Method 2) [10, 18]. After determining the area of a number of leaf blades by Method 1, their length (L) and maximum width (W) were measured. Then, the circled contours of the leaf blades were described by a simple geometric shape – a rectangle. The average filling factor of the rectangle was 0.7 for the studied birch species. Leaf area (S) was calculated by the following equation:

$$S = LW \cdot 0.7.$$

This method has a high error due to the scatter of the filling coefficient of a simple geometric shape relative to each leaf blade, and the constant determination of the coefficient in the absence of the performed Method 1 makes Method 2 unreasonably laborious. In our case, the deviation with respect to Method 1 was up to 28 % providing its unsuitability for accurate studies.

Punching method (hereinafter – Method 3) [12, 18]. In order to carry out measurements by this method, we used undamaged leaves, which were previously measured by the first and the second methods; their wet mass (M_i) was determined. It

was important that the leaves did not dry out. Punches of a certain diameter were cut from each leaf with a cork drill, 5–10 pcs per one leaf. They were cut so that the sample included both the leaf laminae proper and its central veins. Then, we determined the mass (M_c) of all punches. The leaf area was determined by the following equation:

$$S = M_1 a \pi D^2 / M_p,$$

where S – leaf blade area, mm²; M_1 – mass of leaves in a sample, g; a – number of punches, pcs; D – drill diameter, mm; M_p – mass of a punch, g.

The main and critical drawback of this method is that the leaf veins falling into the punches significantly increase the value of M_p , as a result the deviation from the results received by Method 1 was up to 31 %.

Planimetric method [8, 14]. According to its description, the harvested leaves are weighed and placed on the moving belt of an electronic device – planimeter. For example, PLANIX planimeters allow to quickly and accurately measure line lengths, calculate areas, coordinates, angles, arcs, and circle radii. Measurements can be taken in millimeters, centimeters, meters, kilometers, and hectares. This method is quite accurate, however it requires expensive equipment for implementation.

A method for determining the morphometric parameters of leaf blades of woody plants using the Adobe Photoshop software package (hereinafter – Adobe Photoshop Method). Adobe Photoshop is a multifunctional graphic editor developed and distributed by Adobe Systems. It mainly works with bitmap images; however, it has some vector tools as well [16, 17]. The proposed method is developed taking into account the shortcomings of existing methods for determining the area of a tree leaf blade and accumulates the possibility for determining other morphometric parameters. The research method was based on the principles of a single logical difference, suitability and expediency of experience [1].

In order to implement the method, we used the following equipment, software, and materials: Kyocera ECOSYS M3540DN scanner; Acculab Vicon VIC-300d3 electronic scales with accuracy up to 0.001 g; ruler with angle of 90°; since the scanner we have chosen for the study has a maximum paper size of A4, blank sheets of this size will be required; transparent adhesive tape (scotch tape); Adobe Photoshop (2020 trial version); freshly cut normally developed silver birch (*Betula pendula* Roth.) shoots with typical leafing out and undamaged foliage after achieving the size and shape peculiar to the species.

The course of the work is shown below.

The reference square of random, but strictly fixed sizes (test object) is drawn on a blank A4 sheet by means of a ruler with an angle of 90° in a random corner, step by 10 mm from its borders. The square is drawn strictly parallel to the borders of the sheet. We have chosen dimensions of 25×25 mm. Thus, we know for sure its height, width, and area – 625 mm².

Separate the leaf blades with a whole petiole from the shoot. Each leaf blade with a petiole is weighed on electronic scales Acculab Vicon VIC-300d3 and attached to the prepared sheet of paper with the square using transparent thin scotch tape. Next to each attached leaf blade record the measurement values of its mass. In our case, 7 leaf blades with a petiole can be freely placed on one sheet of A4 paper.

Using the Kyocera ECOSYS M3540DN laser multifunctional device (scanner), A4 sheets with attached samples are scanned. Scan quality is set to 200 dpi. Then, open the resulting image in Adobe Photoshop.

After opening the file, select the tab “Image Size”. Check the image settings in the window that appears. Its dimensions should coincide with the size of the A4 size – 297×210 mm. The next step is to convert the resolution of 200 ppi to pixels/cm for simplicity of measurement. The resulting value is 78.74 pixels/cm. To convert that into millimeters divide that by 10 and get 7.874 pixels/mm. Thus, there will be $7.874 \cdot 7.874 = 62$ pixels/mm². If the scan resolution is different from that suggested in the method, it is necessary to independently determine the number of pixels per mm and mm² in the specified way.

The next step can be done in two ways.

Variante 1. In order to define leaf blade parameters on the toolbar (on the left side of the screen), select the magnetic lasso tool. Clamp the left mouse button and encircle the leaf blade carefully along the contour. After closing the encircling, the program highlights the leaf blade as a separate contour.

Variante 2. Use the Quick Selection tool on the toolbar (on the left side of the screen) to define the leaf blade parameters. Point the tool to the leaf blade and click on it. The program will automatically highlight the desired contour.

Important. In this method, it is necessary to cancel the selection each time the individual leaf blade data is received; otherwise subsequent values are calculated on an ascending total.

After selecting the image using one of the ways, go to the menu: “image – analysis – record measurements”. The resulting measurements are displayed in pixels per inch at the bottom of the screen.

In order to convert values from pixels per inch to pixels per mm and mm², use the appropriate algorithm specified in the paragraph “After opening...”.

In order to measure the parameters of a petiole, use the ruler tool from the menu “image – analysis – ruler tool”. Clamp the left mouse button and measure the desired length/width. The resulting values are displayed in pixels at the top of the screen – the “ L_1 ” parameter. Then, convert to mm in accordance with the paragraph “After opening...”.

In order to verify the test accuracy apply this method on the reference square, the metric parameters of which are already known. When checking the obtained dimensions on the reference square, the following data is obtained: length – 24.98 mm; width – 25.00 mm; and area – 624.5 mm². Therefore, the error is less than 0.1 %.

Research results and discussion

When determining the area of leaf blades by various methods, the obtained values differed from each other (see the table below).

The research has revealed that with respect to the existing methods for determining the area of leaf blades, Method 1 is the most accurate. However, this method is very labor-intensive, which is unprofitable in determining the area of a large number of objects.

The method for determining morphometric parameters using the Adobe Photoshop software package is quite reasonable, since it allows to determine many parameters of leaf blades (length, width, and area) at once, almost eliminating the factor of human error.

Moreover, the proposed method allows to archive the obtained primary data in the computer memory and process it when most convenient.

Results of determining the leaf blade areas by various methods

| No. | Method 1 | Method 2 | | Method 3 | | Adobe Photoshop Method | |
|-----|----------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| | | mm ² | deviation from Method 1, % | mm ² | deviation from Method 1, % | mm ² | deviation from Method 1, % |
| 1 | 1262 | 1734 | +27 | 970 | -30 | 1269 | +1 |
| 2 | 1332 | 1704 | +22 | 1799 | +26 | 1323 | -1 |
| 3 | 1319 | 1730 | +24 | 1459 | +10 | 1332 | +1 |
| 4 | 1223 | 1486 | +18 | 974 | -26 | 1219 | 0 |
| 5 | 1201 | 1496 | +20 | 1609 | +25 | 1192 | -1 |
| 6 | 1264 | 1559 | +19 | 980 | -29 | 1254 | -1 |
| 7 | 1106 | 1485 | +26 | 1603 | +31 | 1113 | +1 |

Conclusion

The existing methods for determining the leaf blade area have many shortcomings including the purchase of expensive equipment. The Adobe Photoshop software package allows any researcher to quickly and accurately measure the morphometric parameters of leaf blades.

REFERENCES

1. Andreyev G.I., Barvinenko V.V., Verba V.S., Tarasov A.K., Tikhomirov V.A. *Fundamentals of Scientific Work and Methodology of Dissertation Research*. Moscow, FiS Publ., 2012. 296 p.
2. Babaev R.N. Starch Content in Shoot Tissues of Different Birch Species during Introduction. *Russian National Scientific and Practical Online Conference for Students and Young Scientists "Growth and Reproduction of Academic Staff in Agriculture and Forestry"*. Forestry Section. Nizhny Novgorod, NNSAA, 2019, pp. 65–71.
3. Babaev R.N., Besschetnova N.N. Intraspecific Diversity of Curly Birch (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* (Merckl.)) in Test Plantations in the Nizhny Novgorod Region. *International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Sustainable Forest Development", Dedicated to the 70th Anniversary of Higher Forest Education in Kazakhstan*. Almaty, 2018, pp. 60–64.
4. Babaev R.N., Besschetnova N.N. Inventory of Curly Birch in Test Plantations of the Nizhny Novgorod Region. *Forestry: Proceedings of the 83rd Scientific and Technical Conference of Faculty and Academic Staff, Researchers and Graduate Students (with International Participation)*. Minsk, BSTU, 2019, pp. 10–11.
5. Babaev R.N., Besschetnova N.N. Prospects of Curly Birch Forest Plantations in the Russian Federation and the Republic of Belarus. *Economic Aspects of the Development of Agro-Industrial Complex and Forestry. Forestry of the Union State of Russia and Belarus: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Nizhny Novgorod, NNSAA, 2019, pp. 78–82.
6. Bolondinskiy V.K. Research of Dependence of Photosynthesis on the Intensity of Solar Radiation, Air Temperature and Humidity in Karelian (Curly) and Silver Birch Plants. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science], 2010, no. 2, pp. 3–10.

7. Chung H.-H., Barnes R.L. Photosynthate Allocation in *Pinustaeda*. I. Substrate Requirements for Synthesis of Shoot Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, vol. 7, no. 1, pp. 106–111. DOI: <https://doi.org/10.1139/x77-015>

8. Dmitriev N.N., Khusnidinov Sh.K. Accelerated Method of Determination of Leaf Area of Crops by Computer Technology. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2016, no. 7, pp. 88–93.

9. Eichelmann H., Oja V., Rasulov B., Padu E., Bichele I., Pettai H., Möls T., Kasparova I., Vapaavuori E., Laisk A. Photosynthetic Parameters of Birch (*Betula pendula* Roth) Leaves Growing in Normal and in CO₂- and O₃-Enriched Atmospheres. *Plant, Cell and Environment*, 2004, vol. 27, iss. 4, pp. 479–495. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2003.01166.x>

10. Lavrenko E.M. *Field Geobotany*. Vol. I. Leningrad, Nauka Publ., 1959. 444 p.

11. Matyssek R., Günthardt-Goerg M., Maurer S., Christ R. Tissue Structure and Respiration of Stems of *Betula pendula* under Contrasting Ozone Exposure and Nutrition. *Trees*, 2002, vol. 16, pp. 375–385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0183-5>

12. Nichiporovich A.A. *Methodological Guidelines for Accounting and Control of the Most Important Indicators of the Processes of Photosynthetic Activity of Plants in Sowings*. Moscow, VASKhNIL Publ., 1969, pp. 50–57.

13. Oleksyn J., Żytkowiak R., Reich P.B., Tjoelker M.G., Karolewski P. Ontogenetic Patterns of Leaf CO₂ Exchange, Morphology and Chemistry in *Betula pendula* Trees. *Trees*, 2000, vol. 14, pp. 271–281. DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00009768>

14. Posypanov G.S. *Methods of Studying the Biological Fixation of Air Nitrogen*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1991. 300 p.

15. Rothman D.H. Atmospheric Carbon Dioxide Levels for the Last 500 Million Years. *PNAS*, 2002, vol. 99(7), pp. 4167–4171. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.022055499>

16. Rybalkina D.H., Kurkin A.V., Rickles V.P. Integration of Histology and Informatics when Working with Graphic Objects. *Obrazovatel'nyye tekhnologii i obshchestvo* [Educational Technology and Society], 2013, vol. 16, no. 4, pp. 316–325.

17. Sadakov A.E., Zaikov A.A. Application of the Adobe Photoshop Software Package in Morphometry. *Byulleten' Volgogradskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk i Administratsii Volgogradskoy oblasti*, 2006, no. 2, p. 27.

18. Tarasenko S.A., Doroshkevich E.I. *Workshop on Physiology and Biochemistry*. Grodno, Oblizdat Publ., 1995. 122 p.

19. Wittmann C., Pfantz H. Temperature Dependency of Bark Photosynthesis in Beech (*Fagus sylvatica* L.) and Birch (*Betula pendula* Roth.) Trees. *Journal of Experimental Botany*, 2007, vol. 58, iss. 15-16, pp. 4293–4306. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm313>

20. Zakharov A.B., Besschetnov V.P. Anomalies of Birch (*Betula*) Branching in Protective Forest Belts of Highways. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 95–104. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5>

УДК 630*232.33.4 (571.1/.5)

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-192-200

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР ПОСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

Н.М. Дебков, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID:* [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, просп. Академический, 10/3, г. Томск, Россия, 634055; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru
Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, д. 36, г. Томск, Россия, 634050

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 26.02.20 / Принята к печати 18.05.20

Аннотация. Интенсификация лесного хозяйства предполагает применение современных методов воспроизводства лесов, к которым относится использование посадочного материала с закрытой корневой системой. Целью данной работы является оценка приживаемости и линейного роста сеянцев ели с закрытой корневой системой в зависимости от расположения места посадки и проведенных агротехнических уходов. Исследования осуществлены на экспериментальном объекте в Томском районе Томской области. Установлено, что во многих брикетах находится не 1 сеянец, а 2–4 шт., и поэтому на лесокультурную площадь высаживается примерно такое же количество сеянцев, как и при классической посадке материала с открытой корневой системой. Выявлено, что высота 30–35 % сеянцев не соответствует нормативным значениям, что отмечалось, как правило, в тех брикетах, где было несколько растений. По данным осенней инвентаризации от высоты культур вариантов «пласт» и «необработанная почва» достоверно отличается высота культур, созданных высаживанием сеянцев в дно борозды (тест Краскела–Уоллиса, $p = 0,0001 > 0,05$). По приросту в высоту выделяются варианты «бок пласта» и «борозда», имеющие лучшие показатели, также достоверно отличающиеся от вариантов «пласт» и «необработанная почва» (тест Краскела–Уоллиса, $p = 0,0001 > 0,05$). Приживаемость ниже 85 % отмечена в посадках на необработанную почву, в дно борозды и в пласт с проведенными агротехническими уходами. За исключением посадки в бок пласта, 3-кратные уходы снизили приживаемость культур. Таким образом, наиболее удачным является способ посадки в бок пласта.

Для цитирования: Дебков Н.М. Опыт создания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 192–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-192-200

Ключевые слова: ель сибирская, лесные культуры, приживаемость сеянцев, линейный рост сеянцев, посадочный материал с закрытыми корнями, Томская область.

EXPERIENCE IN THE CREATION OF FOREST PLANTATIONS USING CONTAINER SEEDLINGS

Nikita M. Debkov, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369), *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademicheskij, 10/3, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

National Research Tomsk State University, prosp. Lenina, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation

Original article / Received on February 26, 2020 / Accepted on May 18, 2020

Abstract. Intensification of forestry requires the use of modern methods of reforestation, which include the introduction of container planting material. The purpose of this work is to evaluate the survival rate and linear growth of spruce container seedlings depending on the planting site location and the agrotechnical tending. The studies were carried out at the test site located in the Tomsk district of the Tomsk region. It was found that many planting containers store not 1 seedling, but 2–4 pcs and therefore approximately the same quantity of seedlings as in the traditional planting of container planting material. It was revealed that the height of 30–35 % of seedlings fails to fulfill the standard values, which was observed, as a rule, in the planting containers with several plants. According to the autumn inventory data, the height of plantations created by planting seedlings in the furrow bottom (Kruskal-Wallis test, $p = 0.0001 > 0.05$) reliably differs from the height of plantations of “mound” and “untreated soil” options. In terms of height growth, the options “mound side” and “furrow” have the best performance, also significantly different from the options “mound” and “untreated soil” (Kruskal-Wallis test, $p = 0.0001 > 0.05$). Survival rate below 85 % was observed in the plantings of the following options: “untreated soil”, “furrow bottom”, and “mound” with agrotechnical tending. The 3-fold tending decreased the survival rate of plantations except for planting in the mound side. Thus, the most successful option of planting is planting in the mound side.

For citation: Debkov N.M. Experience in the Creation of Forest Plantations Using Container Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 192–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-192-200

Keywords: Siberian spruce, forest plantations, survival rate of seedlings, linear growth of seedlings, container seedlings, Tomsk region.

Введение

На современном этапе развития лесохозяйственного производства самой обсуждаемой проблемой в России является интенсификация лесного хозяйства и лесопользования [3]. Большинство экспертов считают наиболее приемлемой скандинавскую модель лесопользования, в которой основное место занимает воспроизводство лесов за счет формирования культур посадочным материалом с закрытой корневой системой (ЗКС) [1, 2]. Действующие нормативы воспроизводства лесов [7] предусматривают создание насаждений саженцами с ЗКС не менее чем на 20 % площади фонда лесовосстановления, начиная с 2022 г. В планах Рослесхоза к 2030 г. повысить долю лесных культур из материала с ЗКС до 45 %. В этой связи последние несколько лет лесопромышленные компании Томской области массово закупают сеянцы с ЗКС. Однако первые результаты создания подобных лесных культур не обнадеживают: очень низкая приживаемость или даже массовая гибель.

Относительно недавно в нашей стране были созданы лесные селекционно-семеноводческие центры (ЛССЦ). Единственный в Сибири ЛССЦ был построен в с. Бобровка Алтайского края (2012 г.). Опыт создания экспериментальных и производственных культур имеется только в таежной зоне европейской части страны [5, 6, 8], поэтому целью исследования стала экспериментальная

оценка приживаемости и линейного роста сеянцев ели с ЗКС в зависимости от расположения посадочного места и агротехнических уходов в Томской области.

Объекты и методы исследования

Место закладки эксперимента находится в Томском районе Томской области, широта 56°38'00", долгота 85°13'07". Обработка почвы выполнена трактором МТЗ-82 с 3-корпусным плугом сельскохозяйственного назначения в сентябре 2018 г. Лесокультурная площадь представляет собой заброшенное (около 10 лет) сельскохозяйственное (картофельное) поле с серой лесной, средне- и тяжелосуглинистой почвой, подходящей для произрастания лесной растительности, особенно для ели, поскольку ранее (около 50 лет назад) здесь располагался ельник с примесью кедра. Общее проективное покрытие травами равно 100 %, доминируют мятлик луговой (*Poa pratensis*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), бодяк щетинистый (*Cirsium arvense*), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium*), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*).

Посадка осуществлялась под ломик (имитация посадочного кола), диаметр которого имел размер, соответствующий размеру брикетов. Специальная посадочная труба («Pottiputki») в Томской области, как и во многих других регионах, при создании производственных культур не используется по причине дороговизны и сложности применения на глинистых (с повышенной плотностью) почвах. Закладка эксперимента производилась сразу после обработки почвы.

Состояние сеянцев с ЗКС на момент их поступления характеризовалось как удовлетворительное, т. е. посадочный материал был жизнеспособный, но отмечалась дехромация хвои. Его перевозка осуществлялась в деревянных ящиках на расстояние около 500 км в течение 1 дня. В дальнейшем сеянцы с ЗКС транспортировались непосредственно арендаторами на лесокультурные площади для посадки.

Схемы посадки: 2 варианта «в дно борозды» (наиболее распространенная посадка), 2 варианта «в пласт», 1 вариант «по необработанной почве», 1 вариант «в бок пласта». Шаг посадки составлял 0,5 м. Каждый вариант состоял из 50 шт., т. е. всего посажено 300 брикетов. По дополнительному варианту в дно борозды и в пласт сделано для оценки приживаемости и состояния культур с ЗКС без проведения агротехнических уходов.

Посадка в пласт по сравнению с наиболее распространенной схемой в дно борозды имеет преимущество в виде меньшего количества уходов за счет более высокого расположения сеянцев, рост же их должен быть лучше вследствие того, что корневая система находится не в уплотненном иллювиальном горизонте, а в более плодородном и рыхлом. Посадка по несслежавшимся пластам не рекомендована, но культуры садили в первый пласт, т. е. тот, который оборачивается не на дернину, а на минеральную часть почвы, и, кроме того, под высокотравьем (1,5–2 м) по всему полю растут мхи, значит влажность на уровне почвы нормальная. Посадка в бок пласта лишена недостатков обоих названных способов. Создание культур по необработанной почве описано в

научной литературе, есть положительные отзывы [9]. Агротехнические уходы выполнялись мотокусторезом Newton в середине июня, июля и августа.

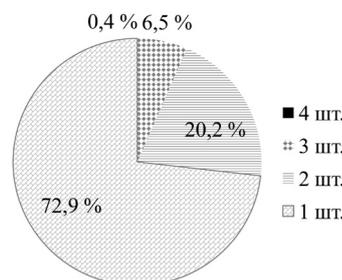
Металлической линейкой измерялись высота и прирост с точностью до 1 мм, штангенциркулем – диаметр ствола у корневой шейки. Камеральная обработка экспериментального материала производилась в программе STATISTICA 10 с использованием стандартных описательных статистик, непараметрических критериев оценки достоверности разности для двух (тест Манна–Уитни) и нескольких (тест Краскела–Уоллиса) независимых переменных.

Результаты исследования и их обсуждение

Первичная (весенняя) инвентаризация показала, что во многих брикетах находился не 1 сеянец, а 2–4 шт. (рис. 1). Чаще всего было 2 экземпляра, реже 3, и только в нескольких брикетах по 4 шт. В целом в 300 брикетах оказалось 584 сеянца, т. е. почти в 2 раза больше, чем единиц упаковки. С учетом нормативов по густоте при выполнении лесовоспроизводственных мероприятий [7] на лесокультурную площадь высаживают примерно такое же количество сеянцев, как и при классической посадке материала с открытой корневой системой. По итогам осенней инвентаризации установлено, что в 69 % посадочных мест растет один сеянец, в 25 % – два, в 6 % – три и в 0,5 % – четыре. То есть отпад шел в основном за счет одиночных сеянцев.

Рис. 1. Исходное число сеянцев в одном брикете

Fig. 1. The initial number of seedlings in one container



Средняя высота партии равна 11,25 см с колебанием 3...34 см (рис. 2). При этом около 30–35 % сеянцев ниже нормы, но это в основном «лишние» ели, которые отстают от лидера по росту.

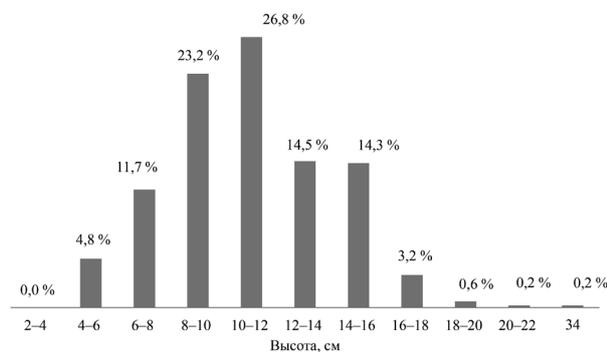


Рис. 2. Исходное распределение посадочного материала с ЗКС по высоте

Fig. 2. The initial distribution of the container planting material by height

Согласно результатам инвентаризации (рис. 3), до начала роста верхушечной почки уже наблюдаются различия в жизнеспособности посадочного материала с ЗКС, обусловленные расположением посадочного места. Ели, высаженные по дну борозд, были жизнеспособны на 82 %, в бок пласта – на 71 %, в пласт – на 65 %, хуже всего выглядели сеянцы на необработанной почве – 35 % жизнеспособных. Однако осенняя инвентаризация показала, что только сеянцы, посаженные в дно борозды, подтвердили данные по жизнеспособности, установленные весенним учетом. В вариантах «пласт» и «бок пласта» около половины усыхающих сеянцев оправились и дали побег. Больше всего восстановилось сеянцев на необработанной почве (около 60–70 %). В целом в первую зиму после посадки погибло 3–7 % сеянцев, и только в варианте с необработанной почвой этот показатель составил 20 %, т. е. здесь по весне культуры уже требовалось дополнять. К осени приживаемость опустилась ниже нормативной в вариантах «пласт» и «борозда», в которых проводились 3-кратные уходы. Приживаемость на уровне 85 % наблюдается у сеянцев, посаженных в бок пласта с уходами, в пласт и по дну борозды без уходов.

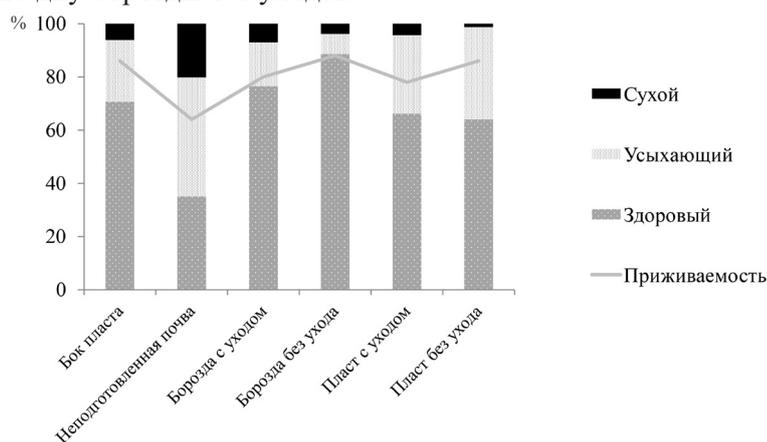


Рис. 3. Состояние посадочного материала с ЗКС на начало мая 2019 г. в зависимости от места посадки и приживаемость по состоянию на конец октября 2019 г.

Fig. 3. The state of the container planting material as of early May 2019 depending on the planting site location and the survival rate as of the end of October 2019

Сеянцы, посаженные в борозде с уходом, по итогам осенней инвентаризации оказались выше и толще, чем сеянцы без ухода. Но прирост у первых был несколько ниже. Статистический анализ подтвердил, что между ними существуют различия по высоте и диаметру (тест Манна–Уитни, $p = 0,0012 < 0,05$ и $p = 0,0027 < 0,05$ соответственно), но по приросту в высоту различий не выявлено (тест Манна–Уитни, $p = 0,4881 > 0,05$). Анализ с помощью теста Краскела–Уоллиса показал, что по данным весенней инвентаризации именно вариант, в котором сеянцы высажены в борозду с уходом, имел достоверные различия с другими вариантами по высоте ($p = 0,0001 - 0,0482 > 0,05$) (см. таблицу).

Биометрические параметры культур с ЗКС

| Вариант посадки | Таксационный показатель | N | M±m | Lim | S | Σ | CV |
|-------------------------------|-------------------------|----|----------|----------|------|-----|----|
| Борозда с уходом | Высота, см* | 80 | 12,9±0,3 | 7,0–19,0 | 9,5 | 3,1 | 24 |
| | Высота, см | 66 | 16,3±0,5 | 7,2–24,9 | 19,3 | 4,4 | 27 |
| | Прирост, см | | 6,6±0,4 | 0,0–12,7 | 9,0 | 3,0 | 46 |
| | Диаметр, мм | | 2,1±0,1 | 0,5–3,5 | 0,5 | 0,7 | 33 |
| Борозда без ухода | Высота, см* | 79 | 10,1±0,3 | 5,0–16,0 | 6,7 | 2,6 | 25 |
| | Высота, см | 76 | 14,1±0,5 | 5,6–28,5 | 18,7 | 4,3 | 31 |
| | Прирост, см | | 7,1±0,3 | 1,0–18,3 | 9,2 | 3,0 | 43 |
| | Диаметр, мм | | 1,7±0,1 | 0,8–3,1 | 0,3 | 0,6 | 35 |
| Пласт с уходом | Высота, см* | 86 | 11,3±0,3 | 5,0–19,0 | 8,0 | 2,8 | 25 |
| | Высота, см | 60 | 13,0±0,5 | 5,6–21,9 | 13,1 | 3,6 | 28 |
| | Прирост, см | | 3,8±0,2 | 0,3–9,0 | 3,7 | 1,9 | 51 |
| | Диаметр, мм | | 2,1±0,1 | 1,0–3,2 | 0,2 | 0,5 | 23 |
| Пласт без ухода | Высота, см* | 75 | 10,6±0,3 | 3,0–16,0 | 8,8 | 3,0 | 28 |
| | Высота, см | 66 | 13,7±0,6 | 3,6–25,6 | 24,4 | 4,9 | 36 |
| | Прирост, см | | 4,6±0,3 | 0,5–10,8 | 5,1 | 2,3 | 49 |
| | Диаметр, мм | | 1,9±0,1 | 0,5–3,8 | 0,4 | 0,7 | 35 |
| Бок пласта с уходом | Высота, см* | 82 | 10,9±0,3 | 7,0–21,0 | 6,9 | 2,6 | 24 |
| | Высота, см | 70 | 14,7±0,4 | 7,6–21,5 | 13,2 | 3,6 | 25 |
| | Прирост, см | | 6,5±0,3 | 1,0–15,6 | 7,1 | 2,7 | 41 |
| | Диаметр, мм | | 2,5±0,1 | 1,5–4,5 | 0,4 | 0,6 | 26 |
| Необработанная почва с уходом | Высота, см* | 94 | 11,6±0,4 | 3,5–34,0 | 12,4 | 3,5 | 30 |
| | Высота, см | 48 | 13,6±0,5 | 6,7–21,5 | 11,5 | 3,4 | 25 |
| | Прирост, см | | 3,8±0,2 | 1,1–8,0 | 2,8 | 1,7 | 44 |
| | Диаметр, мм | | 1,9±0,1 | 1,0–3,0 | 0,2 | 0,5 | 24 |

Примечание: * – измерения выполнены весной 2019 г., остальные данные получены осенью 2019 г.; N – число измерений; M±m – среднее значение с ошибкой; Lim – минимальное и максимальное значения; S – дисперсия; σ – среднее квадратическое отклонение; CV – коэффициент вариации.

Различия в биометрических показателях у культур, посаженных в пласт с уходом и без него, имеются только по диаметру (тест Манна–Уитни, $p = 0,0363 < 0,05$). По высоте и линейному приросту различий не выявлено (тест Манна–Уитни, $p = 0,2880 > 0,05$ и $p = 0,0545 > 0,05$ соответственно). Однако визуально определено, что в варианте без ухода высота была ниже, а стала выше. Прирост также незначительный, но выше.

По данным осенней инвентаризации достоверно отличается высота культур, созданных высадкой материала в дно борозды, от высоты варианта в пласт без обработки почвы (тест Краскела–Уоллиса, $p = 0,0001 > 0,05$). При этом, что в начале эксперимента именно вариант с посадкой в дно борозды имел достоверно самую низкую среднюю высоту. По приросту четко выделяются

варианты с высадкой материала в бок пласта и в борозду, имеющие лучшие показатели, достоверно не отличающиеся между собой, но достоверно отличающиеся от вариантов «пласт» и «необработанная почва» (тест Краскела–Уоллиса, $p = 0,0001 > 0,05$). Разница в приросте составила почти два раза (6,5–6,6 и 3,8 см). По диаметру среди остальных однозначно выделяется вариант «бок пласта» (тест Краскела–Уоллиса, $p = 0,0001 > 0,05$): диаметр деревьев в нем 2,5 мм, в остальных вариантах – 1,9–2,1 мм.

Как видно из полученных результатов, наиболее низкие приживаемость и биометрические показатели характерны для варианта «необработанная почва». Подобные выводы ранее были сделаны в условиях Архангельской области. [4] и Финляндии [13]. На лучшую приживаемость посадки в пласт было указано в обзоре Р.Ф. Саттон [20], впоследствии эти выводы подтверждены на посадках ели обыкновенной в Швеции [12] и Латвии [10]. В нашем случае лучшая приживаемость получена в вариантах с высадкой сеянцев в борозду и в бок пласта с уходами, в пласт без ухода. Это позволяет заключить, что уходами способствовали иссушению почвы и тем самым увеличили отпад деревьев, ведь именно вода [19] определяет приживаемость. Для устранения этого основного недостатка посадки в пласт предлагается метод заглубленной посадки [18], который в эксперименте, проведенном в Центральной Финляндии, показал, что глубокая посадка улучшает рост сеянцев ели обыкновенной и в сухих условиях дает им преимущество. Учитывая динамику задернения, ряд ученых предлагают начинать уходами в условиях свежей вырубке на 3–5-й год, а на прошлогодних вырубках – со 2-го года [8]. В нашем случае причина, по которой мы не рекомендуем проводить уходами в год посадки (при весенней) и на следующий год (при осенней), заключается в том, что практиками лесного хозяйства отмечена способность ели сибирской хорошо переносить заглушение травянистым покровом. Это единственная порода, которая способна самостоятельно выйти из-под влияния трав. Визуальная оценка зарастания на наших объектах показала: в первый вегетационный период травы в борозде почти не развиваются, а по пластам их густота вдвое меньше, чем в фоновых условиях.

Нельзя не отметить, что сеянцы с ЗКС имеют определенный жизненный ресурс и зачастую у практически усохшего сеянца верхушечная почка трогается в рост. Это обусловлено наличием торфяного субстрата, который способствует хорошей приживаемости и обеспечивает интенсивное развитие [15]. Однако проведенные сравнительные исследования [16] показали, что в действительности преимущества посадочного материала с ЗКС проявляются только в первые годы, в дальнейшем различия с культурами, созданными посадочным материалом с открытыми корнями, отсутствуют.

Отметим, что недавняя попытка органов государственной власти запретить осеннюю посадку не имеет научного обоснования. Специально проведенные сравнительные исследования выявили, что весенняя посадка дает более низкие приросты [11, 17]. В условиях таежной зоны Сибири она вообще трудно осуществима по производственным причинам (недоступность лесокультурных площадей, переувлажненность почвогрунтов и т. д.).

В целом любую технологию необходимо дорабатывать под конкурентный лесобразующий вид, под региональные климатические и лесорастительные условия [14].

Заключение

Экспериментальная оценка приживаемости однолетних сеянцев ели с закрытой корневой системой показала, что данный показатель зависит не только от расположения посадочного места, но и от агротехнических уходов. Не рекомендуется посадка в автоморфных условиях произрастания без обработки почвы. Наиболее распространенная посадка в дно борозды дает нормативную приживаемость, так же, как и посадка в пласт, но без уходов ввиду пересыхания пластов и, по-видимому, излишней инсоляции. Трехкратные уходы снизили приживаемость культур, исключением стала посадка в бок пласта. Оценка линейного роста лесных культур, который указывает на успешность их адаптации к новым условиям среды, свидетельствует о том, что прирост сеянцев, посаженных в борозде и в бок пласта, в 2 раза выше, чем в остальных вариантах. Таким образом, наиболее удачным способом посадки является посадка в бок пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бартенев И.М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПМЗК // Лесотехн. журн. 2013. № 2. С. 123–130. Bartenev I.M. On the Question of Creation of Forest Cultures by PMCR Planting. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2013, no. 2, pp. 123–130.
2. Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. СПб.: СПбНИИЛХ, 2000. 293 с. Zhigunov A.V. *Theory and Practice of Growing Container Seedlings*. Saint Petersburg, SPbNIIKKh Publ., 2000. 293 p.
3. Михайлов К.Л. Повышение эффективности лесного хозяйства на основе интенсификации лесопользования и воспроизводства лесов // Экономика природопользования. 2016. № 3. С. 32–40. Mikhailov K.L. Improving the Efficiency of Forestry on the Basis of Intensification. *Ekonomika prirodopol'zovaniya*, 2016, no. 3, pp. 32–40.
4. Мочалов Б.А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из сеянцев с закрытыми корнями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 4. С. 9–18. Mochalov B.A. Soil Cultivation and Selection Planting Site Attached to Pine Artificial Stands Creation from Containerized Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 4, pp. 9–18. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/96f/podgotovka_kornyami.pdf
5. Мочалов Б.А., Сеньков А.О. Рост сеянцев сосны с закрытыми и открытыми корнями в культурах таежной зоны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 4. С. 145–147. Mochalov B.A., Senkov A.O. Growth of Bare-Root and Containerized Pine Seedlings in Cultures of Taiga Zone. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2007, no. 4, pp. 145–147. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/9f4/9f4190c8f1354537742045fd5a5cb1ad.pdf>
6. Петухов И.Н. Лесоводственная эффективность создания лесных культур сеянцами с закрытой корневой системой в условиях Костромской области // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 3. С. 33–36. Petukhov I.N. Silvicultural Efficiency of Planting Forest Plantation Using Containerized Tree Seedling Kostroma Region in the Field. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy Vestnik* [Forestry Bulletin], 2011, no. 3, pp. 33–36.

7. Приказ М-ва природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 25 марта 2019 г. № 188 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений». Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/554151577> (дата обращения: 3.12.2019 г.). *Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Dated March 25, 2019 No. 188 "On Approval of the Rules of Reforestation, the Structure of the Reforestation Project, and the Procedure for Developing the Reforestation Project and Amending It"*.

8. Соколов А.И., Харитонов В.А., Пеккоев А.Н., Кривенко Т.И. Сохранность и рост культур сосны, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой в условиях Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 6. С. 46–56. Sokolov A.I., Kharitonov V.A., Pekkoiev A.N., Krivenko T.I. Preservation and Growth of Pine Cultivated by Ball-Rooted Planting Stock in Karelia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 6, pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.6.46>

9. Ширская М.Н. Культуры кедр сибирского в горных лесах Сибири. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 100 с. Shirskaya M.N. *Siberian Pine Plantations in the Mountain Forests of Siberia*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 100 p.

10. Dumins K., Lazdina D. Forest Regeneration Quality – Factors Affecting First Year Survival of Planted Trees. *Research for Rural Development*, 2018, vol. 1, pp. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.22616/rrd.24.2018.008>

11. Grossnickle S.C., Folk R.S. Spring versus Summer Spruce Stocktypes of Western Canada: Nursery Development and Field Performance. *Western Journal of Applied Forestry*, 2003, vol. 18, iss. 4, pp. 267–275. DOI: <https://doi.org/10.1093/wjaf/18.4.267>

12. Hallsby G., Örlander G. A Comparison of Mounding and Inverting to Establish Norway Spruce on Podzolic Soils in Sweden. *Forestry*, 2004, vol. 77, iss. 2, pp. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/77.2.107>

13. Heiskanen J., Saksa T., Hyvönen J. Effects of Mounding and Soil Clay Content on Postplanting Success of Norway Spruce. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 378, pp. 206–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.044>

14. Hubbel K.L., Ross-Davis A.L., Pinto J.R., Burney O.T., Davis A.S. Toward Sustainable Cultivation of *Pinus occidentalis* Swartz in Haiti: Effects of Alternative Growing Media and Containers on Seedling Growth and Foliar Chemistry. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 7, art. 422. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9070422>

15. Jäärats A., Tullus A. The Effect of Planting Stock and Soil Scarification on Forest Regeneration. *Forestry Studies*, 2018, vol. 69, iss. 1, pp. 75–85. DOI: <https://doi.org/10.2478/fsmu-2018-0013>

16. Jäärats A., Tullus A., Seemen H. Growth and Survival of Bareroot and Container Plants of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* during Eight Years in Hemiboreal Estonia. *Baltic Forestry*, 2016, vol. 22, no. 2(43), pp. 365–374.

17. Luoranen J. Autumn versus Spring Planting: The Initiation of Root Growth and Subsequent Field Performance of Scots Pine and Norway Spruce Seedlings. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 2, art. 7813. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.7813>

18. Luoranen J., Viiri H. Deep Planting Decreases Risk of Drought Damage and Increases Growth of Norway Spruce Container Seedlings. *New Forests*, 2016, vol. 47, iss. 5, pp. 701–714. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9539-3>

19. Nzokou P., Cregg B.M. Morphology and Foliar Chemistry of Containerized *Abies fraseri* (Pursh) Poir. Seedlings as Affected by Water Availability and Nutrition. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, iss. 6, art. 602. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>

20. Sutton R.F. Mounding Site Preparation: A Review of European and North American Experience. *New Forests*, 1993, vol. 7, iss. 2, pp. 151–192. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00034198>

УДК 582.477.6:630*5(470.12)

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-201-209

ДРЕВОВИДНАЯ ФОРМА МОЖЖЕВЕЛЬНИКА (*Juniperus communis* L.) В ЛЕСАХ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

И.В. Евдокимов¹, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5522-7702>

А.П. Добрынин², д-р биол. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2074-8473>

Н.А. Армеева¹, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7358-3348>

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, г. Вологда, с. Молочное, Вологодская обл., Россия, 160555; e-mail: igorevd1@rambler.ru

²Череповецкий государственный университет, ул. Луначарского, д. 5, г. Череповец, Вологодская обл., Россия, 162600; e-mail: apdobrtnin@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 26.02.20 / Принята к печати 14.05.20

Аннотация. Одной из наиболее распространенных в лесах России подлесочных пород, имеющих не только важное лесоводственное значение, но и широко используемых в хозяйственной деятельности, является можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.). Его изучению посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов. В статье приведены результаты геоботанических и лесоводственно-таксационных исследований уникального участка соснового насаждения (Кирилловский р-н Вологодской обл.), во втором ярусе которого произрастает древовидная форма можжевельника обыкновенного. Древостой оценен как высокополнотный (относительная полнота – 0,85) и низкобонитетный (класс бонитета – V–IV). Общий запас стволовой древесины на участке – 280 м³/га, в т. ч. запас древесины можжевельника – 28 м³/га. Средний диаметр стволов можжевельника – 14 см, средняя высота – 11 м и возраст – 180 лет. Это в несколько раз превышает его показатели в других лесах. Значительное количество экземпляров можжевельника (50 шт./га) находится в стадии усыхания или уже погибло и представляет собой сухостой разных лет. Количество мелкого и среднего подроста можжевельника – 1,5 тыс. шт./га, или 62,5 % от числа растущих экземпляров. Встречается также подрост ели европейской, березы пушистой и ольхи черной. Подрост оценивается как перспективный. Подрост сосны обыкновенной отсутствует. В напочвенном покрове доминируют зеленые и сфагновые мхи, а также кустарнички семейств *Ericaceae* и *Vacciniaceae*. Изучение подобных объектов, крайне редко встречающихся не только на севере европейской части России, но и повсеместно, имеет большое практическое значение, а также важно для понимания биологии естественно произрастающего здесь единственного представителя семейства *Cupressaceae*. Древовидный можжевельник в сосновом насаждении сохранился и достиг размеров не свойственных данному виду из-за труднодоступности территории, отсутствия пожаров и рубок леса. Подобные участки необходимо выявлять, брать под охрану и вести на них стационарные исследования.

Для цитирования: Евдокимов И.В., Добрынин А.П., Армеева Н.А. Древовидная форма можжевельника (*Juniperus communis* L.) в лесах Вологодской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С.201–209. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-201-209

Ключевые слова: сосновое насаждение, можжевельник обыкновенный, древовидная форма, Кирилловский район, Вологодская область.

TREE-FORM JUNIPER (*Juniperus communis* L.) IN THE FORESTS OF THE VOLOGDA REGION

Igor V. Evdokimov¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5522-7702>

Aleksandr P. Dobrynin², Doctor of Biology, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2074-8473>

Nelli A. Armeeva¹, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7358-3348>

¹Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, s. Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: igorevd1@rambler.ru

²Cherepovets State University, ul. Lunacharskogo, 5, Cherepovets, Vologda Region, 162600, Russian Federation; e-mail: apdobrtnin@mail.ru

Original article / Received on February 26, 2020 / Accepted on May 14, 2020

Abstract. Common juniper (*Juniperus communis* L.) is one of the most widespread undergrowth species in the forests of Russia. It has not only important silvicultural significance but is also widely used in economic activities. Numerous works of Russian and foreign authors are devoted to its study. The article shows the results of geobotanical and forest inventory studies of a unique area of pine plantation in the Kirillovskiy district of the Vologda region. In the second understorey of which tree-form common juniper grows. The stand was classified as high-density (relative fullness – 0.85) and low quality (quality class – V–IV). The total stock of trunk wood on the site is 280 m³/ha, including the stock of juniper wood – 28 m³/ha. The average diameter of juniper trunks is 14 cm, the average height is 11 m and the age is 180 yrs. This is several times higher than its usual parameters in other forests. A significant number of specimens of juniper (50 pcs/ha) are in the stage of drying out or have already died and represent dead wood of different years. The number of small and medium-sized juniper undergrowth is 1.5 ths pcs/ha or 62.5 % of the growing. Undergrowth of European spruce, downy birch and black alder is also found. The existing undergrowth is assessed as promising, but Scots pine undergrowth is missing. The ground cover is dominated by green and sphagnum mosses as well as shrubs of the *Ericaceae* and *Vacciniaceae* families. The study of such objects, extremely rare not only in the north of the European part of Russia, but also everywhere, is of great practical importance. It is also important for understanding the biology of the only representative of the *Cupressaceae* family that naturally grows here. The tree-form juniper in the pine plantation has survived and reached a size not typical for this species due to the inaccessibility of the site, the lack of fires and forest felling. Such forest areas should be identified, protected, and subjected to stationary research.

For citation: Evdokimov I.V., Dobrynin A.P., Armeeva N.A. Tree Form of Juniper (*Juniperus communis* L.) in the Forests of the Vologda Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 5, pp. 201–209. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-201-209

Keywords: pine plantation, common juniper, tree-form, Kirillovskiy district, Vologda region.

Введение

Можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.) распространен очень широко. Он встречается не только под пологом леса как подлесочная порода, но и на открытых местообитаниях, занимая доступные экологические ниши практически на всей территории Голарктики, в т. ч. по всей лесной зоне России [1, 7, 10, 16, 18, 19, 21]. Однако с середины XX в., возможно,

из-за изменения климата, загрязнения атмосферы, вырубки леса, выпаса скота и т. п. встречаемость мест произрастания можжевельника резко сократилась. Особенно это проявилось в отношении его древовидной формы. Основной причиной снижения численности древовидного можжевельника на европейском севере России была его рубка для хозяйственных нужд местным населением.

Экземпляры можжевельника обыкновенного могут достигать высоты 17–18 м и диаметра 28–30 см [1, 7, 10, 15]. Максимальная продолжительность жизни можжевельника обыкновенного в условиях равнинной тайги обычно не превышает 300–400 лет. Крупных размеров он достигает редко и лишь в исключительно благоприятных условиях. Рядом авторов выделено несколько, в т. ч. и древовидных, форм можжевельника обыкновенного [1, 2, 4, 12, 15, 17, 22].

Цель исследований – дать геоботаническую и лесоводственно-таксационную оценку соснового насаждения, во втором ярусе которого произрастает древовидная форма можжевельника обыкновенного, для сохранения древостоя и придания участку статуса особо охраняемой природной территории (ООПТ).

Объекты и методы исследования

Летом 2019 г. на территории Коротецкого участкового лесничества Кирилловского лесхоза (кв. 84, выд. 23) Вологодской области был исследован лесной массив (географические координаты: 60°23'10" с. ш. и 38°49'22" в. д.) со значительным участием во втором ярусе древовидного можжевельника. Массив вытянулся узкой полосой по левому берегу р. Еломы в месте впадения в нее р. Сыченьги непосредственно вдоль уреза воды на периодически подтопляемых торфяных почвах. Такие участки леса, в составе которых присутствуют необычно высокие можжевельники в форме деревьев, чаще всего имеют послепожарное происхождение и приурочены к локациям с высокой трофностью почвы и временным избыточным увлажнением. По мнению Б.Д. Ермолина [5], подобные уникальные участки подлежат охране и должны быть включены в единый реестр ООПТ северо-востока Европы.

Вопросы анатомии, морфологии, физиологии, размножения и онтогенеза можжевельника подробно изложены в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [1, 3, 10, 13, 15, 16, 18–20]. Наши исследования касаются лишь геоботаники, лесоводственных, таксационных особенностей и лесовозобновления.

При проведении таксационных работ был использован метод угловых проб (круговых площадей) [11]. Диаметр стволов измеряли мерной вилкой на высоте 1,3 м от шейки корня, высоту – высотомером SUUNTO. Полноту насаждения определяли прибором Биттерлиха, запас древесины породы – по формуле

$$M = fGH,$$

где M – запас стволовой древесины, м³/га; f – видовое число; G – сумма площадей сечения, м²/га; H – средняя высота, м.

Количество подроста вычисляли методом В.Ф. Рылкова [8], т. е. путем закладки (случайным образом) пробных круговых площадок радиусом 2,53 м (20 м²) и дальнейшего подсчета деревьев с учетом породы и крупности. При этом использовали формулу

$$N = 500n/k,$$

где N – количество подроста, шт./га; n – количество подроста на k учетных площадках, шт.; k – число учетных площадок, шт.

Геоботанические исследования проводили с использованием индексов обилия – проективного покрытия Браун-Бланке [12, 14]: r – вид встречается единично; + – проективное покрытие не превышает 1 %; 1 – 1–5 %; 2 – 5–25 %; 3 – 25–50 %; 4 – 50–75 %; 5 – 75–100 %. Для уточнения ботанических названий встреченных растений применяли определители [6, 9].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследованное насаждение представляет собой двухъярусный древостой с преобладанием в первом ярусе сосны обыкновенной перестойного возраста. Второй ярус образуют ольха черная и можжевельник обыкновенный, а также незначительное количество ели европейской и березы пушистой. Стволы можжевельника покрыты отслаивающейся корой, многие из них находятся в стадии усыхания. Возраст можжевельника, как и сосны, составляет около 180 лет. Ель, береза и ольха имеют более позднее происхождение.

Подлесок представлен редкими кустами крушины ломкой. Особо хочется выделить статус молодых экземпляров можжевельника, обычно относящихся к подлеску: в условиях данного местообитания не исключена возможность появления можжевельника в нижнем ярусе древостоя по причине распада верхнего яруса, его вырубки, гибели в результате подтопления или других причин, что уже случалось в прошлом. Исходя из этого мы отнесли молодые экземпляры можжевельника к подросту, немногочисленному и включающему кроме можжевельника новое поколение ели, ольхи и березы.

Торфяно-глеевые почвы верхового типа и поверхностное расположение грунтовых вод определили видовой состав напочвенного покрова, в котором преобладают различные мхи и кустарнички. В табл. 1 приведен состав растительной группировки для места проведения исследований.

Таблица 1

Видовой состав растительности массива леса с участием можжевельника

| Ярус | Растение | Индекс проективного покрытия |
|------------------------|---|------------------------------|
| Древесно-кустарниковый | Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>) | 4 |
| | Ель европейская (<i>Picea abies</i>) | + |
| | Береза пушистая (<i>Betula pubescens</i>) | + |
| | Ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i>) | 1 |
| | Можжевельник обыкновенный (<i>Juniperus communis</i>) | 1 |
| | Крушина ломкая (<i>Frangula alnus</i>) | + |

Окончание табл. 1

| Ярус | Растение | Индекс проективного покрытия |
|--|---|------------------------------|
| Травяно-кустарничковый | Багульник болотный (<i>Ledum palustre</i>) | 2 |
| | Черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>) | 3 |
| | Брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) | 2 |
| | Голубика (<i>Vaccinium uliginosum</i>) | 2 |
| | Болотный мирт обыкновенный (<i>Chamaedaphne calyculata</i>) | 1 |
| | Вереск обыкновенный (<i>Calluna vulgaris</i>) | + |
| | Подбел обыкновенный (<i>Andromeda polifolia</i>) | + |
| | Морошка (<i>Rubus chamaemorus</i>) | + |
| | Ландыш майский (<i>Convallaria majalis</i>) | + |
| | Седмичник европейский (<i>Trientalis europaea</i>) | + |
| | Майник двулистный (<i>Majanthemum bifolium</i>) | + |
| | Кислица обыкновенная (<i>Oxalis acetosella</i>) | + |
| | Осока острая (<i>Carex acuta</i>) | + |
| | Василистник водосборный (<i>Thalictrum aquilegifolium</i>) | + |
| Вейник лесной (<i>Calamagrostis arundinacea</i>) | + | |
| Мохово-лишайниковый | Сфагнум Гиргензона (<i>Sphagnum girgensohnii</i>) | 2 |
| | Плевроциум Шребера (<i>Pleurozium schreberi</i>) | 3 |
| | Дикранум метловидный (<i>Dicranum scoparium</i>) | + |
| | Ритидиладельфус трехгранный (<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>) | + |
| | Гилокомиум блестящий (<i>Hylocomium splendens</i>) | + |
| | Климациум древовидный (<i>Climacium dendroides</i>) | + |
| | Политрихум можжевельникоподобный (<i>Polytrichum juniperinum</i>) | + |

В напочвенном покрове преобладают сфагновые и зеленые мхи, а также кустарнички из семейств *Ericaceae* и *Vacciniaceae*. Тип леса по В.Н. Сукачеву – сосняк черничный влажный. Поверхность почвы подвержена воздействию периодических подтоплений и очень неровная, вследствие чего в распределении растительности бросается в глаза некоторая мозаичность.

Подрост распределен по площади неравномерно. Преобладает ольха черная и можжевельник, который при наличии каких-то исключительных условий может образовать второй ярус древостоя. Ель и береза в подросте играют менее заметную роль (табл. 2).

Имеющийся подрост оценивается как перспективный. Подрост сосны отсутствует. Причиной этого, по-видимому, является не только затенение со стороны верхнего яруса, но периодическое длительное подтопление водами р. Еломы и ее притоков, а также плотный травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярус. Перспектива трансформации подроста можжевельника во второй ярус древостоя неочевидна.

Таблица 2

Естественное возобновление древесных пород под пологом леса

| Видовой состав подроста | Количество подроста, тыс. шт./га / % | | | |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------|
| | мелкий (до 0,5 м) | средний, (0,5–1,5 м) | крупный, (более 1,5 м) | <i>Всего</i> |
| Ель европейская | – | – | 0,25 / 20 | 0,25 / 7 |
| Ольха черная | – | 1,0 / 50 | 0,50 / 40 | 1,50 / 40 |
| Береза пушистая | – | – | 0,50 / 40 | 0,50 / 13 |
| Можжевельник обыкновенный | 0,5 / 100 | 1,0 / 50 | – | 1,50 / 40 |
| <i>Итого</i> | 0,5 / 100 | 2,0 / 100 | 1,25 / 100 | 3,75 / 100 |

По нашему мнению, благоприятное влияние на рост можжевельника длительное время оказывали окружающие насаждение массы воды, которые снижали отрицательное воздействие похолоданий, заморозков, резких перепадов температуры, увеличивали продолжительность вегетационного периода, создавали условия для успешного плодоношения и естественного возобновления. В этих же местах, помимо указанных пород, иногда встречается вяз гладкий, находясь на северной границе своего ареала. По р. Совзе и Свидь, а также по оз. Воже данный вид, вероятно, заходит в соседний Коношский район Архангельской области.

В табл. 3 приведены результаты таксационных исследований, проведенных в сосновом насаждении с участием древовидной формы можжевельника, сохранившегося до наших дней в связи с труднодоступностью насаждения: близость к р. Модлоне с массой проток и заболоченными берегами делают прилегающие к ней леса недосыгаемыми. На отдельных стволах сосен заметны следы подсычки, ранее здесь проводившейся. Имеются и признаки вырубki стволов можжевельника, очевидно, для изготовления мелких поделок или для других народных промыслов. Значительная доля стволов можжевельника находится в стадии усыхания или уже погибла и представляет собой сухостой разных лет. Число сухостойных и валежных экземпляров можжевельника на участке составляет 50 шт./га, или 62,5 % от числа растущих.

Таблица 3

Таксационные показатели исследуемого лесного массива

| Древесная порода | Средние | | Видовое число (<i>f</i>) | Число стволов, шт./га | Сумма площадей сечения, м ² /га | Запас стволовой древесины, м ³ /га |
|---------------------------|-------------|-----------|----------------------------|-----------------------|--|---|
| | диаметр, см | высота, м | | | | |
| Сосна обыкновенная | 36 | 22 | 0,49 | 206 | 21 | 227 |
| Ель европейская | 16 | 15 | 0,53 | 12 | 1 | 8 |
| Ольха черная | 12 | 12 | 0,47 | 44 | 2 | 11 |
| Береза пушистая | 13 | 12 | 0,51 | 19 | 1 | 6 |
| Можжевельник обыкновенный | 14 | 11 | 0,50 | 81 | 5 | 28 |
| <i>Итого</i> | – | – | – | 362 | 30 | 280 |

Таким образом, двухъярусный древостой (возраст сосны 180 лет), следует оценить как высокополнотный (относительная полнота – 0,85) и низкопродуктивный (V–IV бонитет). Состав по ярусам: первый ярус – 10С, второй ярус – 5,2Мож2,1Ол1,5Е1,2Б. Общий состав насаждения – 8,1С1,-0Мож0,4Ол0,3Е0,2Б. Можжевельник обыкновенный имеет средний диаметр 14 см, среднюю высоту 11 м и возраст 180 лет, что превышает в несколько раз обычные его показатели в других лесах. В лесостроительных материалах по Кирилловскому лесхозу о древовидном можжевельнике данных, к сожалению, нет.

Заключение

Сохранившийся массив соснового леса с участием древовидной формы можжевельника обыкновенного на территории Кирилловского района Вологодской области интересен в первую очередь с точки зрения возможности изучения биологии этого вида. По нашему мнению, в исследуемом насаждении можжевельник обыкновенный смог достичь размеров, не свойственных данному виду, по нескольким причинам: отсутствие пожаров и рубок леса длительное время; труднодоступность участка; благоприятные экологические условия для роста и развития. Маловероятно генетическое отличие данного можжевельника от можжевельников, растущих поблизости в иных условиях и имеющих меньший размер.

Подобные участки леса в настоящее время встречаются очень редко. Они должны выявляться, включаться в единый реестр региональных и всероссийских особо охраняемых природных территорий и служить объектами для проведения длительных стационарных исследований на постоянных пробных площадях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аксенова Н.А. Можжевельник обыкновенный // Биологическая флора Московской области. 1976. Вып. 3. С. 28–35. Aksenova N.A. Common Juniper. *Biologicheskaya flora Moskovskoy oblasti*, 1976, iss. 3, pp. 28–35.
2. Барзут О.С. Эколого-географическая изменчивость можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) в лесах Архангельской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2007. 18 с. Barzut O.S. *Ecological and Geographical Variability of Common Juniper (Juniperus communis L.) in the Forests of the Arkhangelsk Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2007. 18 p.
3. Горохова Т.А., Бекмансуров М.В., Салахов Н.В. Онтогенез можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) // Онтогенетический атлас растений. Йошкар-Ола: Марийск. ГУ, 2007. Т. 5. С. 41–46. Gorokhova T.A., Bekmansurov M.V., Salakhov N.V. Ontogeny of Common Juniper (*Juniperus communis* L.). *Ontogenetic Atlas of Plants*. Yoshkar-Ola, MarSU Publ., 2007, vol. 5, pp. 41–46.
4. Гроздов Б.В. Дендрология. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 436 с. Grozdov B.V. *Dendrology*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1952. 436 p.
5. Ермолин Б.В. О заповедной географии северо-востока Европы // Наука – лесному хозяйству Севера. Архангельск: СевНИИЛХ, 2019. С. 221–226. Ermolin B.D. About the Reserved Geography of North-East of Europe. *Science to the Forestry of the North*. Arkhangelsk, SevNIILH Publ., 2019, pp. 221–226.

6. Жизнь растений: в 6 т. / гл. ред. А.А. Федоров. Т. 4. Мхи, плауны, хвощи, папоротники, голосеменные растения / А.А. Федоров, А.Л. Тахтаджян, А.С. Лазаренко, И.В. Грушвицкий и др. М.: Просвещение, 1978. 447 с. *Life of Plants: In 6 Vol. Ed. by A.A. Fedorov. Vol. 4. Mosses, Ground Pines, Horsetails, Ferns, and Gymnosperms. A.A. Fedorov, A.L. Takhtadzhyan, A.S. Lazarenko, I.V. Grushvitskiy et al. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1978. 447 p.*

7. Мухамедшин К.Д., Таланцев Н.К. Можжевельные леса: (леса, редколесья, заросли). М.: Лесн. пром-сть, 1982. 184 с. Mukhamedshin K.D., Talantsev N.K. *Juniper Forests: (Forests, Sparse Growth of Trees, and Thickets)*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 184 p.

8. Рылков В.Ф. Лесовосстановление основных типов вырубок // Воспроизводство лесных ресурсов. Новосибирск: Наука, 1988. С. 43–54. Rylkov V.F. *Reforestation of the Main Types of Felling. Reproduction of Forest Resources*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988, pp. 43–54.

9. Скворцов В.Э. Атлас-определитель сосудистых растений таежной зоны Европейской России. Региональные списки редких и охраняемых видов. М.: Гринпис России, 2000. 587 с. Skvortsov V.E. *Atlas-Guide for Vascular Plants in the Taiga Zone of European Russia*. Moscow, Greenpeace Russia Publ., 2000. 587 p.

10. Фарукшина Г.Г., Путенихин В.П. Можжевельники обыкновенный и казацкий на Южном Урале (распространение, популяционная структура, сохранение генофонда): моногр. Уфа: Гилем, 2016. 168 с. Farykshina G.G., Putenikhin V.P. *Common and Cossack Junipers in the Southern Urals (Distribution, Population Structure, and Gene Pool Conservation)*. Ufa, 2016. 168 p.

11. Bitterlich W. Die Winkelzählprobe. *Allgemeine Forst- und Holzwirtschaftliche Zeitung*, 1948, Folge 1/2, S. 3–7.

12. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie*. Wien, Springer-Verlag, 1964. 865 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>

13. Butkiene R., Nivinskiene O., Mockute D. Differences in the Essential Oils of the Leaves (Needles), Unripe and Ripe Berries of *Juniperus communis* L. Growing Wild in Vilnius District (Lithuania). *Journal of Essential Oil Research*, 2006, vol. 18, iss. 5, pp. 489–494. DOI: <https://doi.org/10.1080/10412905.2006.9699150>

14. Caratini R. *Les plantes*. Paris, Bordas, 1984. 195 p.

15. Filipowicz N., Piotrowski A., Ochocka J.R., Asztemborska M. The Phytochemical and Genetic Survey of Common and Dwarf Juniper (*Juniperus communis* and *Juniperus nana*) Identifies Chemical Races and Close Taxonomic Identity of the Species. *Planta Medica*, 2006, no. 72, iss. 9, pp. 850–853. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2006-941543>

16. Marongiu B., Porcedda S., Piras A., Sanna G., Murreddu M., Loddo R. Extraction of *Juniperus communis* L. ssp. *nana* Willd. Essential Oil by Supercritical Carbon Dioxide. *Flavour and Fragrance Journal*, 2006, vol. 21, iss. 1, pp. 148–154. DOI: <https://doi.org/10.1002/ffj.1549>

17. McGowan G.M., Joensalo J., Naylor R.E.L. Differential Grazing of Female and Male Plants of Prostrate Juniper. *Botanical Journal of Scotland*, 2004, vol. 56, iss. 1, pp. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.1080/03746600408685066>

18. Shahmir F., Ahmadi L., Mirza M., Korori S.A.A. Secretory Elements of Needles and Berries of *Juniperus communis* L. ssp. *communis* and Its Volatile Constituents. *Flavour and Fragrance Journal*, 2003, vol. 18, iss. 5, pp. 425–428. DOI: <https://doi.org/10.1002/ffj.1243>

19. Thomas P.A., El-Borghathi M., Polwart A. Biological Flora of the British Isles: *Juniperus communis* L. *Journal of Ecology*, 2007, vol. 95, iss. 6, pp. 1404–1440. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01308.x>

20. Verheyen K., Schreurs K., Vanhoben B., Hermy M. Intensive Management Fails to Promote Recruitment in the Last Large Population of *Juniperus communis* (L.) in Flanders (Belgium). *Biological Conservation*, 2005, no. 124, iss. 1, pp. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.018>

21. Ward L.K. Lifetime Sexual Dimorphism in *Juniperus communis* var. *communis*. *Plant Species Biology*, 2007, vol. 22, iss. 1, pp. 11–21. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2007.00171.x>

22. Ward L.K., King M. The Decline of Juniper in Sussex. *Quarterly Journal of Forestry*, 2006, vol. 100, pp. 263–272.