

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

3

2025

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)

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)
Гаврилова О.И., д-р с.-х. 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)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Коновалов В.Ф., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Уфа)
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)
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)
Посыпанов С.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
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)
Щекалев Р.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

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 bi-monthly

3

2025

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)

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)
Gavrilova O.I., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Konovalov V.F., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Ufa)
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)
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)
Posypanov S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
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)
Shchekalev R.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>V.A. Tsarev, A.P. Tsarev, R.P. Tsareva, N.V. Laur.</i> Long-Term Testing of Aspen Clones in European Russia	9
<i>Н.П. Чернобровкина, А.В. Егорова, Е.В. Робонен, К.Г. Нелаева.</i> Синтетические и природные регуляторы роста растений для выращивания семян древесных пород.....	20
<i>Г.С. Вараксин, Н.Н. Чербакова.</i> Влияние сроков черенкования на укореняемость черенков некоторых видов ивы в Норильском промышленном районе	52
<i>Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов, Б.А. Кентбаева, Е.Ж. Кентбаев, Н.А. Бабич.</i> Пигментный состав хвои биоты восточной (<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco) при интродукции в условиях России и Казахстана	63
<i>О.С. Машкина, Т.М. Табацкая.</i> Адаптация к условиям почвы отобраных на устойчивость к засолению <i>in vitro</i> регенерантных линий березы	78
<i>С.Б. Селянина, Н.А. Кутакова, А.И. Селянина, И.Н. Зубов, К.А. Кононов.</i> Плантационная и дикорастущая клюква <i>Vaccinium oxycoccos</i> L. на болотах южноприбалтийского типа.....	93
<i>Ю.В. Загурская, Т.И. Сиромля.</i> Элементный химический состав <i>Populus tremula</i> в условиях техногенных экосистем Кузбасса	107
<i>N.R. Sungurova, S.S. Makarov, A.I. Chudetsky, Yu.S. Cheryatova.</i> Adaptation Features of Kamchatka Bilberry (<i>Vaccinium praestans</i> Lamb.) Plants Grown <i>in vitro</i>	121

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>Л.Д. Бухтояров, С.В. Малюков, М.Н. Лысыч.</i> Инженерная модель ножевого катка для осветления лесных культур	132
<i>А.П. Терехин, П.А. Марьяндышев, И.И. Голованова, А.А. Громов.</i> Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов...	145
<i>В.К. Любов.</i> Повышение эффективности использования побочных продуктов фанерного производства	155

*ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ
И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ*

- М.М. Лысаченкова, Я.В. Казаков, Д.Г. Чухчин.* Характеристика полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги... 169
- Е.С. Loginova (Kokina), Т.Е. Boykova, N.I. Bogdanovich, К.В. Vorontsov.* Purification of Liquid Radioactive Waste with Activated Carbon from Sludge-Lignin..... 184

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- П.А. Феклистов, Е.А. Пинаевская, Н.А. Неверов, И.Н. Болотов, С.Н. Тарханов, О.Н. Тюкавина.* Температурные характеристики стволов сосны в северной подзоне тайги 195
- А.А. Карбасников, Е.Б. Карбасникова, О.С. Залывская, В.И. Мелехов.* Опыт ступенчатой интродукции дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях северных широт..... 204



CONTENTS

FORESTRY

- V.A. Tsarev, A.P. Tsarev, R.P. Tsareva, N.V. Laur.* Long-Term Testing of Aspen Clones in European Russia 9
- N.P. Chernobrovkina, A.V. Egorova, E.V. Robonen, K.G. Nelaeva.* Synthetic and Natural Plant Growth Regulators for Growing Seedlings of Tree Species 20
- G.S. Varaksin, N.N. Cherbakova.* The Influence of the Cuttings Propagation Timing on the Rooting Ability of Cuttings of Some Willow Species in the Norilsk Industrial District 52
- N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, B.A. Kentbaeva, E.J. Kentbaev, N.A. Babich.* The Pigment Composition of the Needles of *Platyclusus orientalis* (L.) Franco during its Introduction in the Conditions of Russia and Kazakhstan 63
- O.S. Mashkina, T.M. Tabatskaya.* Adaptation to Soil Conditions of *in vitro* Regenerated Birch Lines Selected for Salinity Resistance 78
- S.B. Selyanina, N.A. Kutakova, A.I. Selyanina, I.N. Zubov, K.A. Kononov.* Plantation and Wild Cranberry *Vaccinium oxycoccos* L. in the Southern White Sea Type Swamps 93
- Y.V. Zagurskaya, T.I. Siromlya.* The Elemental Chemical Composition of *Populus tremula* in the Conditions of Technogenic Ecosystems of Kuzbass .. 107
- N.R. Sungurova, S.S. Makarov, A.I. Chudetsky, Y.S. Cheryatova.* Adaptation Features of Kamchatka Bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) Plants Grown *in vitro* 121

 TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
 IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

- L.D. Bukhtoyarov, S.V. Malyukov, M.N. Lysych.* An Engineering Model of a Knife Roller for Thinning Forest Crops 132
- A.P. Terekhin, P.A. Maryandyshchev, I.I. Golovanova, A.A. Gromov.* Thermal Decomposition of Pellets from a Mixture of Peat and Bark Waste 145
- V.K. Lyubov.* Improving the Efficiency of Using Plywood Production By-Products 155

TECHNOLOGY OF CHEMICAL WOOD PROCESSING AND PRODUCTION
OF WOOD-POLYMER COMPOSITES

- M.M. Lysachenkova, Y.V. Kazakov, D.G. Chukhchin.* Characteristics of Local Anisotropy Fields of Paper Structure and Deformation Properties..... 169
- E.S. Loginova (Kokina), T.E. Boykova, N.I. Bogdanovich, K.B. Vorontsov.* Purification of Liquid Radioactive Waste with Activated Carbon from Sludge-Lignin 184

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- P.A. Feklistov, E.A. Pinaevskaya, N.A. Neverov, I.N. Bolotov, S.N. Tarkhanov, O.N. Tyukavina.* Temperature Characteristics of Pine Stems in the Northern Taiga Subzone..... 195
- A.A. Karbasnikov, E.B. Karbasnikova, O.S. Zalyvskaya, V.I. Melekhov.* Experience of Stepwise Introduction of English Oak (*Quercus robur* L.) in Northern Latitudes 204



Original article

УДК 630*232.12

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-9-19

Long-Term Testing of Aspen Clones in European Russia

Vadim A. Tsarev¹, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Anatoly P. Tsarev¹, *Doctor of Agriculture, Prof.*; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Raisa P. Tsareva¹, *Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist*;

ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

Natal'ya V. Laur², *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0009-0007-5733-1379),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5733-1379>

¹All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; vad.tsareff@yandex.ru, antsa-55@yandex.ru[✉], tsarais42@mail.ru

²Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; laur@petrsu.ru

Received on December 14, 2023 / Approved after reviewing on March 6, 2024 / Accepted on March 7, 2024

Abstract. The results of 40 years of testing of more than 20 aspen clones selected in various regions of European Russia and the USSR, growing in the Semiluki Tremuletum in the Voronezh Region, are presented. The survival of plants, growth in height, diameter and volume of the stem are shown. A ranked assessment has been given and a selection of promising clones for the creation of highly productive aspen plantations has been carried out. It has also been noted that sexual dimorphism can have different effects on aspen rot resistance in different growing conditions. The testing has been conducted at the Central Research Institute of Forest Genetics and Breeding (currently the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology). A number of employees of the Institute have been engaged in the selection of the best forms, and then in hybridization, since its organization in 1971. The aim of this study has been to investigate the survival and growth of 21 long-lived aspen clones, as well as their productivity (in terms of stem volume), growing in the Semiluki Tremuletum of the Voronezh Region. It has been revealed that the height variation at the age of 40 has been quite wide – from 17.3 to 31.3 m, diameters – from 28.0 to 50.0 cm, stem volumes – from 0.3 to 2.4 m³. The top 5 has included 2 aspen clones from the Botanical Garden of the Voronezh State University (clones no. 16 and 17), 2 hybrids introduced from the Baltic States (clones no. 20, 23) and American aspen (clone no. 29). Their average height at the age of 40 has been 26–31 m, diameter – 42–50 cm, stem volume – 1.4–2.4 m³. This indicates the possibility of selecting promising aspen clones for their further propagation and introduction into plantation forest cultivation. At the same time, male clones (Pzg hybrid and American aspen clone no. 29), also introduced from the Baltic States, can be recommended for landscaping.

Keywords: tremuletum, aspen, clones, hybrids, variety testing, ranking, growth and productivity analysis, sexual dimorphism, selection

For citation: Tsarev V.A., Tsarev A.P., Tsareva R.P., Laur N.V. Long-Term Testing of Aspen Clones in European Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 9–19. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-9-19>

Научная статья

Многолетние испытания клонов осины в Европейской России

В.А. Царев¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

А.П. Царев^{1✉}, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Р.П. Царева¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

Н.В. Лаур², д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0009-0007-5733-1379),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5733-1379>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; vad.tsareff@yandex.ru, antsa-55@yandex.ru[✉], tsarais42@mail.ru

²Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; laur@petsu.ru

Поступила в редакцию 14.12.23 / Одобрена после рецензирования 06.03.24 / Принята к печати 07.03.24

Аннотация. Представлены результаты 40-летних испытаний более чем 20 клонов осины, отобранных в различных регионах Европейской России и СССР. Клоны произрастают на Семилукском тремулете в Воронежской области. Показаны сохранность растений, рост по высоте, диаметру и объему ствола. Дана ранжированная оценка и проведен отбор перспективных клонов для создания высокопродуктивных осиновых насаждений. Отмечено, что половой диморфизм может по-разному влиять на гнилеустойчивость осин в различных условиях местопроизрастания. Испытания проводились в Центральном научно-исследовательском институте лесной генетики и селекции (в настоящее время – Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии). Отбором лучших форм, а затем гибридизацией сотрудники института занимаются с 1971 г. Целью данного исследования стало изучение сохранности, роста и продуктивности (по объему стволов) 21 клона осины в многолетнем возрасте, произрастающих в Семилукском тремулете Воронежской области. Выявлено, что варьирование высот в 40-летнем возрасте было довольно широким – от 17,3 до 31,3 м, диаметров – от 28,0 до 50,0 см, объемов стволов – от 0,3 до 2,4 м³. В пятерку лучших выделены 2 клона осины из ботанического сада Воронежского государственного университета (клоны № 16 и 17), 2 гибрида, интродуцированные из Прибалтики (клоны № 20, 23), и осина американская (клон № 29). Их средняя высота в 40 лет составляла 26–31 м, диаметр – 42–50 см, объем ствола – 1,4–2,4 м³. Это свидетельствует о возможности отбора перспективных клонов осины для их размножения и внедрения в плантационное лесовыращивание. Мужские клоны (гибрид Pzg и клон американской осины № 29), также интродуцированные из Прибалтики, можно рекомендовать для озеленения.

Ключевые слова: тремулете, осина, клоны, гибриды, сортоиспытание, ранжирование, анализ роста и продуктивности, половой диморфизм, отбор

Для цитирования: Tsarev V.A., Tsarev A.P., Tsareva R.P., Laur N.V. Long-Term Testing of Aspen Clones in European Russia // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 9–19.
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-9-19>

Introduction

Aspen is widespread in the forests of Russia and is one of the most important forest species. In terms of area among deciduous trees, it ranks second after birch. Its area is up to 25 million ha with a stand of timber of 3 715 million m³/ha [18].

This species has rapid growth, root-sprouting renewability, and unpretentiousness to growing conditions. Aspen wood is widely used in construction, pulp-and-paper industry, bioenergy and in the manufacture of containers. Sawlogs, veneer, plywood, fiberboard and chipboard are produced from it. In addition, it is considered the main species for ravine and gully detention and can be used as feed additives in animal husbandry [1, 3, 21].

Russian foresters have noted the economic importance of aspen and its use back in the 19th century, and possibly even earlier. Among them we can mention N.S. Nesterov, B.A. Kunitsky, M.K. Tursky at al. But the greatest contribution to the study of the vital activity of aspen, its significance and breeding has been made by A.S. Yablokov (1963) [26].

The largest area of aspen stands is located in the forest zone of European Russia, in the forest-steppe and in the south of Western Siberia, where they replace primary stands of the main forest-forming tree species and form secondary stands replacing the former climax forests. Aspen stands grow mainly in forests of complex types. As a rule, aspen grows in medium-fertile and dry soils with normal or wet conditions. In the forest area, its stands include an admixture of forest tree species found in primary forests (spruce, fir, pine, oak, linden, etc.), and sometimes also birch and alder (Fig. 1).



Fig. 1. The aspen stand with an admixture of pine and spruce in the Republic of Karelia (Konchesero)

In the Central Black Earth Region, the volume of aspen stemwood by the age of 10 is 40–50 m³/ha; by the age of 30, it increases 3–4 times (150–200 m³/ha); and by the age of 70, the volume reaches 500–550 m³/ha. In stands growing in particularly favourable conditions, the average stand at the age of 70 years can reach 650 m³/ha. Quantitative maturity is recorded at the age of 25–30 years, technical maturity – at the age of 35 years. The maximum average annual increment is reached at the age of 40. In high-quality stands it can be 2.9–3.9 m³/ha/year in the centre of the species' natural habitat and more than 5–7 m³/ha/year in the Central Black Earth Region (Fig. 2, 3).

However, it should be noted that aspen in mature and overmature stands is very susceptible to core rot. Earlier studies have been conducted in the Right-Bank Forestry of the Educational and Experimental Forestry Enterprise of the Voronezh State University of Forestry and Technologies [19]. A study of the degree of aspen stands affected by core rot (823 ha of aspen stands have been examined) has shown that the infestation of trees, depending on age, has varied from 0.6 % in age class II, to 16.1 % in age class IV and up to 90.4 % in age class VII (Table 1).

Table 1

The yield of healthy wood in natural aspen forests in the Voronezh Region depending on age classes

Indicators	Age classes						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Stand volume, m ³ /ha	15	150	184	238	262	304	301
Infestation with core rot, %	0	0.6	1.6	16.1	31.2	59.6	90.4
Healthy wood yield, m ³ /ha	15	141	181	200	180	123	29

It has been established that the maximum yield of healthy wood in the studied aspen stands has been in the IV age class and has amounted to 200 m³/ha. This age, apparently, should be considered the age of aspen felling. The yield of healthy wood in the older age classes (V and VI) decreases slightly, and in the stands approaching maturity (age class VII) it falls to 10 % and amounts to only 29 m³/ha.



Fig. 2. The plus aspen stand. Voronezh State Nature Reserve, block 6, sample plot no. 3.

On the left – age 45, average height 24 m, average diameter 26.4 cm. March 1967.

On the right – age 94, average height 30 m, average diameter 44 cm. August 2014

It should also be noted that male aspen trees are more susceptible to rot than female ones. The study of sexual dimorphism in aspens in the age class V has shown that the infestation of male trees has been 33.7 %, and 22 % in female trees, i.e. in male plots it has been 1.5 times higher than in female ones.

Unfortunately, core rot is very difficult to deal with. Currently, there are several promising ways to obtain healthy aspen wood, and first of all, it is the selection of plus healthy trees in natural stands, in collections of clones and hybrids.

The staff of the Voronezh State University of Forestry and Technologies has begun to select rot-resistant aspen forms in the Central Black Earth Region after the end of World War II. The works of A.V. Tyurin, O.G. Kaper, M.M. Veresin and others are well known [21]. In the following years, the research area has been expanded. Thus, in the Moscow Region (the All-Union Scientific Research Institute of Silviculture and Forestry Mechanization), Kostroma Forest Experimental Station, Kursk Region (Oboyansky Forestry), Novosibirsk Region, Leningrad Region, and others, the selection of the best aspen clones in natural forests has been carried out by A.S. Yablokov (1949, 1963), S.P. Ivannikov (1959), V.T. Bakulin (1966), S.N. Bagaev (1967) et al. [2, 3, 26, 29].



Fig. 3. The stem of aspen tree
in sample plot no. 12.
Savalsky Forestry of the Savalsky
Forestry Enterprise, block no. 3.
The Voronezh Region

In the Central Research Institute of Forest Genetics and Breeding (currently the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology), R.P. Tsareva (1984), A.P. Tsarev (1988), V.P. Petrukhnov (1988) et al. have begun to engage in the selection of the best forms of aspen, and then in hybridization of them (since the establishment of the institute in 1971) [16, 19, 21].

In the last decade, similar work has been actively carried out at the Kostroma Forest Experimental Station of the All-Russian Research Institute of Silviculture and Forestry Mechanization, at the Saint-Petersburg State Forest Technical University, at the Faculty of Forestry, Forest Harvesting, Wood Processing Technologies and Landscape Architecture at the Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, etc. [1–6, 27–29].

The aim of this research has been to study the survival and growth of 21 aspen clones at the age of 40, as well as their productivity (in terms of stem volume) growing in the Semiluki Tremuletum of the Voronezh Region and to select promising clones for plantation afforestation.

Research Objects and Methods

The best aspen clones have been selected for testing:
in the Right-Bank Forestry of the Educational and Experimental Forestry Enterprise of the Voronezh State University of Forestry and Technologies (clones no. 7 and 9);

in the Savalsky Forestry and in the Botanical Garden of the Voronezh State University (clones no. 11, 16, 17);

in Valuyki and Gubkin of the Belgorod Region (clones no. 14, 15);

in the Oboyansky Forestry Enterprise of the Kursk Region (clones no. 12 and 13)

in the Kostroma Region (clone no. 10).

In addition 10 new hybrids of aspen bred by Ya.Ya. Smilga (clones no. 18–27) and American aspen (clone no. 29), introduced from the Baltic States, have been obtained by way of exchange.

In 1974, V.P. Petrukhnov created a tremuletum from selected aspen clones at the Semiluki Experimental Demonstration Nursery. After his retirement, research at this facility was continued by R.P. Tsareva.

Planting has been carried out using 1-year-old grafted seedlings at a spacing of 5×5 m. 21 aspen clones have been planted. True-rooted seedlings of local aspen (clone no. 6) have been used as a control. The survival and growth of aspen clones in height and diameter have been studied in the tremuletum. The volume of stem wood has been determined (according to the tables by Hadži-Georgiev and Gogușevski, 1972) [9].

Results and Discussion

An analysis of the condition of the aspen plants under study have shown that at the age of 40 their survival rate has been 80 %. At the same time, the control sample has had a survival rate of 74 %. The average height of the trees has ranged from 17.3 (clone no. 10 from the Kostroma Region) to 31.3 m (clone no. 17 from the Botanical Garden of the Voronezh State University). In the group of hybrids obtained from the Baltic States, the height has varied from 15.4 (clone no. 24) to 27.3 m (clone no. 20). The average height of the aspen clones tested in the tremuletum has been 24.5 m (Table 2).

The parameters of average diameters have varied in the first group from 28.0 to 50.0 cm, in the second – from 25.2 to 44.3 cm. Overall, the average diameter for the area has been 37.5 cm. The average volume of stems has ranged from 0.30 to 2.4 m³, and for the entire area it has been equal to 1.06 m³. The control group has had an average height of 19.5 m, an average diameter of 32 cm, and a stem volume of 0.61 m³.

According to the results of the ranking by height, diameter and volume of stems, the top 5 (ranks 1–5) in terms of growth and productivity has included aspen clones no. 16 and 17 selected at the Botanical Garden of the Voronezh State University, as well as aspen hybrids from the Baltic States (clones no. 20, 23) and clone no. 29 of the American aspen. Among them there are 2 male clones (no. 20 and 29), which do not produce fluff and can be used in landscaping. The worst indicators of growth and productivity in the tremuletum have been found in some hybrids introduced from the Baltic States (clones no. 19, 22, 24, 26, 27) and clone no. 10 (rank 19) from the Kostroma Region. This may be due to the fact that the listed clones have been introduced from more northern and humid latitudes to the south-west of the country, that is, to the more arid Central Black Earth Region. The remaining studied aspen clones and hybrids have occupied an intermediate position in terms of growth and productivity.

Table 2

The rank assessment of growth and productivity of various aspen clones aged 40 growing in the Semiluki Tremulettum (at a spacing of 5×5 m)

Serial No.	Origin	Inventory no.	Average				Stem volume		Sum of the ranks	Overall rank	Sex
			height		diameter		m ³	rank			
			m	rank	cm	rank					
1	Voronezh State University of Forestry and Technologies	7	23.8	9	37.7	9	1.04	10	28	9	♂
2	Voronezh State University of Forestry and Technologies (X ₅)	9	21.8	15	35.0	15	0.88	15	45	15	♂
3	Kostroma Region (No. 35)	10	17.3	19	28.0	19	0.42	19	57	19	♂
4	Savalsky Forestry	11	23.3	14	36.8	13	1.05	9	36	12	♂
5	Kursk Region (Drozdy)	12	25.0	6	39.5	7	1.20	7	20	7	♂
6	Triploid Aspen (No. 27)	13	24.4	8	38.5	8	1.11	8	24	8	♀
7	Valuyki (Belgorod Region)	14	25.0	7	39.6	6	1.20	6	19	6	♀
8	Gubkin (Belgorod Region)	15	23.8	10	37.6	10	1.03	11	31	10	♀
9	Botanical Garden of the Voronezh State University (X ₁)	16	27.2	3	43.0	4	1.54	4	11	4	♀
10	Botanical Garden of the Voronezh State University (X ₂)	17	31.3	1	50.0	1	2.40	1	3	1	♀
11	Baltic Aspen P _{Z13}	18	23.8	13	36.5	14	0.97	14	41	14	♀
12	Baltic Aspen P _R	19	20.0	16	28.7	18	0.51	18	52	18	♀
13	Baltic Aspen P _{Zg}	20	27.3	2	44.3	2	1.64	2	6	2	♂
14	Baltic Aspen P ₂₂	21	23.8	11	37.3	11	1.01	12	34	11	♂
15	Baltic Aspen P _{gg}	22	19.6	17	32.2	16	0.62	16	49	16	♂
16	Baltic Aspen P _{ns}	23	27.2	4	43.3	3	1.56	3	10	3	♀
17	Baltic Aspen P ₁₃₂	24	15.4	21	25.2	21	0.30	21	63	21	♀
18	Baltic Aspen P _{Sv}	25	23.8	12	36.9	12	0.99	13	37	13	♂
19	Baltic Aspen P _{K43}	26	19.6	18	32.2	17	0.62	17	52	17	♂
20	Baltic Aspen P _{ksg}	27	16.2	20	26.1	20	0.34	20	60	20	♂
21	American Aspen	29	26.0	5	42.2	5	1.42	5	15	5	♂
Average:			24.5	9	37.5	10	1.06	10	29	10	
22	Control (Local Aspen)	6	19.5	17	32.0	17	0.61	17	51	17	♀/♂

During many years of work at this field object, sexual dimorphism of the aspens has been studied. The greatest interest in this regard is the rot resistance of aspen trees of different sexes. This has made it possible to identify male aspen forms that can be used in landscaping. It has been established that 57 % of the studied forms are male clones and 43 % are female. That is, all male aspen clones (no. 7, 12) and some hybrids introduced from the Baltic States (no. 20, 21, 22, 25, 26, 27) can be recommended for landscaping, as well as a clone of American aspen (no. 29). Highly productive female aspen clones can be recommended for protective, energy and other types of plantations.

Earlier studies carried out in the Voronezh Region among male clones (on an area of 402.1 ha) and female clones (on an area of 91.6 ha) have shown that, overall, the incidence of core rot has been 33 % lower in female aspen stands than in male ones [19, 21].

The verification of these data has been carried out in aspen stands of age class V (41–50 years old) on an area of 267.2 ha. The number of trees with core rot in this class has been 33.7 % in male aspen stands, and 22.2 % in female ones. That is, female aspen stands have been affected 1.5 times less. An analysis of the data obtained on growing conditions has shown that such an advantage is observed in favourable growing conditions (B_3 , C_2 , C_3 , D_2 , D_3) (Fig. 4). In unfavorable growing conditions for aspen (B_2) male clones have been found to be more resistant to core rot.

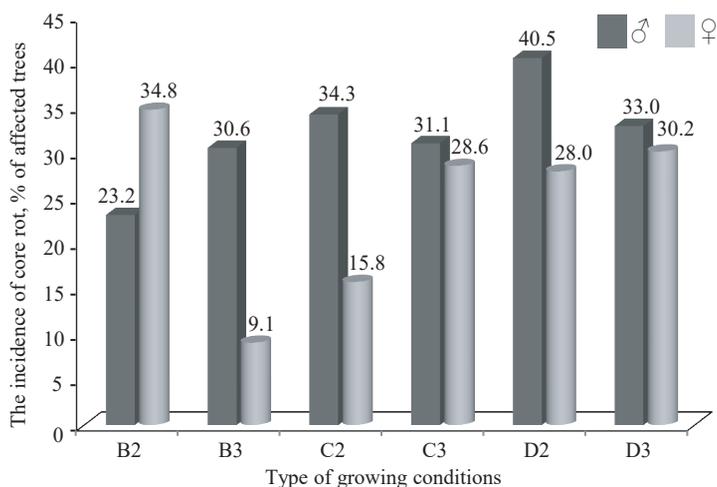


Fig. 4. The incidence of core rot in male and female aspen stands in various growing conditions aged over 30

In the current century, similar studies have been conducted in the Leningrad Region in the Lisinsky Educational and Experimental Forestry on 15 aspen clones and 35 poplar clones. At the age of 10, the height of the clones on the object has varied from 7.7 to 10.5 m, and the diameter – from 3.5 to 16.9 cm. As a result, the best clones have been selected at the site [4, 5, 27, 28].

In 2009, at the Institute of Biology (Syktyvkar) in the Komi Republic, an archive of clones of 42 hybrids and 10 clones of common aspen trees has been established. According to A.L. Fedorkov, at the age of 10, hybrid aspens have had a height of 6.4 m, a diameter of 5.1 cm, and common ones – 4.3 m and 3.1 cm, respectively. That is, at this age, hybrid aspens have exceeded common ones in height and diam-

eter by 61–65 %. The author concludes that use of hybrid aspen trees for plantation forest cultivation in the taiga zone is promising [8].

Aspen breeding has also been carried out abroad: in Germany, Sweden, Norway, Finland, Poland, Czechoslovakia, Scotland, the Baltic States, the USA, Canada, etc. [13–15, 20, 22–25].

If in the 30s of the last century aspen was considered as undesirable species in many countries, significant work is currently underway on its breeding and widespread use [13, 14, 24, 25]. The main method of obtaining healthy aspen wood in these countries is the selection of the best forms, their propagation and cultivation on plantations [7, 10–12, 17, 22].

Conclusions

1. Aspen is one of the fastest growing woody plants, which has been increasingly used in recent decades, both in our country and abroad.

2. A 40-year study of the growth and survival of 21 aspen clones in the Central Black Earth Region has shown that, according to the results of the ranking, the top 5 (ranks 1–5) have included aspen clones no. 16 and 17, selected at the Botanical Garden of the Voronezh State University; 2 hybrids (clones no. 20, 23) and American aspen (no. 29), introduced from The Baltic States.

3. Their growth rates at the age of 40 have been as follows: height – 26.0–31.3 m, diameter – 42.2–50.0 cm, trunk volume – 1.42–2.40 m³.

4. The selected aspen clones are recommended for reproduction and their wide introduction into plantation forest cultivation in the Voronezh Region.

5. In addition, male clones introduced from the Baltic States (R_{pg} hybrid, and American aspen no. 29), which do not produce fluff, can be recommended for landscaping.

REFERENCES

1. Bagaev E.S., Chudetsky A.I., Makarov S.S. Evaluation of the Possibility of the Use of Fast-Growing Aspen Forms for Laying Timber Plantations with a Short Turnover of Felling. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry information, 2023, no. 1, pp. 55–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.05>
2. Bagaev S.N., Korenev I.A., Bagaev S.S., Zontikov D.N. Features of the Formation of Fast-Growing Clones in the Genetic Reserve of Giant Aspen. *Lesnoe khozyajstvo*, 2013, no. 2, pp. 26–28. (In Russ.).
3. Bagaev E.S. Prospects for the Use of Fast-Growing Aspen Forms for the Establishment of Forest Raw Material Plantations. *Aktual'nye problemy nauki v agropromyshlennom komplekse*: Collection of Articles from the 69th International Scientific and Practical conference in 3 vol. Ed. by Yu.V. Pankratov, N.Yu. Paramonova. Karavaevo, Kostroma State Agricultural Academy, 2018, vol. 1, pp. 6–10. (In Russ.).
4. Boytsov A.K., Zhigunov A.V., Lukina A.D., Babich A.I. Dynamics of Preservation of Hybrid Aspen Clones in Crops in the North-West of Russia. *Lesn Rossii: Politika, Promyshlennost', Nauka, Obrazovanie*: Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference. St. Petersburg, Saint-Petersburg State Forest Technical University, 2022, pp. 68–71. (In Russ.).
5. Boytsov A.K., Zhigunov A.V. Ten-Year Breeding Tests for Growing Clones of Hybrid Aspen and Other Hybrid Poplars in the Conditions of the North-West of Russia. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceed-

ings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2023. no. 3, pp. 38–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.3.38>

6. Chernishenko O.V., Rumyantsev D.E., Sarapkina E.V. The Problem of the Growing and Breeding of Healthy Aspen at the Present Time. *Resources & Technology*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 1–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2016.3421>

7. Dincă L., Vechiu E. The Aspen (*Populus tremula* L.) from the Southern Carpathians. *Current Trends in Natural Sciences*, 2020, vol. 9, iss. 17, pp. 168–174. <https://doi.org/10.47068/ctns.2020.v9i17.020>

8. Fedorkov A.L. Stem Volume and Quality of Hybrid and Common Aspen in the Clonal Archive. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 92–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-92-98>

9. Hadži-Georgiev K., Goguševski M. Dvolazne Tabele Mass za Topola Klona *Populus euramericana* cv. I-214 u Gevgeliskom Području. *Topola*, 1972, vol. XVI, no. 90, pp. 25–29. (In Serb.-Croat.).

10. Kivinen S., Koivisto E., Keski-Saari S., Poikolainen L., Tanhuanpää T., Kuzmin A., Viinikka A., Heikkinen R.K., Pykälä J., Virkkala R., Vihervaara P., Kumpula T. A Keystone Species, European Aspen (*Populus tremula* L.), in Boreal Forests: Ecological Role, Knowledge Needs and Mapping Using Remote Sensing. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 462, art. no. 118008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118008>

11. Kusbach A., Hruban R. Osika: Všudybylka, Popelka a Buřeň Kulturních Lesů? *Lesnická Práce*, 2020, no. 4, pp. 120–122. (In Czech).

12. Kusbach A., Šebesta J., Hruban R., Peška P., Rogers P.C. Eurasian Aspen (*Populus tremula* L.): Central Europe's Keystone Species 'Hiding in Plain Sight'. *PLOS ONE*, 2024, no. 19(3), art. no. e0301109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301109>

13. Liesebach M. *Poplars and Other Fast-Growing Tree Species in Germany*: Report of the National Poplar Commission. Progress Report 2016–2019. Germany, Braunschweig, Thünen Working Paper 141a, 2020. 33 p. <https://doi.org/10.3220/WP1585727785000>

14. Meyer M., Gebauer K., Janssen A., Krabel D. The Importance of Fuel Characteristics of Poplars and Aspens (*Populus* spp.) from German Short Rotation Plantations and Russian Forests. *German Russian Conference on Forest Genetics – Proceedings – Ahrensburg, 2017 21–23 November*. Degen B., Krutovsky K.V., Liesebach M. (eds). Germany, Braunschweig, Thünen Report 62, 2018, pp. 61–66. <https://doi.org/10.3220/REP1539855736000>

15. Myking T., Böhler F., Austrheim G., Solberg E.J. Life History Strategies of Aspen (*Populus tremula* L.) and Browsing Effects: a Literature Review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2011, vol. 84, iss. 1, pp. 61–71. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq044>

16. Petrukhnov V.P. Aspen Hybridization in the Central Chernozem Oblast. *Gibridizatsiya lesnykh drevesnykh porod*: Collection of Scientific Papers. Voronezh, Central Research Institute of Forest Genetics and Breeding, 1988, pp.101–106. (In Russ.).

17. Rogers P.C., Pinno B.D., Šebesta J., Albrechtsen B.R., Li G., Ivanova N., Kusbach A., Kuuluvainen T., Landhäuser S.M., Liu H., Myking T., Pulkkinen P., Wen Z., Kulakowski D. A Global View of Aspen: Conservation Science for Widespread Keystone Systems. *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 21, art. no. e00828. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00828>

18. *State Forest Register 2013 (as of January 1, 2014)*. Moscow, Roslesinform Publ., 2014. 690 p. (In Russ.).

19. Tsarev A.P. Growth and Breeding of Aspen in Russia. *Silvae Genetica*, 2013, vol. 62, iss. 1–6, pp. 153–160. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0020>

20. Tsarev A., Tsareva R., Tsarev V., Fladung M., Wühlisch G. von. Aspen Hybridization: Parents' Compatibility and Seedlings' Growth. *Silvae Genetica*, 2018, vol. 67, pp. 12–19. <https://doi.org/10.2478/sg-2018-0002>

21. Tsareva R.P. Aspen Breeding. *Breeding of Forest and Ornamental Woody Plants*. A.P. Tsarev, S.P. Pogiba, N.V. Laur. Ed. by A.P. Tsarev. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2014, pp. 350–363. (In Russ.).

22. Turna İ., Atar F. Stand Analysis and Distribution Areas of European Aspen (*Populus tremula* L.) Forests in Türkiye. *SilvaWorld*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 15–27. <https://doi.org/10.61326/silvaworld.v3i1.148>

23. Worrell R. European Aspen (*Populus tremula* L.): A Review with Particular Reference to Scotland. II. Values, Silviculture and Utilization. *Forestry*, 1995, vol. 68, iss. 3, pp. 231–243. <https://doi.org/10.1093/forestry/68.3.231>

24. Wuehlisch G. von. Growth Performance of F1-Hybrids, Backcrossed Hybrids and F2-Hybrids of *Populus tremula* and *Populus tremuloides*. *Poplars and Willows: from Research Models to Multipurpose Trees for a Bio-Based Society: 5th International Poplar Symposium*. Italy, Orvieto, 2010. 37 p.

25. Wühlisch G. von. Eurasian aspen – *Populus tremula*. *EUFORGEN: Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use*. Italy, Rome, Biodiversity International, 2009. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/22884009/eurasian-aspen-populus-tremula-euforgen> (accessed 12.03.24).

26. Yablokov A.S. *Growing and Breeding Healthy Aspen*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 442 p. (In Russ.).

27. Zhigunov A.V., Shabunin D.A., Butenko O.Yu. Triploid Aspen Forest Plantations of *in vitro* Planting Material. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"* = Vestnik of Volga State University of Tecnology. Series "Forest. Ecology. Nature Management", 2014, no. 4(24), pp. 21–30. (In Russ.).

28. Zhigunov A.V., Ulianich P.S., Lebedeva M.V., Potokina E.K. Development of Research Resources for Marker-Assisted Selection of Aspen (*Populus tremula* L.) in Russia. *German Russian Conference on Forest Genetics – Proceedings – Ahrensburg, 2017 21-23 November*. Degen B., Krutovsky K.V., Liesebach M. (eds). Germany, Braunschweig, Thünen Report 62, 2018, pp 35–39. <https://doi.org/10.3220/REP1539855736000>

29. Zontikov D.N., Zontikova S.A., Bagayev E.S., Bagayev S.S., Sergejev R.V., Novikov P.S., Shurgin A.I. Growth and Productivity of *Populus tremula* L. in the Kostroma Region. *Scientific Journal of KubSAU*, 2013, no. 91(07), pp. 311–321. (In Russ.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Обзорная статья

УДК 631.811.6.88:630*32

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-20-51

Синтетические и природные регуляторы роста растений для выращивания сеянцев древесных пород

Н.П. Чернобровкина[✉], *д-р биол. наук, вед. науч. сотр., доц.;*

ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

А.В. Егорова, *канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.;* ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

Е.В. Робонен, *науч. сотр.;* ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

К.Г. Нелаева, *аспирант, мл. науч. сотр.;* ResearcherID: [GYJ-7223-2022](https://orcid.org/0000-0002-3283-4451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; chernobrovkina50@bk.ru[✉], egorova.anast@mail.ru, er51@bk.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 13.02.24 / Одобрена после рецензирования 28.04.24 / Принята к печати 30.04.24

Аннотация. Активно внедряются и совершенствуются технологии выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой, в т. ч. многоротационный режим. В лесных питомниках подзоны средней тайги РФ его использование затруднено в связи с коротким вегетационным периодом и, как следствие, недостаточной адаптацией сеянцев 2-й ротации к условиям зимнего сезона и недостижением ими стандартных размеров. Одним из эффективных приемов улучшения роста растений и их адаптированности к неблагоприятным условиям среды является применение стимуляторов роста. Проведены многочисленные исследования по выявлению влияния таких препаратов на прорастание семян и развитие сеянцев древесных пород для оптимизации режима выращивания. Цель статьи – обобщение и систематизация результатов исследований применения регуляторов роста растений при выращивании сеянцев в лесных питомниках. Приводится классификация регуляторов роста растений: синтетические на базе различных источников и биостимуляторы на основе естественного сырья – кислотные, микробиологические и экстракты растений. Последние включают экстракты древесных и травянистых растений, морских водорослей. Рассматривается состав биологически активных соединений в препаратах из древесной зелени хвойных и лиственных пород. Представлены сведения об особенностях и эффективности влияния синтетических регуляторов роста и биостимуляторов на развитие сеянцев и их приживаемость при посадке на лесокультурную площадь. Излагаются характерные черты процесса получения препаратов из древесной зелени, пристальное внимание отводится наличию фитогормонов в этих препаратах в зависимости от времени отбора растительного материала в суточной динамике. Применение синтетических регуляторов роста, а также биостимуляторов является надежным способом улучшения всхожести семян и роста сеянцев древесных пород при их выращивании в лесных питомниках. Выбор регуляторов роста для конкретных целей при подготовке посадочного материала базируется на экспериментальных исследованиях с учетом вида растений, экономической целесообразности, экологии, климата и сырьевых ресурсов региона.

Ключевые слова: синтетические регуляторы роста растений, биостимуляторы, древесная зелень, морские водоросли, посадочный материал, лесные питомники

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00192/>.

Для цитирования: Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Робонен Е.В., Нелаева К.Г. Синтетические и природные регуляторы роста растений для выращивания сеянцев древесных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 20–51.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-20-51>

Review article

Synthetic and Natural Plant Growth Regulators for Growing Seedlings of Tree Species

Nadezhda P. Chernobrovkina[✉], Doctor of Biology, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

Anastasiya V. Egorova, Candidate of Agriculture, Junior Research Scientist;

ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

Elena V. Robonen, Research Scientist; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

Karina G. Nelaeva, Postgraduate Student, Junior Research Scientist;

ResearcherID: [GYJ-7223-2022](https://orcid.org/0000-0002-3283-4451), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; chernobrovkina50@bk.ru[✉], egorova.anast@mail.ru, er51@bk.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru

Received on February 13, 2024 / Approved after reviewing on April 28, 2024 / Accepted on April 30, 2024

Abstract. Technologies for growing planting stock with a closed root system, including a multi-rotation mode, are being actively introduced and improved. In the forest nurseries of the middle taiga subzone of the Russian Federation, its use is difficult due to the short growing season and, as a consequence, the insufficient adaptation of the 2nd rotation seedlings to the conditions of the winter season and their failure to reach standard sizes. One of the effective methods for improving plant growth and their adaptability to adverse environmental conditions is the use of growth stimulants. Numerous studies have been conducted to identify the effect of such preparations on seed germination and the development of tree seedlings in order to optimize the growing regime. The aim of this article is to summarize and systematize the results of studies on the use of plant growth regulators in the cultivation of seedlings in forest nurseries. A classification of plant growth regulators has been given: synthetic ones based on various sources and biostimulants based on natural raw materials – acidic, microbiological and plant extracts. The latter include extracts of woody and herbaceous plants and marine algae. The composition of biologically active compounds in preparations from coniferous and deciduous foliage has been considered. The article presents information on the peculiarities and effectiveness of synthetic growth regulators and biostimulants on the development of seedlings and their survival rate when planted in a forest cultivation area. The characteristic features of the process of obtaining preparations from foliage have been presented, close attention has been paid to the presence of phytohormones in these preparations, depending on the time of selection of planting stock in daily dynamics. The use of synthetic

growth regulators, as well as biostimulants, is a reliable way to improve seed germination and the growth of tree seedlings when grown in forest nurseries. The choice of growth regulators for specific purposes when preparing planting stock is based on experimental studies taking into account the plant species, economic feasibility, ecology, climate and raw material resources of the region.

Keywords: synthetic plant growth regulators, biostimulants, foliage, marine algae, planting stock, forest nurseries

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00192/>.

For citation: Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Robonen E.V., Nelaeva K.G. Synthetic and Natural Plant Growth Regulators for Growing Seedlings of Tree Species. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 20–51. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-20-51>

Введение

Выращивание высококачественного посадочного материала в лесных питомниках является необходимым звеном в процессе лесовосстановления. Повышение эффективности лесопитомнических хозяйств достигается путем разработки и совершенствования новых технологий, направленных на создание устойчивых систем получения посадочного материала. Активно внедряются и оптимизируются технологии выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой, в т. ч. многоротационный режим. Его использование в лесных питомниках подзоны средней тайги РФ затруднено в связи с коротким вегетационным периодом растений и, как следствие, риском неподготовленности сеянцев к зимнему сезону. С целью адаптации режима выращивания сеянцев к условиям короткого вегетационного периода применяются современные агротехнические приемы, такие как искусственное сокращение фотопериода в конце вегетационного сезона для прекращения развития растения в высоту и формирования у него достаточного уровня морозостойчивости [71, 72, 75, 79, 80]. При этом есть вероятность, что сеянцы 2-й ротации не достигнут стандартных размеров.

Одним из эффективных способов улучшения роста растений и их адаптивности к неблагоприятным условиям среды является применение стимуляторов роста. Изучение их эффективности при выращивании растений способствовало развитию химической индустрии в этой сфере. Многообразие регуляторов роста определяется избирательностью их действия на различные растения. Регуляторы роста растений – одна из самых перспективных групп препаратов, состав которой ежегодно обновляется. Регуляторы роста делятся на продукты искусственного химического синтеза и природные фитогормоны, производимые растительными клетками. Основные составляющие рынка – синтетические регуляторы роста, препараты на основе гуминовых кислот (Escormon и др.), аминокислот (Metalosates Calcium and Fe, Agrocean B, Tecamin Brix и др.), экстракты морских водорослей (Natrakelp, Fair Dinkum Fertilizers, Acadian Seaplants, Kelpak и др.) [70].

Особое внимание уделяется минимизации влияния химических препаратов на окружающую среду. Одним из способов более быстрого достижения этой цели является использование препаратов биологического происхождения –

биостимуляторов. Они экологически чистые и безопасны для человека [113]. Биостимуляторы на основе экстрактов растений, аминокислот, гуминовых кислот и фульвокислот составляют 85 %, морских водорослей – около 15 % от объема мирового рынка биостимулирующих препаратов [66].

Несмотря на то, что использование биологических соединений в сельскохозяйственном производстве известно давно [73, 94], контролируемое применение биостимулирующих веществ и их коммерческих продуктов ощутимо увеличилось только в 70-е гг. прошлого столетия [86]. В лесном хозяйстве, как и в других отраслях, связанных с выращиванием растений, ставится задача максимально ограничить использование химических препаратов. Альтернативой для них могут быть биостимуляторы [81, 101, 103], стимуляторы роста и питания растений [91], иммуностимуляторы [91, 96], препараты, содержащие эффективные микроорганизмы [67, 74, 93], которые давно применяются в сельском хозяйстве и садоводстве, однако для лесного хозяйства являются относительно новым направлением [122].

Цель данного обзора – обобщение и систематизация результатов исследований синтетических регуляторов роста растений и биостимуляторов, применяемых при выращивании посадочного материала в лесных питомниках.

Всхожесть семян. К одной из проблем выращивания посадочного материала в лесных питомниках относится низкое качество семян, которое приводит к неравномерности их прорастания в кассетах. При посеве в ячейку более 1 семени повышаются затраты на получение посадочного материала за счет увеличения расхода семян, прореживаний и пересадки. Существуют различные способы повышения посевных качеств лесных семян. Наиболее эффективным из них считается стратификация (снегование). Приводятся сведения по методическим подходам применения этого способа и барботации, дражирования семян микоризой, использования макро- и микроэлементов, протравливания семян сосны и ели фунгицидами [49]. Представлен список лучших препаратов для предпосевного протравливания семян сосны и ели по «Государственному каталогу пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации». Для повышения посевных качеств семян хвойных также разрабатываются методы физического воздействия, представленные в обзоре [49]: обработка низкочастотным электромагнитным полем (всхожесть повышается на 28,3 %); активированной плазмой (на 11,2 %); ультрафиолетовым облучением (на 11,0 %); рентгеновскими лучами и ультразвуком (на 7,0 %). Однако данные способы обработки семян являются либо сложными, либо недоступными.

Для максимального снижения потери лесосеменного сырья, особенно селекционно-улучшенного, разрабатываются способы повышения всхожести семян с учетом физиологических аспектов. Генетический и физиологический анализ показали, что полный покой семян устанавливается в процессе эмбриогенеза при сбалансированности активности между различными гормонами [68]. Прорастание семян обусловлено содержанием и соотношением в них абсцизовой (АБК) и гиббереллиновой (ГК) кислот [26, 69, 106, 123]. Регуляция выхода семян из состояния покоя заключается в ослаблении влияния АБК и усилении – ГК на метаболические процессы клеток [26]. Механизмы, лежащие в основе благоприятного воздействия способа влажного охлаждения на выведение семян из состояния покоя, также связаны с растительными гормонами АБК и ГК.

В процессе влажной стратификации семян ели белой (*Picea glauca* Moench. Voss) при пониженных температурах уровни названных кислот значительно изменялись, при этом заметное снижение содержания АБК и повышение уровня ГК₃₃, предшественника биоактивного ГК₁, наблюдалось в течение первых 6 ч после помещения семян в оптимальные условия света и температуры, что способствовало быстрому прорастанию [97]. Установлено, что обработка семян сосны Массона (*Pinus massoniana* Lamb.) ГК способствовала снижению в них уровня АБК [85]. Экзогенные ГК значительно повышали всхожесть семян ели Смита (*Picea smithiana* Wall. Voiss) [107]. Обработка семян сосны обыкновенной и ели европейской ГК увеличивала их всхожесть [44, 78, 85, 107, 129]. Предпосевная обработка семян хвойных стимуляторами роста позволяла значительно повысить их энергию прорастания и всхожесть [5, 15, 17, 30, 39, 48, 56] (см. таблицу). Показано влияние стимуляторов роста на грунтовую всхожесть семян и сохранность сеянцев главных лесобразующих видов Средней Сибири [18].

Детально представлены особенности воздействия регуляторов роста на посевные качества семян сосны обыкновенной и ели европейской при выращивании в открытом грунте [49]. Отмечается, что в питомниках следует использовать стимулирующие рост растений препараты из перечня разрешенных на территории РФ, список которых ежегодно обновляется. Для стимуляции прорастания семян предложено 53 препарата, из них только 2 – Рибав-Экстра (на основе экстракта микоризных грибов из корней женьшеня) и Циркон (на основе гидроксикоричных кислот из листьев эхинацеи) рекомендуются для обработки семян и стимуляции роста хвойных. 39 препаратов в этом аспекте не апробированы, и лишь для 14 препаратов изучено влияние на семена хвойных. Сформирован перечень эффективных препаратов различной природы для семян сосны: Агат-25К ($1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-3}$ %), Вэрва-ель (0,025 мл/10 мл воды), Крезацин (1 мл/3–5 л), Новосил (2 кап./1 л), Оберег (7 кап./500 мл), Рибав-Экстра (1 мл/4–5 л), Циркон (1 мл/5–6 л), Экогель (20 мл/л), Экопин (1 мл/3–5 л), Эми-стим-С (2 мл/л), Эпин-Экстра ($1 \cdot 10^{-2}$ %); для ели: Гетероауксин (4 г/л), Гумат (0,01 %), Экогель (30 мл/л) [49].

Рост сеянцев. В малых дозах стимуляторы роста в качестве корневых и внекорневых подкормок оказывают положительное воздействие также на рост сеянцев хвойных пород, способствуют лучшему развитию корневой системы, накоплению биомассы, тем самым позволяя увеличивать выход качественного посадочного материала и снижать затраты на его выращивание [41]. При 1-кратном воздействии стимуляторами положительный эффект на рост сеянцев хвойных сохранялся в течение всего срока выращивания [42].

Внекорневая обработка сеянцев сосны юньнаньской (*Pinus yunnanensis* Franch.) ауксинами положительно влияла на их развитие [127]. Сочетание предпосевной обработки семян ели европейской (*Picea abies* L. Karst.) и сосны крымской (*Pinus pallasiana* Lamb.) Цирконом и Цитовитом с последующими внекорневыми обработками сеянцев Крезацином, Супер Гумисолом и Силиплантом способствовало усилению ростовых процессов сеянцев и их адаптивной способности к условиям выращивания [42]. При внесении Крезацина как корневой подкормки при получении сеянцев пихты почкочешуйной, или белокорой (*Abies nephrolepis* Maxim.), и пихты цельнолистной (*A. holophylla* Maxim.) его стимулирующий эффект на их рост сохранялся в течение 2 лет [31].

Эффективность стимуляторов роста при выращивании семян древесных пород
The efficiency of growth stimulants in the cultivation of tree seedlings

Вид	Регулятор роста	Дозировка	Способ воздействия	Преращение по отношению к контролю, %	Источник данных	
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	Фумар	0,001 мл/л*	Замачивание семян	<i>W</i> – 7,5; <i>H</i> – 58; <i>L</i> – 109; <i>M</i> – 47	[39]	
		0,01 мл/л		<i>W</i> – 8,8; <i>H</i> – 54; <i>L</i> – 99; <i>M</i> – 41		
	Циркон	0,01 мл/л	Внекорневая обработка 2-летних семян	<i>H</i> – 33; <i>L</i> – 16; <i>M</i> – 23	[40]	
		0,1 мл/л				Замачивание семян 18 ч; внекорневая обработка каждые 2 недели
	Экорост	10 мл/10 л	Корневая обработка	<i>H</i> – 19,4	[3]	
		15 мл/10 л				<i>H</i> – 17,3
	Крезацин	$1 \cdot 10^{-2}$ %	Внекорневая обработка всходов		<i>K</i> – 22	[41]
		$1 \cdot 10^{-3}$ %				
	ОберегЪ	7 кап./500 мл	Замачивание семян 0,5–1 ч		<i>W</i> – 31; <i>K</i> – 30	
	Экотель	30 мл/л	Замачивание семян 24 ч		<i>W</i> – 17; <i>K</i> – 17	[18]
	Новосил	8 кап./л	Замачивание семян 0,5 ч		<i>W</i> – 14; <i>K</i> – 14	
	Вэрва-ель	0,25 мл/1 кг семян	Замачивание семян 6 ч		<i>D</i> – 17; <i>M</i> – 24	[58]
	Вэрва	0,25 мл/1 кг семян	Замачивание семян 6 ч		<i>D</i> – 28; <i>M</i> – 47	
Экстракт из хвои можжевельника	3–4 л/1 кг семян	Замачивание семян 24 ч		<i>E</i> – 25; <i>W</i> – 19	[35]	

Продолжение таблицы

Вид	Регулятор роста	Дозировка	Способ воздействия	Превышение по отношению к контролю, %	Источник данных	
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	Экстракт из хвои сосны	15 %	Проращивание семян в экстракте	M – 13	[7]	
	Большой помидор Гумат + 7 микроэлементов	167 л·га ⁻²	Корневая обработка	H – 16; D – 56; L – 27; M – 109	[8]	
		0,5 г/л				
		0,014 %				
		0,007 %				
	Эмистим	0,0035 %	Замачивание семян 12 ч	H – 5,6; L – 51,7 L – 31,5 H – 5,9; L – 51,7 H – 10,7; L – 3,7	[51]	
		0,00175 %				
		0,0001; 0,0003; 0,0006 %				
	Ивин	0,01 %	Замачивание семян 12; 18 и 24 ч	H – 26,8; D – 4,2–14,1	[22]	
	PowerHumus	0,05 %	Внекорневая обработка через 1 ч после пересадки	Снижение активности пероксидазы в хвое на 57–66 %	[47]	
НВ-101	0,002 %	Замачивание семян	H – 16 % H – 15 %			
Сосна скрученная широкохвойная (<i>P. contorta</i> Dougl. var. <i>latifolia</i> Engelm.)	Экстракт морских водорослей	1:500	3–6-кратная обработка совместно с осенним внесением удобрений	L – 29	[100]	
		Циркон	0,001 мл/л	Внекорневая обработка 2-летних сеянцев	H – 26; L – 11; M – 41 H – 23; M – 19 H – 34; L – 5; M – 95 K – 14–16 M – 50–100 H – 26; M – 33 H – 18; M – 31 K – 7–8 M – 50–100	[40]
			0,01 мл/л			
			0,1 мл/л			
			1·10 ⁻² %			
Крезацин	1·10 ⁻³ %	Замачивание семян 18–20 ч	Внекорневая обработка 2-летних сеянцев	[41]		
	1·10 ⁻³ %					
	1·10 ⁻⁴ %					
1·10 ⁻² %	Замачивание семян 18–20 ч	Внекорневая обработка входов				
1·10 ⁻³ %	Замачивание семян 18–20 ч	Внекорневая обработка входов				

Сосна красная корейская (<i>P. densiflora</i> Siebold et Zucc.)	Фумар	1 · 10 ⁻⁵ %	1-й год – 2-кратная; 2-й год – 1-кратная корневая обработка	[111]
	Крезацин	1 мл/5 л		
Сосна юньнаньская (<i>P. yunnanensis</i> Franch.)	ИУК + ИМК	167 + 186; 310 + 217; 193 + 159; 191 + 221; 206 + 186 мг·л ⁻¹	5-кратная внекорневая обработка	[127]
	Циркон + Цитовит	0,1 + 1 мл/л		
Ель европейская (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	Циркон	0,1 мл/л	К – 158; Н – 33; L – 15; М – 25 К – 39; Н – 40; М – 30	[39]
	Фумар	0,001 мл/л 0,01 мл/л		
Ель сибирская (<i>P. obovata</i> Ledeb.)	Эпин–Экстра + Цитовит	1,0 + 1,0 мл/л	Замачивание семян	[39]
	Эпин–Экстра	1 мл/л		
	Экорост	10 мл/10 л 15 мл/10 л		
	Экогель	30 мл/л 40 мл/л		
	Гетероауксин	4 г/л		
Вэрва	Вэрва	0,1 мл/кг	Н – 8; L – 14 Н – 6; L – 4 Н – 6; L – 4	[2]
	Вэрва–ель	0,025 мл/кг 0,05 мл/кг		
Феровит + Гетероауксин	0,1 + 0,002 %	Замачивание семян 3 ч (Феровит) + корневая обработка 2-летних сеянцев (Гетероауксин)	Н – 40; L – 15; М – 75	[1]

Продолжение таблицы

Вид	Регулятор роста	Дозировка	Способ воздействия	Превышение по отношению к контролю, %	Источник данных
Ель сибирская (<i>P. obovata</i> Ledeb.)	Цитовит + Эпин-Экстра + Гетероауксин	0,01 + 0,002 + 0,002	Замачивание семян 3 ч (Цитовит) + последвсходовая обработка (Эпин- Экстра) + корневая обработка 2-летних сеянцев (Гетероауксин)	H – 20; L – 14; M – 66	[1]
	Рибав	0,001 %	Замачивание семян	H – 100	[47]
	Феровит	0,15 %		H – 100	
Ель белая (<i>P. glauca</i> (Moench) Voss)	Вэрва-ель + Эпин-Экстра и Гетероауксин + Гетероауксин	0,025 + 0,002 + 0,002 %	Замачивание семян (Вэрва- ель) + корневая обработка 1-летних сеянцев (Эпин-Экстра и Гетероауксин) + корневая обработка 2-летних сеянцев (Гетероауксин)	Сокращение срока выращивания; повышение содержания пигментов в хвое; H – 60,1	[47]
	Экстракт морских водорослей	1:125; 1:75	4–8-кратная обработка совместно с осенним внесением удобрений	L – 42–63	[99]
	Фумар	0,001 мл/л 0,01 мл/л	Замачивание семян	W – 12; H – 64; L – 123; M – 50 W – 21,5; H – 55; L – 108; M – 41	[39]
Кедр сибирский (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour)	Циркон	0,01 мл/л 0,1 мл/л	Внекорневая обработка 2-летних сеянцев	H – 26; L – 10; M – 28 H – 20; L – 7; M – 24	[40]
	Крезацин	1·10 ⁻³ %	Внекорневая обработка всходов	H – 13–20; M – 16	[41]
	Фумар	1·10 ⁻² %	Стратификация + замачивание семян 48 ч	K – 71–75	
Кедр корейский (<i>P. koraiensis</i> Siebold et Zucc.)	Циркон	0,1 мл/10 л + 1 мл/10 л	Выдерживание корней 40–60 мин перед посадкой + 2-кратная корневая обработка в течение 2 вегетационных периодов	1-й год: H – 10,9; D – 100; 2-й: H – 18,2; D – 12,5; L – 32; M – 19,2	[27]
	Альбит	1,5 мл/10 л	2-кратная корневая обработка	H – 48; D – 18,8; L – 16,4; M – 59,3	[28]

Пихта цельнолиственная (<i>Abies holophylla</i> Maxim.)	Фумар	1·10 ⁻² %	Статификация + замачивание семян 18–20 ч	К – 47–58 К – 50–55	[41]		
	СИЛК	1·10 ⁻² %					
Пихта цельнолиственная (<i>Abies holophylla</i> Maxim.)	Крезацин	1 мл/10 л	Корневая обработка	1-й год: <i>H</i> – 33,3; <i>D</i> – 9; <i>L</i> – 19,1; 2-й: <i>H</i> – 44,9; <i>D</i> – 28,6; <i>L</i> – 45; 3-й: <i>H</i> – 53; <i>D</i> – 19; <i>L</i> – 23; <i>M</i> – 180	[34]		
		1 мл/10 л				1-й год – 2-кратная; 2-й год – 1-кратная корневая обработка	1-й год: <i>H</i> – 11,8; <i>D</i> – 13; <i>L</i> – 12,8; 2-й: <i>H</i> – 67,5; <i>D</i> – 25; <i>L</i> – 16,5
		1·4·10 ⁻³ мл/л 1·5·10 ⁻³ мл/л					
	1 мл/10 л	Корневая обработка	1-й год: <i>H</i> – 29; <i>D</i> – 4; <i>L</i> – 14; 2-й: <i>H</i> – 34; <i>D</i> – 7; <i>L</i> – 38; 3-й: <i>H</i> – 42; <i>D</i> – 6; <i>L</i> – 16; <i>M</i> – 126				
	1 мл/10 л			1-й год: <i>H</i> – 35; <i>D</i> – 14; <i>L</i> – 22; 2-й: <i>H</i> – 40; <i>D</i> – 21; <i>L</i> – 52; 3-й: <i>H</i> – 48; <i>D</i> – 13; <i>L</i> – 25; <i>M</i> – 180			
	1 мл/10 л				1-й год: <i>H</i> – 28; <i>D</i> – 9; <i>L</i> – 16; 2-й: <i>H</i> – 35; <i>D</i> – 14; <i>L</i> – 40; 3-й: <i>H</i> – 38; <i>D</i> – 13; <i>L</i> – 18; <i>M</i> – 159		
	Эпопин	1 мл/10 л	Замачивание семян	1-й год: <i>H</i> – 22; <i>D</i> – 4; <i>L</i> – 4; 2-й: <i>H</i> – 35; <i>D</i> – 4; 3-й: <i>H</i> – 36; <i>L</i> – 14; <i>M</i> – 111			
	Циркон	1 мл/10 л			Корневая обработка	<i>W</i> – 12,1; <i>H</i> – 48; <i>L</i> – 113; <i>M</i> – 41 <i>W</i> – 17,2; <i>H</i> – 37; <i>L</i> – 94; <i>M</i> – 35	
	Рибав-Экстра	1 мл/10 л					
	Элин-Экстра	1 мл/10 л	Замачивание семян	[39]			
Пихта белокорая (<i>A. perhrolepis</i> (Trautv.) Maxim.)	Фумар	0,001 мл/л 0,01 мл/л	Замачивание семян	1-й год: <i>H</i> – 10,7; <i>D</i> – 11,1; <i>L</i> – 2,8; 2-й: <i>H</i> – 20,5; <i>D</i> – 10,5; <i>L</i> – 5,2	[30]		
Пихта почкочешуйная (<i>A. perhrolepis</i> Maxim.)	Крезацин	1 мл/10 л					
	Энерген	7,0·10 ⁻² %	Замачивание семян 20–24 ч	<i>E</i> – 14,7; <i>W</i> – 24,5 <i>E</i> – 18,2; <i>W</i> – 37,8			
	Эпин	1,8·10 ⁻⁶ %					
Лиственница сибирская (<i>Larix sibirica</i> Ldb.)	Циркон	0,01 мл/л	Внекорневая обработка 2-летних сеянцев	<i>H</i> – 19; <i>L</i> – 12; <i>M</i> – 87	[40]		

Окончание таблицы

Вид	Регулятор роста	Дозировка	Способ воздействия	Превышение по отношению к контролю, %		Источник данных
				W	K	
Лиственница сибирская (<i>Larix sibirica</i> Ldb.)	Экогель	10 мл/л	Замачивание семян 24 ч	W – 19; K – 18	[18]	
		20 мл/л		W – 12; K – 12		
	ОберегЪ	7 кап./500 мл	W – 25; K – 24			
Лиственница даурская (<i>L. dahurica</i> Turcz. Ex Trautv.)	Новосил	10 капель/л	Замачивание семян 0,5–1 ч	W – 26; K – 25	[39]	
		0,001 мл/л		W – 7; H – 55; L – 118; M – 49		
	Фумар	0,01 мл/л	W – 9,3; H – 51; L – 102; M – 39			
Лиственница Каяндера (<i>L. sibirica</i> Mayr.)	Циркон	1 мл/10 л	Внекорневая обработка после пересадки сеянцев	H – 21,6; D – 9; L – 38,6; M – 90,5	[29]	
Лиственница ольгинская (<i>L. olgensis</i> A. Henry)	Экстракт листьев березы плосколистной	5,0 мг/мл	Проращивание семян в экстракте	H – 54; D – 60; M – 100	[95]	
Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i> L.)	Экстракт морских водорослей	Шигеки – 4 л/1000 л; Марал – 2 л/1000 л	2-кратная внекорневая обработка после подрезки 2-летних сеянцев	H – 2-4; D – 5; L – 10-17	[122]	

Примечание: * Для проведения обработки растений препарат растворяют в воде, если не указано другое. W – всхожесть семян; H – высота сеянца; L – длина корней; M, M_{корп}, M_{спр}, M_{зв} – масса сеянца, корней, стволиков и хвои соответственно; D – диаметр стволика у корневой шейки; E – энергия прорастания.

Регуляторы роста Энерген и Эпин рекомендовались к использованию при обработке семян лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) в целях улучшения их прорастания и развития сеянцев на ранних этапах развития [20]. Внекорневая обработка Цирконом сеянцев сосны обыкновенной и крымской (*Pinus pallasiana* Lamb.), лиственницы (*L. sibirica* Ldb.) и кедра (*P. sibirica* Du Tour.) сибирских на 2-м году выращивания позволила значительно ускорить их рост [40]. Крезацин и Агат-25К в качестве внекорневой подкормки сеянцев сосны обыкновенной повышали биомассу растений в 1,5–2,0 раза по отношению к контролю [41]. Двукратная корневая подкормка сеянцев кедра корейского (*P. koraiensis* Sieboldet Zucc.) регулятором роста Альбит в 1-й год роста оказывала положительное влияние на развитие сеянцев по всем основным показателям [28]. Выявлено, что стимуляторы Крезацин, Рибав-Экстра и Экопин при 2-кратной корневой обработке благоприятно воздействуют на проростки сеянцев сосны густоцветковой (*Pinus densiflora* Sieboldet Zucc.), способствуя повышению их высоты, диаметра шейки, длины корневой доли и биомассы [111]. Корневая обработка сеянцев пихты цельнолистной (*A. holophulla* Maxim.) препаратами Циркон, Рибав-Экстра, Крезацин, Экопин, Эпин-Экстра стимулировала развитие растений [33, 34]. Внекорневая обработка саженцев лиственницы Каяндера (*L. cajanderi* Mayr.) Цирконом уже в 1-й год роста, после пересадки в школьное отделение питомника, увеличивала рост растений [29]. Показано положительное влияние регуляторов роста Циркон, Эпин, Крезацин, Гетероауксин на рост высаживаемых под полог леса саженцев кедра корейского [27].

Стрессоустойчивость. Регуляторы роста могут не только повышать посевные качества семян, активность развития сеянцев, но и обеспечивать устойчивость всходов к неблагоприятным факторам [17, 18, 21, 38]. Применение АБК, естественного регулятора роста растений, а также ее синтетических аналогов может усиливать морозоустойчивость растений [82, 87]. Обработка 1-летних сеянцев ели (*Picea glauca*, *P. mariana*) непосредственно перед заложением почек синтетическим соединением со свойствами замедления роста – паклбутразолом – улучшала холодоустойчивость через 4 месяца с момента его применения, однако рост после посадки у обработанных сеянцев ухудшался [70]. Нанесение паклбутразола на саженцы хвойных снижало рост побегов [65, 119, 124]. Особую значимость приемов повышения морозоустойчивости сеянцев хвойных следует отметить в связи с внедрением в условиях высоких широт с коротким вегетационным периодом 2-ротационного режима выращивания, при котором сеянцы 2-й ротации в осенний период могут быть недостаточно устойчивыми к низким температурам.

Несмотря на высокую эффективность регуляторов роста растений при выращивании посадочного материала в лесных питомниках, их использование связано с дополнительными затратами на приобретение самих препаратов, с соблюдением строгих норм приготовления растворов и обработки семян. Перспективной является разработка доступных стимуляторов роста, обладающих большим диапазоном эффективных концентраций, исключая возможность отрицательных последствий при повышенных концентрациях, нетоксичных и экологически безопасных.

Биостимуляторы растений. Европейский Союз (ЕС) законодательно признал биостимуляторы растений отдельной группой сельскохозяйственных препаратов [68]. Опубликован регламент, устанавливающий правила размеще-

ния удобрений на рынке ЕС (2019/1009), в котором понятие «биостимулятор растений» определяется как «продукт, назначение которого заключается в стимулировании процессов питания растений независимо от содержания питательных веществ в продукте с целью улучшения одной или более из следующих характеристик растения или ризосферы растения: а) эффективность поглощения и использования питательных веществ растениями, б) устойчивость растений к абиотическому стрессу, в) качественные признаки культур и г) доступность ограниченных питательных веществ в почве или ризосфере» [77].

Уточняются преимущества применения растительных биостимуляторов: повышенная устойчивость растений к различным стрессам, естественное усиление метаболизма, более эффективное поглощение, транспорт и использование элементов минерального питания (ЭМП), улучшение плодородия почвы в результате стимуляции активности полезных для растений почвенных микроорганизмов [11, 62, 66]. Биохимические аспекты использования биостимуляторов главным образом связаны с изменением гормонального статуса и метаболизма растений [76, 115]. Наука о биостимуляторах в настоящее время быстро развивается, и они находят все более широкое применение. Коммерческие биостимуляторы содержат вещества, положительно воздействующие на рост и развитие растений, а также ЭМП. Были определены 3 основные группы биостимуляторов: кислотные (гуминовые препараты и фульвокислоты, аминокислоты); экстракты растений; микробиологические.

Кислотные биостимуляторы. Гуминовые препараты широко применяются в сельском хозяйстве. При выращивании посадочного материала хвойных пород их использование ограничено, что обусловлено низкой информированностью производителей, недостатком исследований в этом направлении [2]. Отмечается, что гуминовые препараты увеличивают всхожесть, энергию прорастания, положительно влияют на развитие надземной части и корневой системы сеянцев хвойных [23, 24, 53, 54, 92]. В тепличном комплексе Архангельской области был испытан гуминовый препарат Экорост в качестве корневой подкормки сеянцев ели европейской (*Picea abies*) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), а также для замачивания семян ели [2]. В состав препарата входят: азот – 2,8 г/л, фосфор – 0,02 г/л, калий – 5,91 г/л, гуминовые кислоты – не менее 30 г/л; микроэлементы: медь, цинк, марганец, железо, селен. Замачивание семян ели в растворе препарата способствовало повышению всхожести и энергии прорастания до 13 %. Препарат оказывал положительное влияние на рост сеянцев сосны и ели. При поливе раствором препарата сеянцев ели 1-й ротации превышение средней высоты опытных сеянцев по сравнению с контрольными составляло до 17 %. Доля стандартных по размерам сеянцев ели также была больше при использовании препарата Экорост. Его применение при посевах сосны увеличивало высоту сеянцев относительно контрольного варианта до 19,4 %. Полив раствором данного препарата позволил повысить выход стандартных сеянцев ели на 40,6 %, а сосны – на 36,9 % по сравнению с контролем. На основании полученных данных авторы [3] пришли к выводу, что гуминовый препарат Экорост в определенных концентрациях оказывает благоприятный эффект на всхожесть семян ели, рост сеянцев сосны и ели с закрытой корневой системой, и рекомендовали его к применению.

Также в условиях Северо-Западного региона России испытан гуминовый препарат Power Hummus [22]. Внекорневая обработка сеянцев сосны обыкно-

венной препаратом с концентрацией гуматов в растворе 0,01 % была проведена через 1 ч после пересадки растений из закрытого грунта в лесную почву. К 3-й неделе после пересадки активность пероксидазы, характеризующей уровень стрессового состояния растений, в хвое у обработанных препаратом сеянцев, в отличие от варианта без применения препарата, оказалась близка к ее уровню в хвое сеянцев с закрытой корневой системой. Авторы [22] заключили, что препарат снижал уровень физиологического стресса у растений, вызванного пересадкой в лесную почву.

На основании результатов исследований [3, 22], а также исследований других авторов [23, 24, 53, 54], гуминовые препараты увеличивают всхожесть, энергию прорастания семян, положительно влияют на развитие надземной части и корневой системы сеянцев хвойных и могут быть рекомендованы к применению.

Микробиологические биостимуляторы. Одним из биологически активных препаратов, созданных на основе экстракта микоризного гриба, выделенного из корней женьшеня, является Эмистим [52]. Он содержит около 75 компонентов, среди которых фитогормоны ауксиновой, цитокининовой, гиббереллиновой природы, аминокислоты, ненасыщенные жирные кислоты, углеводы, микроэлементы. Эмистим стимулировал всхожесть семян, развитие корневой системы и рост в высоту 1-летних сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской [25, 50, 51]. Ранневесеннее применение препарата снижало риск развития грибных заболеваний.

Препарат Ивин получен путем культивирования в стерильных условиях микромицетов с корневой системы облепихи на жидкой среде, содержащей минеральные и органические источники питания [51]. Наличие в составе комплекса физиологически активных веществ обуславливает широту спектра его действия. Ивин улучшал рост корешков проростков сосны обыкновенной на 6–11 %, рост сеянцев в высоту – на 26 % и по диаметру – на 14 %. Указывается на целесообразность применения микробиологических биостимуляторов при выращивании посадочного материала хвойных пород.

Биостимуляторы из древесной зелени. У специалистов лесных питомников повышается интерес к доступным и несложным в приготовлении стимуляторам роста, возрастает тенденция к использованию препаратов из растительного сырья [6]. Преимуществами природных регуляторов роста являются их экологическая безопасность, многофункциональность действия, в т. ч. способность снижать последствия стрессовых воздействий окружающей среды на растения [60]. Их применение позволяет уменьшить частоту обработки посевов фунгицидами, они не вредны для человека, растений и полезной микрофлоры, отличаются малыми нормами расхода.

Особого внимания заслуживает получение экстрактов из древесной зелени. Этот вид растительного сырья является самовозобновляемым, доступным и дешевым. Древесную зелень хвойных пород в свежем виде можно перерабатывать в течение всего года, используя в различных областях содержащиеся в ней биологически активные соединения. Производство биостимуляторов из древесных отходов актуально также в связи с проблемой рационального применения древесного сырья [12, 13, 43]. При проведении лесозаготовительных работ, рубках ухода, расчистке трасс линий электропередач образуются отходы древесины – порубочные остатки – сучья, ветви, вершины и обломки стволов

дереьев, опилки и пр. При существующих способах переработки древесного сырья в России полезно используется около 1/2 биомассы дерева. Основные потери приходятся на древесную зелень (лесосечные отходы) [45, 55]. Одним из путей решения этой проблемы является применение древесной массы для получения биологически активных препаратов.

Препараты из хвойных пород. Хвойная древесная зелень, кора, древесина выступают в качестве источников биологически активных экстрактивных веществ [64]. Это возобновляемое растительное сырье содержит соединения, обладающие иммуностимулирующей, фунгицидной, бактерицидной активностью, на основе которых разработаны регуляторы роста растений и биопрепараты. Исследования состава компонентов хвойного сырья, комплексной переработки и его использования в различных отраслях активно проводились еще со 2-й половины прошлого столетия и продолжают в настоящее время [63, 64].

На отечественном рынке представлены препараты на основе экстрактивных соединений хвойных растений [60]. Действующими веществами этих препаратов являются биофлавоноид дигидрокверцетин, выделенный из древесины лиственницы (Лариксин, Агростимул), терпеноиды сосны (Терпенол), тритерпеновые кислоты пихты (Силк, Новосил, Вэрва) [46]. Особенности их благоприятного воздействия на функциональную активность, ростовые и адаптационные процессы у растений представлены в работе [60]. Проводятся исследования влияния биопрепаратов из хвойной древесной зелени Вэрва и Вэрва-ель на всхожесть семян, рост и развитие проростков ели сибирской и обыкновенной, сосны обыкновенной [2]. В ходе лабораторных опытов отмечено положительное действие Вэрва и Вэрва-ель на рост корней и проростков ели сибирской. Предпосевная обработка семян этими препаратами привела к пролонгированному влиянию на рост сеянцев сосны обыкновенной [58]. Активно изучаются биопрепараты на основе тритерпеновых кислот пихты сибирской, таких как СИЛК, Новосил, Биосил, показано их ростостимулирующее и защитное действие на разные виды растений, в т. ч. хвойные [18, 37, 57].

Выявлено положительное влияние экстрактов можжевельника на прорастание семян сосны обыкновенной, рост проростков и их защиту от инфекций [35]. Показана зависимость стимулирующего воздействия водных экстрактов из хвои можжевельника на прорастание семян сосны обыкновенной от активности в них фитогормонов [35]. Отмечалось наличие суммарного благоприятного влияния группы биологически активных водорастворимых веществ, экстрагируемых из хвои сосны обыкновенной, на накопление сухой массы 15-дневных проростков сосны обыкновенной [7].

Отмечены положительные результаты воздействия на рост и развитие сеянцев ели сибирской и сосны обыкновенной нескольких препаратов, в т. ч. на основе древесной зелени ели Вэрва-ель [47]. В эксперименте семена ели сибирской перед посевом в открытый грунт последовательно обрабатывали растворами препаратов Феровит, Цитовит, Вэрва-ель. В 1-й год выращивания проводили корневую обработку Эпином-Экстра и Гетероауксином, во 2-й – Гетероауксином. Комбинирование биопрепаратов повлияло на фотосинтетический аппарат у 2-летних сеянцев ели – происходило повышение содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в хвое, что положительно коррелировало с высотой и фитомассой надземной части растений. В варианте с препаратом Вэрва-ель ежегодный линейный прирост превышал показатель для контрольного варианта на 60,1 %.

При создании участка опытных культур сеянцами ели с открытой корневой системой, выращенными с использованием биопрепаратов, достигнуты высокие приживаемость и сохранность культур (95–100 %). Саженьцы ели варианта Вэрва-ель отличались значительной высотой (до 53 см).

Испытания разработанного на базе Тихвинского химзавода хвойного препарата из древесной зелени сосны и ели, в состав которого входят хлорофилло-каротиновая паста, хвойный экстракт и хвойное эфирное масло, показали положительные результаты при выращивании посадочного материала хвойных пород в условиях лесного питомника. После 1-кратной корневой подкормки сеянцев сосны обыкновенной с открытой корневой системой на 2-й год роста повышались по сравнению с контролем масса сеянцев (в 2 раза) и линейные параметры (в 1,5 раза), отмечалось увеличенное накопление фосфора в органах сеянцев [8].

Экстракты из лиственных древесных пород. Большой интерес представляет получение препаратов из древесной зелени лиственных пород, характеризующихся высокой скоростью ростовых процессов и самовозобновления. Разработаны теоретические основы ресурсосберегающей комплексной переработки вегетативной части лиственной древесной породы – тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) семейства Salicaceae, позволяющей в едином технологическом процессе получать продукты, обладающие биологической активностью [14]. Повышение качественных характеристик семян сосны обыкновенной наблюдалось после их обработки водным экстрактом из растущих листьев ивы козьей (*Salix caprea* L.) с максимальной ГК- и минимальной АБК-подобной активностями в суточном цикле [9]. Семена 2-го класса под воздействием препарата стали соответствовать 1-му. Водные экстракты корней и веток березы плосколистной (*Betula platyphylla*) способствовали прорастанию семян и росту гипокотилия лиственницы ольгинской (*Larix olgensis*) [98]. Древесная зелень лиственных пород может использоваться и в качестве компонента субстрата при выращивании посадочного материала в закрытом грунте. Положительный эффект на рост сеянцев сосны обыкновенной отмечался при внесении в торфяной субстрат переработанной древесной зелени быстрорастущих видов лиственных пород: ивы козьей (до 33 % объема), березы повислой (*Betula pendula* L.) (до 25 % объема) и ольхи серой (*Alnus incana* L. Moench) (до 25 % объема) [12]. Отмечая высокую физиологическую активность биопрепаратов из хвойных и лиственных пород, следует указать на недостаточное испытание их в условиях лесных питомников с целью выявления влияния на рост и устойчивость сеянцев. Исследования в этом направлении способствовали бы внедрению таких препаратов в практику лесных питомников.

Экстракты морских водорослей (ЭМВ). В мировой практике в качестве биостимуляторов все более активно используются ЭМВ, которые в странах Европы отнесены к группе немикробных биостимуляторов растений [61]. Наиболее широко применяемые в мире ЭМВ – это Acadian, Algifert, Goemar, Kelpak, Maxicrop, Seasol, Strimplex. Представлены сведения о самых популярных коммерческих продуктах на основе ЭМВ [95, 105, 117]. Исследования ламинариевых и фукусовых водорослей Белого и Японского морей показали наличие в них полисахаридов, витаминов, жирных полиеновых кислот, ауксинов и гиббереллинов, богатый состав первичных и вторичных метаболитов, микро- и макроэлементов [4, 19]. Это дало основание считать, что водоросли являются

хорошим ресурсом для производства экстрактов со свойствами биостимуляторов растений. Как и фитогормоны, эти экстракты влияют на физиологические процессы при очень низких концентрациях [73].

Обозначены первоочередные задачи, решение которых должно определять перспективы использования ЭМВ в ближайшие годы [61, 68]. По результатам исследований, учитывающих экономическую обоснованность применения ЭМВ в растениеводстве, для них должны быть разработаны рекомендации по способам и нормам, частоте и срокам внесения и т. д. Несмотря на то, что внедрение ЭМВ в сельскохозяйственное производство сокращает использование экологически вредных химикатов и способствует сохранению окружающей среды [112], отмечается нецелесообразность замены химических удобрений на ЭМВ [61]. Внедрение технологий применения ЭМВ совместно с минеральными удобрениями позволит получать максимальную пользу от широкого ассортимента регуляторов роста.

Россия обладает большими запасами различных видов морских водорослей, добыча которых традиционно осуществляется на Дальнем Востоке (Японское море), южных и малых Курильских островах, Сахалине, в Приморье, на материковом побережье Охотского моря и в Белом море. Ведется разработка технологий комплексного использования морских водорослей, однако заказчиками являются в основном производители пищевых, фармацевтических и косметологических продуктов. Для целей растениеводства в России из бурых водорослей Белого моря производят удобрения, но не экстракты с биостимулирующими свойствами. Спрос на ЭМВ увеличивается как следствие тенденции к расширению применения тепличной гидропоники.

ЭМВ для лесных питомников. Исследования влияния ЭМВ на качество семян хвойных и лиственных древесных пород в лесных питомниках в настоящее время находятся на начальной стадии. Представлены единичные экспериментальные данные в этом направлении [99, 100, 122]. Научные работы проводили в связи с необходимостью адаптировать семена хвойных растений к засушливым условиям при их посадке на лесокультурные площади [99, 100]. Сообщается, что по мере изменения климата, приводящего к засушливым условиям в местах посадки, эффективной может быть соответствующая предварительная подготовка семян при выращивании в питомниках. Предполагается, что активный рост корней у семян при пересадке станет критически важным для обеспечения достаточного поглощения воды до начала засушливых периодов в конце весны–начале лета, которые, по прогнозам, усилятся в связи с климатическими сдвигами [100]. Особый интерес с точки зрения адаптации семян к новым условиям при посадке на лесокультурную площадь представляет сообщение об увеличении засухоустойчивости растений под воздействием ЭМВ [73]. Так, количество сформировавшихся корней и, следовательно, физиологическая функция полевицы ползучей (*Agrostis palustris*) были увеличены за счет применения экстракта *Ascophyllum nodosum* (L.) LeJolis (ANE) [128]. Выживаемость семян древесных пород при пересадке улучшается, если они могут сразу пускать корни в почву [84]. При этом отмечается, что почвенные условия лесокультурной площади определяют количество корней, необходимое для выживания.

Было испытано корневое внесение экстракта бурой водоросли *A. nodosum* (L.) LeJolis в определенных концентрациях для семян сосны скрученной ши-

рокохвойной (*Pinus contorta* Dougl. var. *Latifolia* Engelm.) в сентябре по вариантам 3 и 6 раз, для сеянцев ели в августе и сентябре 4 и 8 раз. [100]. При пересадке в июне на лесокультурную площадь препарат в концентрации 1:500 частей воды значительно, до 30 % по сравнению с контролем (без обработки препаратом), увеличивал у сеянцев сосны общее количество белых корней, как коротких, так и длинных. Предполагается, что ANE стимулировал у сосны образование боковых корневых зачатков вдоль существовавших субэризированных корней и не оказал влияния на образование ксилемы в древесных корнях, которая составляет большую часть корневой биомассы. Эти результаты отличаются от данных исследования многолетних злаков: ежемесячное внесение ANE в течение вегетационного периода (с июня по ноябрь) увеличивало сухую массу корней [128]. ANE в этом опыте повышал длину корневой системы у сельскохозяйственных растений при внесении весной на этапе формирования рассады в культуре [108]. Разница по сравнению с сосной может объясняться межвидовыми различиями, обусловленными особенностями строения корня, неодинаковой дозировкой препарата, а также частотой или сроками его применения.

Обработка ANE сеянцев ели белой во время выращивания в питомнике в августе и сентябре оказала значительное влияние на выход белых корней из неповрежденного торфяного субстрата в середине мая [99]. По сравнению с контролем внесение препарата значительно увеличивало общее количество белых корней – до 63 %, в т. ч. длинных (55 см) – до 110, и коротких (5 см) – до 44 %. Восьмикратное применение ANE при выращивании сеянцев ели белой по сравнению с 4-кратным на протяжении августа и сентября не оказало дополнительного действия на длину корневой системы в середине октября или выход корней следующей весной. Учитывая, что даты 4 применений ANE и первых 4 из 8 совпадали и что повышенные уровни эндогенного ауксина и цитокинина в тканях корней, вызванные применением ANE, носят временный характер [126], авторы предположили, что отсутствие такого влияния обусловлено временем последних 4 из 8 обработок по отношению к циклу роста/покоя корней. Как удлиняющиеся, так и поглощающие корни сеянцев ели белой демонстрировали дискретные циклы активного роста в конце лета/начале осени [90]. Возможно также, что 8-кратное внесение ANE было избыточным.

Воздействие препаратов Марал (Maral) и Шигеки (Shigeki), содержащих 10,5 % ЭМВ *A. nodosum* (L.) LeJolis, а также бор, медь, железо, марганец и цинк, оценивали в лесных питомниках в восточно-центральной Польше по данным применения к 2-летним сеянцам дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) [122]. Эти препараты являются одними из многих доступных биостимуляторов, используемых в сельском хозяйстве и садоводстве в случае стресса у растений. Они положительно влияют на метаболизм растений, что способствует их лучшему развитию и повышению стрессоустойчивости. В эксперименте в качестве стрессового фактора приняли распространенную в лесном хозяйстве процедуру подрезки корневых систем сеянцев. Применение препарата было направлено на улучшение развития и устойчивости после возникновения стресса. Задачей исследования было также испытание препаратов, содержащих экстракт *A. nodosum*, для снижения риска возникновения мучнистой росы, вызываемой грибом *E. alphitoides*. Сообщалось, что биостимуляторы, содержащие *A. nodosum*, повышали устойчивость к биотическим факторам [89, 122]. Использование препарата с ЭМВ для сельскохозяйственных растений значитель-

но уменьшало их заболеваемость возбудителями при инокулировании в тепличных условиях, а также поражение листовыми грибковыми заболеваниями [88].

В эксперименте [122] проводили опрыскивание растений водным раствором препаратов Шигеки и Марала. Подрезка корневой системы была выполнена в апреле–мае. Обработки биостимуляторами осуществляли 2 раза – во 2-й декаде мая и 1-й декаде июня. Через 2 месяца после заключительной обработки у сеянцев определяли биометрические показатели и количество листьев, пораженных грибом *E. alphitoides*. Выявлена статистически значимая тенденция увеличения длины корней после их подрезки под воздействием препаратов. По мнению авторов [122], испытанные биостимуляторы могут оказывать положительное влияние на развитие сеянцев дуба после возникновения стресса, но повышения вследствие их применения естественного иммунитета и снижения инфицирования *E. alphitoides* не наблюдалось.

Авторы [99, 100, 122] пришли к выводу о целесообразности использования ЭМВ ANE при выращивании сеянцев древесных пород в питомниках в конце лета – начале осени для стимулирования развития корней сразу после весенней посадки, что способствует поддержанию водного баланса растений [83, 84]. Отмечается, что необходимы дальнейшие исследования для уточнения биологически оптимальных и экономически целесообразных норм внесения ЭМВ ANE, а также частоты их применения в условиях лесного питомника с последующей оценкой эффекта на засушливых лесокультурных площадях.

Временной фактор при заготовке растительного сырья. Получение и применение биостимуляторов в практике лесного и сельского хозяйства предполагает решение ряда задач научно-прикладного и производственного (технологического) характера, таких как оптимизация процесса экстракции и достижение стабильности в составе производимых препаратов, установление наиболее надежных способов их хранения и транспортировки. Особенно значимым для наличия в препаратах биостимуляторов является правильный выбор времени сбора растительного сырья, зависящий от видовой принадлежности растений, фазы их развития и условий окружающей среды [9]. Большой перечень экстрактов из различных видов растений [2, 32, 35, 59, 98, 130], оказывающих стимулирующее воздействие на растения, позволил авторам [49] предположить, что экстракты зелени любых растений, в т. ч. и сорняков, заготовленных в начале вегетационного периода, будут оказывать стимулирующий эффект на ростовые процессы.

Фитогормональная активность в растениях значительно меняется в течение 24-часового цикла дня и ночи в результате регуляции метаболизма циркадными часами [63, 104]. Пиковые значения отмечались в разное время суток в зависимости от вида растений, их органов и тканей [64, 109, 120, 121, 125]. При использовании растительного сырья для получения биостимуляторов необходимо учитывать суточные ритмы функциональной активности растений, чтобы гарантировать максимальное преобладание стимулирующего эффекта экстракта над ингибирующим. При разработке и оптимизации способов получения препаратов из растительного сырья рационально использовать методы биотестов, при которых определяют активность стимуляторов и ингибиторов роста в растениях [10, 16]. Эффективность растительных препаратов определяется комплексным воздействием содержащихся в них биологически активных соединений. При помощи методов биотестов была выявлена суточная динамика активности фитогормонов в растущих листьях *Salix caprea* L. в условиях

южной Карелии в мае и в июле [6]. Максимальная ГК-подобная активность при минимальной АБК-подобной активности наблюдалась в утреннее (8.00) и вечернее (20.00) время. Данные экстракты оказывали наибольшее положительное действие на посевные качества семян сосны обыкновенной II класса качества, их энергия прорастания повышалась с 68 % (в контроле) до 83 %, абсолютная всхожесть – с 70 до 88 %, техническая – с 68 до 85 % [36].

Получение экстрактов из древесной зелени является несложным технологическим процессом. Первым продуктом, образующимся при комплексной переработке вторичного сырья древесных пород, может быть экстракт водорастворимых веществ. Способ эмульсионной переработки растительного сырья с использованием в качестве экстрагентов водных растворов оснований отличается экологической безопасностью и позволяет эффективно извлекать природные низкомолекулярные соединения из древесной зелени хвойных пород [59]. При разработке технологий приготовления биостимуляторов из древесной зелени рационально учитывать закономерности аллелохимического воздействия водных экстрактов при их применении [94, 102, 110, 114, 116, 118, 130]. Выбор регуляторов роста для конкретных целей при совершенствовании технологий выращивания посадочного материала базируется на экспериментальных исследованиях с учетом вида растений, экономической целесообразности, экологии, климата и сырьевых ресурсов региона.

Заключение

Анализ литературных данных показал, что применение регуляторов роста растений, полученных синтетическим путем на базе различных источников, а также биостимуляторов на основе естественного сырья (кислотные, микробиологические и экстракты растений) является эффективным способом улучшения всхожести семян и роста сеянцев древесных пород в лесных питомниках.

В перечень эффективных препаратов для обработки семян хвойных пород включены: для сосны – Агат-25К, Вэрва-ель, Крезацин, Новосил, Оберег, Рибав-Экстра (Циркон, Экогель, Экопин, Эмистим-С, Эпин-Экстра); для ели – Гетероауксин, Гумат, Экогель. При стимуляции роста сеянцев рекомендуются к использованию как синтетические препараты, так и биостимуляторы, а также их комплексное применение. Представлены лишь единичные сведения по повышению холодоустойчивости сеянцев хвойных с помощью абсцизовой кислоты и ее синтетических аналогов. Для защиты от инфекционных заболеваний сеянцев хорошо зарекомендовали себя препараты на основе древесной зелени хвойных пород. В целях улучшения приживаемости сеянцев хвойных при высадке на лесокультурные площади предлагаются Циркон, Эпин, Крезацин, Гетероауксин, развития корневой системы – экстракты морских водорослей.

Особого внимания заслуживают перспективные препараты на основе экстрактов из растительного сырья, которые отличаются высокой физиологической активностью, низкими токсичностью и себестоимостью, а также доступностью. Получение экстрактов из растительного материала не является сложным технологическим процессом. Заготовка сырья с учетом суточной и сезонной динамики содержания биологически активных веществ в органах и тканях растения позволит существенно повысить эффективность препаратов. Показана высокая полезность экстракта из листьев ивы, заготовленных с уче-

том временной составляющей, для повышения посевных качеств семян. Целесообразно наряду с испытанием в лесных питомниках известных биостимуляторов разрабатывать новые природные биологически активные препараты на основе экстрактивных веществ для рационального и экономного использования лесных и морских биоресурсов, которыми богата Россия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ageev A.A., Saltsevich Yu.V., Buryak L.V. Комплексное применение биостимуляторов при выращивании сеянцев ели (*Picea obovata* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 73–87.

Ageev A.A., Saltsevich Yu.V., Buryak L.V. Integrated Application of Biostimulants in Cultivation of Siberian Spruce Seedlings (*Picea obovata* L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 73–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-73-87>

2. Андреева Е.М., Стеценко С.К., Кучин А.В., Терехов Г.Г., Хурилкайнен Т.В. Влияние стимуляторов роста природного происхождения на проростки хвойных пород // Лесотехн. журн. 2016. № 3. С. 10–19.

Andreeva E.M., Stetsenko S.K., Kutchin A.V., Terekhov G.G., Hurshkainen T.V. The Influence of Growth-Promoting Factors Obtained from Natural Material on Softwood Germs. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2016, no. 3, pp. 10–19. (In Russ.). <https://doi.org/12737/21675>

3. Бобушкина С.В. Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 45–54.

Bobushkina S.V. Efficiency Production Methods of Conifers Ball-Rooted Planting Stock in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-45-54>

4. Боголицын К.Г., Каплицин П.А., Ульяновский Н.В., Пронина О.А. Комплексное исследование химического состава бурых водорослей Белого моря // Химия растит. сырья. 2012. № 4. С. 153–160.

Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Ul'yanovskij N.V., Pronina O.A. A Comprehensive Study of the Chemical Composition of Brown Algae in the White Sea. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2012, no. 4, pp. 153–160. (In Russ.).

5. Гапонько Е.А., Каницкая Л.В. Оценка влияния стимуляторов на энергию прорастания и всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) // Успехи соврем. естествознания. 2018. № 8. С. 46–51.

Gaponko E.A., Kanitskaya L.V. Evaluating Influence of Stimulants upon Energy of Germination and Seed Growth for Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2018, no. 8, pp. 46–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.36835>

6. Егорова А.В. Влияние экстрактов из древесной зелени и водопроводного осадка в качестве компонента субстрата на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной: дис. ... канд. с.-х. наук. Петрозаводск, 2019. 125 с.

Egorova A.V. *Effect of Extracts from Wood Greenery and Tap Sediment as a Component of the Substrate on Seed Germination and Growth of Scots Pine Seedlings*: Cand. Agric. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2019. 125 p. (In Russ.).

7. Егорова А.В., Зайцева М.И., Колесников Г.Н., Никонова Ю.В. Влияние хвойного экстракта на проращивание семян сосны обыкновенной // Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции. Петрозаводск, 2014. С. 38–43.

Egorova A.V., Zajtseva M.I., Kolesnikov G.N., Nikonova Yu.V. The Effect of Coniferous Extract on Germination of Scots Pine Seeds. *Resource-Saving Technologies, Materials and Structures*. Petrozavodsk, 2014, pp. 38–43. (In Russ.).

8. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника // Химия растит. сырья. 2017. № 2. С. 171–180.

Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Effects of Application of a Conifer-Derived Chemical on the Growth and Elemental Composition of *Pinus sylvestris* L. Seedlings in a Forest Nursery. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2017, no. 2, pp. 171–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017021720>

9. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Зайцева М.И. Способ получения водных экстрактов из листьев ивы козьей с учетом суточной динамики их биологической активности для повышения всхожести семян сосны обыкновенной // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 5. С. 394–400.

Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Zaitseva M.I. The Technique of Water Extract Preparation from Goat Willow Leaves with Allowance for Circadian Rhythm of Their Biological Activity to Stimulate Scots Pine Seed Germination. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2019, vol. 66, pp. 827–833. <https://doi.org/10.1134/S1021443719040034>

10. Егоршина А.А., Хайруллин Р.М., Сахабутдинова А.Р., Лукьянцев М.А. Участие фитогормонов в формировании взаимоотношений проростков пшеницы с эндофитным штаммом *Bacillus subtilis* 11BM // Физиология растений. 2012. Т. 59, № 1. С. 148–154.

Egorshina A.A., Khairullin R.M., Sakhabutdinova A.R., Luk'yantsev M.A. Involvement of Phytohormones in the Development of Interaction between Wheat Seedlings and Endophytic *Bacillus subtilis* Strain 11BM. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2012, vol. 59, pp. 134–140. <https://doi.org/10.1134/S1021443711050062>

11. Жемчужин С.Г., Спиридонов Ю.Я., Босак Г.С. Биопестициды: современное состояние проблемы (дайджест публикаций за 2012–2017 гг.) // Агрохимия. 2019. № 11. С. 77–85.

Zhemchuzhin S.G., Spiridonov Yu.Ya., Bosak G.S. Biopesticides: Modern Condition of the Problem (Digest of Publications for 2012–2017). *Agrokhimiya* = Eurasian Soil Science, 2019, no. 11, pp. 77–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0002188119110140>

12. Зайцева М.И., Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 1(70). С. 4–8.

Zaitseva M.I., Robonen E.V., Chernobrovkina N.P. Utilization of Logging Residues in Preparation of Peat Substrates for Closed Root Growing of Scots Pine Seedlings. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2010, no. 1(70), pp. 4–8. (In Russ.).

13. Зайцева М.И., Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Колесников Г.Н. Утилизация отходов переработки хвой сосны обыкновенной // Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии. Петрозаводск: ПГУ, 2013. С. 25–30.

Zaitseva M.I., Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Kolesnikov G.N. Disposal of Waste from Processing of Scots Pine Needles. *Low-Rise Wooden Housing Construction: Economics, Architecture and Resource-Saving Technologies*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2013, pp. 25–30. (In Russ.).

14. Исаева Е.В. Комплексная переработка вегетативной части тополя бальзамического с получением биологически активных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2008. 381 с.

Isaeva E.V. *Complex processing of the Vegetative Part of Balsam Poplar with the Production of Biologically Active Products*: Doct. Tech. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2008. 381p. (In Russ.).

15. Кабанова С.А., Данченко М.А., Борцов В.А., Кочерганов И.С. Результаты предпосевной обработки семян сосны обыкновенной стимуляторами роста // Лесотехн. журн. 2017. № 2. С. 75–83.

Kabanova S.A., Danchenko M.A., Bortsov V.A., Kocherganov I.S. Results of Presowing Treatment of Seeds of Scots Pine with Growth Stimulants. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, no. 2, pp. 75–83. (In Russ.).

http://doi.org/10.12737/article_5967e97d74f307.86943920

16. Кефели В.И. Природные ингибиторы роста и фитогормоны. М.: Наука, 1974. 253 с.

Kefeli V.I. *Natural Growth Inhibitors and Phytohormones*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 253 p. (In Russ.).

17. Кириенко М.А. Влияние стимуляторов роста на всхожесть семян и сохранность всходов главных лесообразующих пород // Вестн. КрасГАУ. 2014. № 12. С. 134–140.

Kirienko M.A. The Influence of Growth Stimulants on the Seed Germination and Seedling Safety of the Main Forest-Forming Species. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2014, no. 12, pp. 134–140. (In Russ.).

18. Кириенко М.А., Гончарова И.А. Влияние концентрации стимуляторов роста на грунтовую всхожесть семян и сохранность сеянцев главных лесообразующих видов Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2016. № 1. С. 39–45.

Kirienko M.A., Goncharova I.A. The Influence of Growth Stimulants at Different Concentrations on Ground Seed Germination and Survival of Seedlings of the Main Forest Forming Species of Central Siberia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 1, pp. 39–45. (In Russ.).

19. Ключкова Т.А., Климова А.В., Ключкова Н.Г. Перспективы использования камчатских ламинариевых водорослей в региональном растениеводстве // Вестн. КамчатГТУ. 2019. № 48. С. 90–103.

Klochkova T.A., Klimova A.V., Klochkova N.G. Prospects of Using Laminariacean Algae from Kamchatka in the Regional Horticulture. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Kamchatka State Technical University, 2019, no. 48, pp. 90–103. (In Russ.).

20. Ковылина О.П., Ковылин Н.В., Кеня Е.С., Познахирко П.Ш. Изучение влияния регуляторов роста на прорастание семян лиственницы сибирской // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2014. № 38. С. 93–97.

Kovylyina O.P., Kovylin N.V., Kenya E.S., Poznakhirko P.Sh. Study of the Effect of Growth Regulators on the Germination of Siberian Larch Seeds. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2014, no. 38, pp. 93–97. (In Russ.).

21. Ларионова Н.А. Применение гормональных веществ для улучшения качества семян и роста сеянцев хвойных пород в Красноярском крае // Лесн. хоз-во. 1997. № 6. С. 28–30.

Larionova N.A. The Use of Hormonal Substances to Improve the Quality of Seeds and the Growth of Coniferous Seedlings in the Krasnoyarsk Territory. *Lesnoe khozyajstvo*, 1997, no. 6, pp. 28–30. (In Russ.).

22. Медведев Д.С., Фитцова А.В. Влияние обработки сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) гуминовым препаратом на активность пероксидазы хвои при пересадке в лесную почву в целях лесовосстановления // Леса России: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. политика, промышленность, наука, образование. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 288–290.

Medvedev D.S., Fittsova A.V. Effect of Treatment of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) Seedlings with a Humic Preparation on the Activity of Needle Peroxidase during Transplantation into Forest Soil for Reforestation Purposes. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg, St. Petersburg Forest Technical University Publ., 2023, pp. 288–290. (In Russ.).

23. Митрофанов С.В., Ганеева Н.Н., Мочалова Е.Н. Влияние гуминовых удобрений на посевные качества Ели европейской // Экологически устойчивое земледелие: состояние, проблемы и пути их решения: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Иваново: ПресСто, 2018. С. 177–181.

Mitrofanov S.V., Gapeeva N.N., Mochalova E.N. The Influence of Humic Fertilizers on the Sowing Qualities of European Spruce. *Ecologically Sustainable Agriculture: Status, Problems and Solutions: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Ivanovo, PresSto Publ., 2018, pp. 177–181. (In Russ.).

24. Немков П.С., Грехова И.В. Влияние гуминового препарата на сеянцы хвойных пород // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 96–99.

Nemkov P.S., Grekhova I.V. Influence of the Humic Preparation on Seedlings of Coniferous Breeds. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology, 2015, no. 1, pp. 96–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2015-1-098-101>

25. Носников В.В., Волкович А.П., Юреня А.В., Ярмолович В.А. Эффективность предпосевной обработки семян сосны и ели препаратом Эмистим-С // Тр. БГТУ. 2014. № 1. С. 150–153.

Nosnikov V.V., Volkovich A.P., Yurenya A.V., Yarmolovich V.A. Efficiency of Pre-Sowing Treatment of Pine and Spruce Seeds with Emistim-S Preparation. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2014, no. 1, pp. 150–153. (In Russ.).

26. Обручева Н.В. Переход от гормональной к негормональной регуляции на примере выхода семян из покоя и запуска прорастания // Физиология растений. 2012. Т. 59, № 4. С. 591–600.

Obrucheva N.V. Transition from hormonal to Non-Hormonal Regulation as Exemplified by Seed Dormancy Release and Germination Triggering. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2012, vol. 59, pp. 546–555.

<https://doi.org/10.1134/S1021443712040097>

27. Острошенко В.В., Акимов Р.Ю. Влияние стимуляторов на рост саженцев сосны кедровой корейской (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) под пологом хвойно-широколиственных лесов // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 7. С. 89–93.

Ostroshenko V.V., Akimov R.Yu. The Stimulator Influence on the Korean Cedar Pine (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) Seedling Growth under the Coniferous and Deciduous Wood Crown Layer. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2013, no. 7, pp. 89–93. (In Russ.).

28. Острошенко В.В., Ватулич Д.С. Применение стимулятора роста альбит при выращивании сеянцев кедр корейского // Вестн. КрасГАУ. 2014. № 3. С. 144–147.

Ostroshenko V.V., Vatulich D.S. The Application of the Albite Growth Stimulator When Growing Korean Cedar Tree Seedlings. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2014, no. 3, pp. 144–147. (In Russ.).

29. Острошенко В.В., Зборовский А.В. Влияние внекорневой подкормки цирконом на рост саженцев лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.) // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам Междунар. технич. конф. Брянск: БГИТА, 2009. № 23. С. 101–104.

Ostroshenko V.V., Zborovskij A.V. The Effect of Foliar Fertilizing with Zircon on the Growth of Cajander Larch (*Larix cajanderi* Mayr.) Seedlings. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, no. 23, pp. 101–104. (In Russ.).

30. Острошенко В.В., Острошенко Л.Ю., Ключников Д.А., Острошенко В.Ю., Чекушкина Т.И. Влияние стимуляторов роста на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. СамНЦ РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 242–248.

Ostroshenko V.V., Ostroshenko L.Yu., Kluchnikov D.A., Ostroshenko V.Yu., Chekushkina T.I. The Influence of Growth Stimulators on Germinating Energy and Laboratory Germination of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seeds. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2015, vol. 17, no. 6, pp. 242–248. (In Russ.).

31. Острошенко В.В., Острошенко Л.Ю., Острошенко В.Ю. Применение стимулятора роста «Крезацин» при выращивании сеянцев рода пихта (*Abies*) // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 5. С. 184–189.

Ostroshenko V.V., Ostroshenko L.Yu., Ostroshenko V.Yu. The Application of the Growth Stimulator «Kresazinin» Growing Fir (*Abies*) Genus Seedlings. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2015, no. 5, pp. 184–189. (In Russ.).

32. *Острошенко В.Ю.* Эффективность применения стимуляторов роста при выращивании посадочного материала хвойных древесных пород в Приморском крае: дис. ... канд. с.-х. наук. Уссурийск, 2021. 281 с.

Ostroshenko V.Yu. *Efficiency of Using Growth Stimulants in Growing Planting Material of Coniferous Trees in the Primorsky Territory*: Cand. Agric. Sci. Diss. Ussuriysk, 2021. 281 p. (In Russ.).

33. *Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю.* Влияние стимулятора роста Экопин на посевные качества семян и биометрические показатели проростков пихты цельнолистной (*Abies holophylla* Maxim.) // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2020. № 2(71). С. 17–23.

Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. Effect of the Growth Stimulator Ekopin on Sowing Qualities of Seeds and Biometric Parameters of Manchurian Fir (*Abies holophylla* Maxim.) Sprouts. *EvrAzijskij Soyuz Uchenyh (ESU)* = Eurasian Union of Scientists (EUS), 2020, no. 2(71), pp. 17–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.6.71.611>

34. *Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю.* Эффективность применения стимуляторов роста при выращивании семян пихты цельнолистной (*Abies holophylla* Maxim.) // Успехи соврем. естествознания. 2020. № 4. С. 41–47.

Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. The Effectiveness of the Application of Growth Stimulants in Growing Manchurian Fir (*Abies holophylla* Maxim.). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2020, no. 4, pp. 41–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37360>

35. *Панюшкина Н.В., Карасев В.Н., Карасева М.А., Бродников С.Н.* Способ стимуляции скорости прорастания семян сосны обыкновенной // Бюл. Федеральной службы по интелект. собств., патентам и товарным знакам. 2015. № 32. 5 с.

Panyushkina N.V., Karasev V.N., Karaseva M.A., Brodnikov S.N. Method for Stimulating the Germination Rate of Scots Pine Seeds. *Byulleten' Federal'noj sluzhby po intelektual'noj sobstvennosni, patentam i tovarnym znakam* = Bulletin of the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks, 2015, no. 32. 5 p. (In Russ.).

36. Патент 2662999 С1 РФ, МПК А01N 65/00. Способ получения стимулятора роста сосны обыкновенной: № 2017118750: заявл. 29.05.2017: опубл. 22.07.2018 / А.В. Егорова, Н.П. Чернобровкина, Е.В. Робонен.

Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. *A Method for Obtaining a Growth Stimulator for Scots Pine*. Patent RF, no. RU 2662999 C1, 2018. (In Russ.).

37. *Пентелькин С.К.* Итоги изучения стимуляторов роста и полимеров в лесном хозяйстве за последние 20 лет // Лесохоз. информ. 2003. № 11. С. 34–53.

Pentelkin S.K. Results of the Study of Growth Stimulants and Polymers in Forestry over the Past 20 Years. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2003, no. 11, pp. 34–53. (In Russ.).

38. *Пентелькин С.К., Пентелькина Н.В.* Крезацин для лесных питомников // Лесн. хоз-во, 2000. № 2. С. 29–31.

Pentelkin S.K., Pentelkina N.V. Krezacin for Forest Nurseries. *Lesnoe khozyaystvo*, 2000, no. 2, pp. 29–31. (In Russ.).

39. *Пентелькина Н.В., Острошенко Л.Ю.* Выращивание семян хвойных пород в условиях Севера и Дальнего Востока с использованием стимуляторов роста // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2005. № 10. С. 125–129.

Pentelkina N.V., Ostroshenko L.Yu. Growing Conifer Seedlings in the Conditions of the North and the Far East Using Growth Stimulants. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2005, no. 10, pp. 125–129. (In Russ.).

40. Пентелькина Н.В., Пентелькина Ю.С. Стимулирующее действие циркона на рост сеянцев хвойных интродуцентов // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2002. № 2. С. 24–29.

Pentelkina N.V., Pentelkina Yu.S. Stimulating Effect of Zircon on the Growth of Seedlings of Introduced Conifers. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2002, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.).

41. Пентелькина Ю.С. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев хвойных видов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Москва, 2003. 28 с.

Pentelkina Yu.S. *The Influence of Stimulants on Seed Germination and Growth of Coniferous Species*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2003. 28 p. (In Russ.).

42. Проказин Н.Е., Лобанова Е.Н., Пентелькина Н.В., Казаков В.И., Ивановьева Г.И., Сахнов В.В., Чукарина А.В., Багаев С.С. Влияние биостимуляторов и микроудобрений на рост сеянцев хвойных пород // Лесохоз. информ. 2013. № 2. С. 9–15.

Prokazin N.E., Lobanova E.N., Pentelkina N.V., Kazakov V.I., Ivanjusheva G.I., Sakhnov V.V., Chukarina A.V., Bagaev S.S. Biostimulator and Microfertilizer Impacts on Coniferous Seedlings Growth. *Lesochozyajstvennaya informaziya* = Forestry Information, 2013, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.).

43. Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу // Resources and Technology. 2015. Т. 12, № 1. С. 47–76.

Robonen E.V., Zaitseva M.I., Chernobrovkina N.P., Tshernychenko O.V., Vasil'ev S.B. An Experience of Designing and Applying Non-Peat Substrates for Forest Nursery Containers. Peat Alternatives. *Resources and Technology*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 47–76. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15393/j2.art.2015.3081>

44. Романов Е.М. Выращивание сеянцев древесных растений: Биоэкологические и агротехнологические аспекты. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. 500 с.

Romanov E.M. *Growing Seedlings of Woody Plants: Bioecological and Agrotechnological Aspects*. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University, 2000. 500 p.

45. Рубчевская Л.А., Чистякова Н.Я., Рубчевская Л.П. Новые направления в комплексной переработке древесной зелени хвойных // Фундаментальные исследования. 2005. № 2. С. 84–85.

Rubchevskaya L.A., Chistyakova N.Ya., Rubchevskaya L.P. New Directions in Complex Processing of Coniferous Wood Greens. *Fundamental'nye issledovaniya* = Fundamental Research, 2005, no. 2, pp. 84–85. (In Russ.).

46. Рябчинская Т.А., Зимина Т.В. Средства, регулирующие рост и развитие растений, в агротехнологиях современного растениеводства // Агрохимия. 2017. № 12. С. 62–92.

Ryabchinskaya T.A., Zimina T.V. Means Regulating Plant Growth and Development in Modern Crop Production Agrotechnologies. *Agrokhimiya* = Eurasian Soil Science, 2017, no. 12, pp. 62–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0002188117120092>

47. Салцевич Ю.В., Агеев А.А., Буряк Л.В. Методы выращивания посадочного материала для искусственного лесовосстановления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всерос. науч.-технич. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 346–349.

Saltsevich Yu.V., Ageev A.A., Buryak L.V. Methods of Growing Planting Material for Artificial Reforestation. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg, St. Petersburg Forest Technical University Publ., 2023, pp. 346–349. (In Russ.).

48. Скозарева И.А., Чернодубов А.И. Эффективность применения стимуляторов роста при выращивании сеянцев сосны обыкновенной // Лесотехн. журн. 2019. № 3. С. 87–95.

Skosareva I.A., Chernodubov A.I. Efficiency of Growth Stimulant Application Growing Seeds of Scots Pine. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, no. 3, pp. 87–95. (In Russ.).

49. Тюкавина О.Н., Демина Н.А. Практика повышения посевных качеств семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) // Лесн. вестн. 2022. Т. 26, № 6. С. 75–91.

Tyukavina O.N., Demina N.A. Practice of Improving Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seeds and European Spruce (*Picea abies* L.) Progeny. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 75–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-6-75-91>

50. Устинова Т.С. Стимуляция эмистимом с медью всхожести семян и роста сеянцев сосны // Лесоводство и экология: современные проблемы и пути их решения: матер. науч.-практ. конф. Брянск, 1996. С. 124–127.

Ustinova T.S. Stimulation of Seed Germination and Growth of Pine Seedlings with Emistim and Copper. *Forestry and Ecology: Modern Problems and Solutions: Proceedings of the Scientific and Practical Conference*. Bryansk, 1996, pp. 124–127. (In Russ.).

51. Устинова Т.С. Влияние биостимуляторов на рост сеянцев сосны обыкновенной в Брянском округе зоны широколиственных лесов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск, 2000. 23 с.

Ustinova T.S. *The Influence of Biostimulants on the Growth of Scots Pine Seedlings in the Bryansk District of the Broad-Leaved Forest Zone*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Bryansk, 2000. 23 p. (In Russ.).

52. Устинова Т.С. Применение эмистима при выращивании сосны обыкновенной: матер. науч.-техн. конф. Брянск, 2002. С. 95–96.

Ustinova T.S. *Application of Emistim in the Cultivation of Scots Pine*: Proceedings of the Scientific and Technical Conference. Bryansk, 2002, pp. 95–96. (In Russ.).

53. Устинова Т.С. Биологические стимуляторы роста, применяемые в лесных питомниках // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2009. № 23. С. 136–138.

Ustinova T.S. Biological Growth Stimulants Used in Forest Nurseries. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, no. 23, pp. 136–138. (In Russ.).

54. Устинова Т.С., Зуров Р.Н. Влияние препарата Гумат+7 на ростовые процессы хвойных пород // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2010. № 26. С. 115–118.

Ustinova T.S., Zurov R.N. The Effect of the Preparation Gumat+7 on the Growth Processes of Coniferous Species. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2010, no. 26, pp. 115–118. (In Russ.).

55. Ушанова В.М., Степень Р.А., Пенях С.М. Переработка древесных отходов хвойных деревьев // Химия растит. сырья. 1998. № 2. С. 17–23.

Ushanova V.M., Stepen' R.A., Repyakh S.M. Processing of Coniferous Wood Waste. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 1998, no. 2, pp. 17–23. (In Russ.).

56. Хамитов Р.С. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны кедровой сибирской: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2006. 18 с.

Khamitov R.S. *The Influence of Stimulants on Seed Germination and Growth of Siberian Cedar Pine Seedlings*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2006. 18 p. (In Russ.).

57. Хуришкainen Т.В. Выделение и исследование кислых компонентов липидов древесной зелени пихты (*Abies sibirica*) и ели (*Picea sibirica*): автореф. дис. ... канд. хим. наук. Сыктывкар, 2004. 24 с.

Khurshkainen T.V. *Isolation and Investigation of Acidic Components of Lipids of Woody Greenery of Fir (*Abies sibirica*) and Spruce (*Picea sibirica*)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Syktyvkar, 2004. 24 p. (In Russ.).

58. Хуришкainen Т.В., Андреева Е.М., Стеценко С.К., Терехов Г.Г., Кучин А.В. Влияние биопрепаратов Вэрва и Вэрва-ель на рост сеянцев сосны обыкновенной // Химия растит. сырья. 2019. № 1. С. 295–300.

Khurshkaynen T.V., Andreyeva E.M., Stetsenko S.K., Terekhov G.G., Kuchin A.V. Influence of Biopreparation Verva and Verva-Spruce on the Scots Pine Seedlings Growth. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2019, no. 1, pp. 295–300. (In Russ.).

<https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014248>

59. Хурикайнен Т.В., Терентьев В.И., Скрипова Н.Н., Никонова Н.Н., Королева А.А. Химический состав отходов переработки хвойного сырья // Химия растит. сырья. 2019. № 1. С. 233–239.

Hurshkainen T.V., Terentyev V.I., Skripova N.N., Nikonova N.N., Korolyova A.A. Chemical Composition of By-Products of Coniferous Raw Materials Processing. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2019, no. 1, pp. 233–239. (In Russ.).

<https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014264>

60. Чукичева И.Ю., Хурикайнен Т.В., Кучин А.В. Природные регуляторы роста растений из хвойного сырья // Инноватика и экспертиза. 2018. Вып. 3(24). С. 93–99.

Chukicheva I.Yu., Hurshkainen T.V., Kutchin A.V. Natural Plant Growth Regulators from Coniferous Raw Materials. *Innovatika i ekspertiza = Innovatics and Expert Examination*, 2018, iss. 3(24), pp. 93–99. (In Russ.).

61. Шibaева Т.Г., Шерудило Е.Г., Титов А.Ф. Экстракты морских водорослей как биостимуляторы растений // Тр. КарНЦ РАН. 2021. № 3. С. 36–67.

Shibaeva T.G., Sherudilo E.G., Titov A.F. Algal Extracts as Plant Growth Biostimulants. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 3, pp. 36–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb1383>

62. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А. Физиологическая активность биостимуляторов и эффективность их применения // Агрехимия. 2016. № 6. С. 72–94.

Yakhin O.I., Lubyanov A.A., Yakhin I.A. Physiological Activity of Biostimulants and Effectiveness of Their Application. *Agrokhimiya = Eurasian Soil Science*, 2016, no. 6, pp. 72–94. (In Russ.).

63. Atamian H.S., Harmer S.L. Circadian Regulation of Hormone Signaling and Plant Physiology. *Plant Molecular Biology*, 2016, vol. 91, pp. 691–702.

<https://doi.org/10.1007/s11103-016-0477-4>

64. Bancosi S., Nomura T., Sato T., Molnár G., Bishop G.J., Koncz C., Yokota T., Nagy F., Szekeres M. Regulation of Transcript Levels of the Arabidopsis Cytochrome P450 Genes Involved in Brassinosteroid Biosynthesis. *Plant Physiology*, 2002, vol. 130, iss. 1, pp. 504–513. <https://doi.org/10.1104/pp.005439>

65. Barnes A.D., Kelley W.D. Effects of a Triazole, Uniconazol, on Shoot Elongation and Root Growth in Loblolly Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, vol. 22, no. 1, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1139/x92-001>

66. Biostimulant Market: Trends, Forecast and Competitive Analysis. *Research and Markets: The World's Largest Market Research Store*, 2021. Available at: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5003421/biostimulant-market-trends-forecastand> (accessed 5.02.2021).

67. Boligłowa E., Gleń K. Assessment of Effective Microorganism Activity (EM) in Winter Wheat Protection against Fungal Diseases. *Ecological Chemistry and Engineering A*, 2008, vol. 15, no. 1–2, pp. 23–27.

68. Boukhari E.M.E.M., Barakate M., Bouhia Y., Lyamlouli K. Trends in Seaweed Extract Based Biostimulants: Manufacturing Process and Beneficial Effect on Soil-Plant Systems. *Plants*, 2020, vol. 9, no. 3, art. no. 359. <https://doi.org/10.3390/plants9030359>

69. Brady S.M., McCourt P. Hormone Cross-Talk in Seed Dormancy. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2003, vol. 22, pp. 25–31. <https://doi.org/10.1007/s00344-003-0018-7>

70. Calvo P., Nelson L., Kloepper J.W. Agricultural Uses of Plant Biostimulants. *Plant and Soil*, 2014, vol. 383, pp. 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>

71. Colombo S.J. Frost Hardening Spruce Container Stock for Overwintering in Ontario. *New Forests*, 1997, vol. 13, pp. 449–467. <https://doi.org/10.1023/A:1006571300025>

72. Colombo S.J., Menzies M.I., O'Reilly C. Influence of Nursery Cultural Practices on Cold Hardiness of Coniferous Forest Tree Seedlings. *Conifer Cold Hardiness. Tree Physiology*, Springer, Dordrecht, 2001, vol. 1, pp. 223–252.

https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_9

73. Craigie J.S. Seaweed Extract Stimuli in Plant Science and Agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 2011, vol. 23, pp. 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>

74. Derkowska E., Sas Paszt L., Harbuzov A., Sumorok B. Root Growth, Mycorrhizal Frequency and Soil Microorganisms in Strawberry as Affected by Biopreparations. *Advances in Microbiology*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 65–73. <https://doi.org/10.4236/aim.2015.51007>

75. Dormling I., Gustafsson Å., von Wettstein D. The Experimental Control of the Life Cycle in *Picea abies* (L.) Karst. I. Some Basic Experiments on the Vegetative Cycle. *Silvae Genetica*, 1968, vol. 17, pp. 44–64.

76. Du Jardin P. Plant Biostimulants: Definition, Concept, Main Categories and Regulation. *Scientia Horticulturae*, 2015, vol. 196, pp. 3–14.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>

77. European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 Laying Down Rules on the Making Available on the Market of EU Fertilising Products and Amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and Repealing Regulation (EC) No 2003/2003, 2019. 114 p.

78. Feurtado J.A., Yang J., Ambrose S.J., Cutler A.J., Abrams S.R., Kermode A.R. Disrupting Abscisic Acid Homeostasis in Western White Pine (*Pinus monticola* Dougl. ex D. Don) Seeds Induces Dormancy Termination and Changes in Abscisic Acid Catabolites. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, vol. 26, pp. 46–54.

<https://doi.org/10.1007/s00344-006-0035-4>

79. Fløistad I.S., Eldhuset T.D. Effect of Photoperiod and Fertilization on Shoot and Fine Root Growth in *Picea abies* Seedlings. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no.1, art. no. 1704.

<https://doi.org/10.14214/sf.1704>

80. Fløistad I.S., Granhus A. Timing and Duration of Short-Day Treatment Influence Morphology and Second Bud Flush in *Picea abies* Seedlings. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 3, art. no. 1009. <https://doi.org/10.14214/sf.1009>

81. Gawrońska H., Przybysz A. Biostymulatory: Mechanizmy Zastosowania i Przykłady Zastosowań. *Materiały konferencyjne TSW*. Warszawa, Agrosimex Sp. z o.o., 2011, pp. 7–13. (In Pol.).

82. Grossnickle S.C., Folk R.S. Abscisic Acid Analogs Reduce Planting Stress in Newly Planted Seedlings. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations*. USDA Forest Service General Technic Report RM-257, 1994, pp. 214–222.

83. Grossnickle S.C. Importance of Root Growth in Overcoming Planting Stress. *New Forest*, 2005, vol. 30, pp. 273–294. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-8303-2>

84. Grossnickle S.C. Why Seedlings Survive: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>

85. Guangwu Z., Xuwen J. Roles of Gibberellin and Auxin in Promoting Seed Germination and Seedling Vigor in *Pinus massoniana*. *Forest Science*, 2014, vol. 60, iss. 2, pp. 367–373. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-143>

86. Hamza B., Suggars A. Biostimulants: Myths and Realities. *TurfGrass Trends*, 2001, vol. 10, no. 8, pp. 6–10.

87. Ishikawa M., Robertson A.J., Gusta L.V. Comparison of Viability Tests for Assessing Cross-Adaptation to Freezing, Heat, and Salt Stresses Induced by Abscisic Acid in Bromegrass (*Bromus inermis* Leyss) Suspension Cultured Cells. *Plant Science*, 1995, vol. 107, iss. 1, pp. 83–93. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(95\)04100-9](https://doi.org/10.1016/0168-9452(95)04100-9)

88. Jayaraj J., Wan A., Rahman M., Punja Z.K. Seaweed Extract Reduces Foliar Fungal Diseases on Carrot. *Crop Protection*, 2008, vol. 27, iss. 10, pp. 1360–1366.

<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.05.005>

89. Jayaraman J., Norrie J., Punja Z.K. Commercial Extract from the Brown Seaweed *Ascophyllum nodosum* Reduces Fungal Diseases in Greenhouse Cucumber. *Journal of Applied Phycology*, 2011, vol. 23, pp. 353–361. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9547-1>
90. Johnson-Flanagan A.M., Owens J.N. Development of White Spruce (*Picea glauca*) Seedling Roots. *Canadian Journal of Botany*, 1985, vol. 63, no. 3, pp. 456–462. <https://doi.org/10.1139/b85-056>
91. Joubert J.M., Lefranc G. The Latest Research on Phytostimulants from Marine Algae. Two Types of Products – Growth and Nutrition Stimulants and Defense Response Stimulants. *Biostymulatory w Nowoczesnej Uprawie Roślin*. Warsaw, Wieś Jutra Publ., 2008. 88 p. (In Pol.).
92. Kabanova S.A., Musoni W., Zenkova Z.N., Danchenko M.A., Scott S.A., Kabanov A.N. Selection of Scots Pine Seedling Growth Stimulants in Extreme Conditions of the Northern Kazakhstan Steppe Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 611, art. no. 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012039>
93. Kaczmarek Z., Wolna-Maruwka A., Jakubus M. Zmiany Liczebności Wybranych Grup Drobnoustrojów Glebowych Oraz Aktywności Enzymatycznej w Glebie Inokulowanej Efektywnymi Mikroorganizmami (EM). *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2008, vol. 53, no. 3, pp. 122–127.
94. Khan M.A., Umm-e-Kalsoom, Khan M.I., Khan R., Khan S.A. Screening the Allelopathic Potential of Various Weeds. *Pakistan Journal of Weed Science Research*, 2011, vol. 17, iss. 1, pp. 73–81.
95. Khan W., Rayirath U.P., Subramanian S., Jithesh M.N., Rayorath P., Hodges D.M., Critchley A.T., Craigie J.S., Norrie J., Prithiviraj B. Seaweed Extracts as Biostimulants of Plant Growth and Development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2009, vol. 28, pp. 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
96. Kozłara W., Sulewska H., Panasiewicz K. Efekty Stosowania Stymulatorów Odporności w Wybranych Roślinach Rolniczych. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2006, vol. 51, no. 2, pp. 82–87. (In Pol.).
97. Liu Y., Müller K., El-Kassaby Y.A., Kermode A.R. Changes in Hormone Flux and Signaling in White Spruce (*Picea glauca*) Seeds during the Transition from Dormancy to Germination in Response to Temperature Cues. *BMC Plant Biology*, 2015, vol. 15, art. no. 292. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0638-7>
98. Liu Z.-L., Wang Q.C., Hao L.-F. Interspecific Allelopathic Effect of Different Organs' Aqueous Extracts of *Betula platyphylla* and *Larix olgensis* on Their Seed Germination and Seedling Growth. *The Journal of Applied Ecology*, 2011, vol. 22, pp. 3138–3144.
99. MacDonald J., Hacking J., Weng Y., Norrie J. Effects of *Ascophyllum nodosum* Extract Application in the Nursery on Root Growth of Containerized White Spruce Seedlings. *Canadian Journal of Plant Science*, 2013, vol. 93, no. 4, pp. 735–739. <https://doi.org/10.4141/cjps2012-268>
100. MacDonald J.E., Hacking J., Weng Y., Norrie J. Root Growth of Containerized Lodgepole Pine Seedlings in Response to *Ascophyllum nodosum* Extract Application during Nursery Culture. *Canadian Journal of Plant Science*, 2012, vol. 92, no. 6, pp. 1207–1212. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-279>
101. Maciejewski T., Szukała J., Jarosz A. Wpływ Biostymulatora Asahi SL i Atonik SL na Cechy Jakościowe Bulw Ziemniaków. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2007, vol. 52, no. 3, pp. 109–112.
102. Maomeri M., Abbasi Khalaki M., Tavili A. Effects of *Haloxylon Aphyllum* (Minkw.) Ljin Extract on Seeds Germination and Seedlings Growth of *Agropyron Elongatum* (Host.) and *Agropyron Desertorum* (Fisch.). *Research Journal of Seed Science*, 2011, vol. 4, iss. 1, pp. 40–50. <https://doi.org/10.3923/rjss.2011.40.50>
103. Matyjaszczyk E. Wprowadzanie Biostymulatorów do Obrotu Handlowego w Polsce. Sytuacja Bieżąca i Uwarunkowania Prawne. *Przemysł Chemiczny*, 2015, vol. 94, no. 10, pp. 1841–1844. (In Pol.). <https://doi.org/10.15199/62.2015.10.40>

104. McClung C.R. Comes a Time. *Current Opinion in Plant Biology*, 2008, vol. 11, iss. 5, pp. 514–520. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.06.010>
105. Michalak I., Chojnacka K. The Potential Usefulness of a New Generation of Agro-Products Based on Raw Materials of Biological Origin. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 2016, vol. 15, no. 6, pp. 97–120.
106. Miransari M., Smith D.L. Plant Hormones and Seed Germination. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, vol. 99, pp. 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.005>
107. Mugloo J.A., Mir N.A., Khan P.A., Perray G.N., Kaiser K.N. Effect of Different Pre-Sowing Treatments on Seed Germination of Spruce (*Picea smithiana* Wall. Boiss) Seeds under Temperate Conditions of Kashmir Himalayas, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 2017, vol. 6, iss. 11, pp. 3603–3612. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.422>
108. Neilly W., Shishkov L., Nickerson S., Titus D., Norrie J. Commercial Extract from the Brown Seaweed *Ascophyllum nodosum* (Acadian) Improves Early Establishment and Helps Resist Water Stress in Vegetable and Flower Seedlings. *HortScience*, 2010, vol. 45(8), pp. 105–106.
109. Nováková M., Motyka V., Dobrev P.I., Malbeck J., Gaudinová A., Vanková R. Diurnal Variation of Cytokinin, Auxin and Abscisic Acid Levels in Tobacco Leaves. *Journal of Experimental Botany*, 2005, vol. 56, iss. 421, pp. 2877–2883. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri282>
110. Orr S.P., Rudgers J.A., Clay K. Invasive Plants Can Inhibit Native Tree Seedlings: Testing Potential Allelopathic Mechanisms. *Plant Ecology*, 2005, vol. 181, pp. 153–165. <https://doi.org/10.1007/s11258-005-5698-6>
111. Ostroshenko V.Yu., Poleschuk V.A. Effectiveness of Growth Stimulants in the Cultivation of Korean Red Pine Seedlings (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.) in the Primorsky Krai Conditions. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 2020, vol. 11, no. 3, art. no. 11A03D. <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2020.44>
112. Panda D., Pramanik K., Nayak B.R. Use of Sea Weed Extracts as Plant Growth Regulators for Sustainable Agriculture. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 2012, vol. 3, no. Sep. 3, pp. 404–411.
113. Posmyk M.M., Szafrńska K. Biostimulators: A New Trend towards Solving an Old Problem. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, art. no. 748. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00748>
114. Prati D., Bossdorf O. Allelopathic Inhibition of Germination by *Alliaria petiolata* (Brassicaceae). *American Journal of Botany*, 2004, vol. 91, iss. 2, pp. 285–288. <https://doi.org/10.3732/ajb.91.2.285>
115. Schmidt R.E., Ervin E.H., Zhang X. Questions and Answers about Biostimulants. *Golf Course Manage*, 2003, vol. 71, pp. 91–94.
116. Shang Z.H., Xu S.G. Allelopathic Testing of *Pedicularis kansuensis* (Scrophulariaceae) on Seed Germination and Seedling Growth of Two Native Grasses in the Tibetan Plateau. *Phyton – International Journal of Experimental Botany*, 2012, vol. 81, pp. 75–79. <https://doi.org/10.32604/phyton.2012.81.075>
117. Sharma H.S.S., Fleming C., Selby C., Rao J.R., Martin T. Plant Biostimulants: A Review on the Processing of Macroalgae and Use of Extracts for Crop Management to Reduce Abiotic and Biotic Stresses. *Journal of Applied Phycology*, 2014, vol. 26, pp. 465–490. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0101-9>
118. Siddiqui S., Bhardwaj S., Shoukat S.K., Meghvanshi M.K. Allelopathic Effect of Different Concentration of Water Extract of *Prosopis Juliflora* Leaf on Seed Germination and Radicle Length of Wheat (*Triticum aestivum* Var-Lok-1). *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 2009, vol. 4(2), pp. 81–84.

119. Smith R.F., Hallett R.D. Inducing Dormancy in Black Spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) Seedlings with Paclobutrazol (Confer®). *Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Plant Growth Regulators Society of America, Workshop II: Control of Growth in Woody Plants*. California, Costa Mesa, 1999, pp. 147–151.

120. Stavang J.A., Lindgård B., Erntsen A., Lid S.E., Moe R., Olsen J.E. Thermoperiodic Stem Elongation Involves Transcriptional Regulation of Gibberellin Deactivation in Pea. *Plant Physiology*, 2005, vol. 138, iss. 4, pp. 2344–2353.

<https://doi.org/10.1104/pp.105.063149>

121. Thain S.C., Vandenbussche F., Laarhoven L.J.J., Dowson-Day M.J., Wang Z.-Y., Tobin E.M., Harren F.J.M., Millar A.J., Van Der Straeten D. Circadian Rhythms of Ethylene Emission in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 2004, vol. 136, iss. 3, pp. 3751–3761.

<https://doi.org/10.1104/pp.104.042523>

122. Tkaczyk M., Szmidla H., Sikora K. The Use of Biostimulants Containing *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis Algal Extract in the Cultivation and Protection of English Oak *Quercus robur* L. Seedlings in Forest Nurseries. *Sylwan*, 2022, vol. 166(4), pp. 244–252.

<https://doi.org/10.26202/sylwan.2022032>

123. Vaistij F.E., Barros-Galvão T., Cole A.F., Gilday A.D., He Z., Li Y., Harvey D., Larson T.R., Graham I.A. *MOTHER-OF-FT-AND-TFL1* Represses Seed Germination under Far-Red Light by Modulating Phytohormone Responses in *Arabidopsis thaliana*. *PNAS*, 2018, vol. 115(33), pp. 8442–8447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806460115>

124. Van den Driessche R. Paclobutrazol and Triadimefon Effects on Conifer Seedling Growth and Water Relations. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, vol. 20, no. 6, pp. 722–729. <https://doi.org/10.1139/x90-095>

125. Velho do Amaral L.I., Santos H.P., Rossatto D.R., Buckeridge M.S. Diurnal Changes in Storage Carbohydrate Metabolism in Cotyledons of the Tropical Tree *Hymenaea courbaril* L. (*Leguminosae*). *Brazilian Journal of Botany*, 2012, vol. 35, no. 4, pp. 347–355.

<https://doi.org/10.1590/S0100-84042012000400008>

126. Wally O.S.D., Crichley A.T., Hiltz D., Craigie J.S., Han X., Zaharia L.I., Abrams S.R., Prithiviraj B. Regulation of Phytohormone Biosynthesis and Accumulation in *Arabidopsis* Following Treatment with Commercial Extract from the Marine Macroalga *Ascophyllum nodosum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, vol. 32, pp. 324–339.

<https://doi.org/10.1007/s00344-012-9301-9>

127. Xu Y., Zhang Y., Li Y., Li G., Liu D., Zhao M., Cai N. Growth Promotion of Yunnan Pine Early Seedlings in Response to Foliar Application of IAA and IBA. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 6507–6520.

<https://doi.org/10.3390/ijms13056507>

128. Zhang X., Schmidt R.E., Ervin E.H., Doak S. Creeping Bentgrass Physiological Responses to Natural Plant Growth Regulators and Iron under Two Regimes. *HortScience*, 2002, vol. 37, iss. 6, pp. 898–902. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.6.898>

129. Zhang Y., Lu S., Gao H. Effects of Stratification and Hormone Treatments on Germination and Physio-Biochemical Properties of *Taxus chinensis* var. *mairei* Seed. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, vol. 3, no. 7, pp. 829–835.

<https://doi.org/10.4236/ajps.2012.37100>

130. Zhu M., Ma C., Wang Y., Zhang L., Wang H., Yuan Y., Du K. Effect of Extracts of Chinese Pine on its Own Seed Germination and Seedling Growth. *Frontiers of Agriculture in China*, 2009, vol. 3, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1007/s11703-009-0056-4>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 582.623.2:581.165.712:502.654

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-52-62

Влияние сроков черенкования на укореняемость черенков некоторых видов ивы в Норильском промышленном районе

Г.С. Вараксин¹✉, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

Н.Н. Чербакова², аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6337-6927>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачёва – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ Сибирского отделения РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; varaksings@mail.ru✉

²Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал ФИЦ КНЦ Сибирского отделения РАН, ул. Комсомольская, д. 1, г. Норильск, Россия, 663302; natalya.ochikolova@mail.ru

Поступила в редакцию 18.12.23 / Одобрена после рецензирования 17.03.24 / Принята к печати 19.03.24

Аннотация. Для создания ивовых насаждений в Норильском промышленном районе необходимо применять посадочный материал из наиболее устойчивых к техногенному воздействию местных видов ив (*Salix lanata* L., *S. hastata* L. и *S. viminalis* L.), используя способ черенкования. Получение наилучших результатов укоренения черенков в открытом и закрытом грунтах в условиях Норильского промышленного района возможно при соблюдении оптимальных сроков их срезания, которые должны совпадать с периодом готовности побегов материнского растения к образованию корней, а также при создании определенных условий для выращивания растений (температурно-влажностный и осветительный режимы, наличие питательной грунтосмеси, обработка черенков препаратом корнеобразования). Рассмотрены и определены сроки черенкования с учетом метеоусловий, фенофаз развития материнских растений и влияния перечисленных факторов на процесс укоренения. Оптимальными сроками можно считать периоды начиная с момента набухания почек и заканчивая вступлением маточных растений в фазу активного роста (с I декады июня по I декаду июля). Заготовка черенков видов рода *Salix* в это время способствовала успешности их укоренения и приживаемости. Высокие результаты укоренения в обоих типах грунта зафиксированы в 2023 г. у видов *S. viminalis* L. (51–87 %) и *S. hastata* L. (48–82 %) в период начала роста листьев и интенсивного развития растений; немного ниже, при тех же условиях, показатели у *S. lanata* L. (41–74 %). Важно подчеркнуть, что для изучаемых видов ив в ходе исследования не было выявлено существенных различий процесса укоренения черенков. Анализ результатов укореняемости черенков различных видов ивы позволяет прийти к выводу о целесообразности их дальнейшего использования в качестве посадочного материала в данной природной зоне. Полученные сведения могут послужить основой для разработки технологии выращивания черенковых саженцев ивы в арктических условиях и применены при планировании рекультивации и озеленения городских объектов в Норильском промышленном районе.

Ключевые слова: арктические условия, ивы, закрытый и открытый грунт, сроки черенкования, техногенно-нарушенные земли, укоренение черенков, Норильский промышленный район

Для цитирования: Вараксин Г.С., Чербакова Н.Н. Влияние сроков черенкования на укореняемость черенков некоторых видов ивы в Норильском промышленном районе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 52–62. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-52-62>

Original article

The Influence of the Cuttings Propagation Timing on the Rooting Ability of Cuttings of Some Willow Species in the Norilsk Industrial District

Gennadij S. Varaksin¹✉, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

Natal'ya N. Cherbakova², *Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6337-6927>*

¹Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; varaksings@mail.ru✉

²Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – Branch of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, ul. Komsomolskaya, 1, Norilsk, 663302, Russian Federation; natalya.ochikolova@mail.ru

Received on December 18, 2023 / Approved after reviewing on March 17, 2024 / Accepted on March 19, 2024

Abstract. To create willow plantations in the Norilsk Industrial District, it is necessary to use planting material from the most resistant to man-made impact local willow species (*Salix lanata* L., *S. hastata* L. and *S. viminalis* L.) using the cuttings method. Obtaining the best results of rooting cuttings in the open and covered ground in the conditions of the Norilsk Industrial District is possible if the optimal timing of their cutting is observed, which should coincide with the period of readiness of the shoots of the maternal plant to form roots, as well as when certain conditions are created for growing plants (temperature-humidity and lighting conditions, the presence of a nutrient soil mixture, treatment of cuttings with a rooting preparation). The timing of cuttings propagation is considered and determined taking into account weather conditions, phenophases of development of maternal plants and the influence of the listed factors on the rooting process. The optimal timing can be considered to be the periods starting from the moment of bud swelling and ending with the entry of maternal plants into the active growth phase (from the first 10 days of June till the first 10 days of July). Harvesting cuttings of species of the genus *Salix* at this time has contributed to the success of their rooting and survival. High rooting results in both types of ground have been recorded in 2023 for the species *S. viminalis* L. (51–87 %) and *S. hastata* L. (48–82 %) during the period of the beginning of leaf growth and intensive plant development; slightly lower, under the same conditions, have been the indicators for *S. lanata* L. (41–74 %). It is important to emphasize that for the studied willow species, no significant differences in the rooting process of cuttings have been identified. Analysis of the results of the rooting of cuttings of various willow species allows us to conclude that it is advisable to further use them as planting material in this natural area. The data obtained can serve as a basis for the development of a technology for growing willow cuttings in arctic conditions and be applied in the planning of reclamation and landscaping of urban facilities in the Norilsk Industrial District.

Keywords: arctic conditions, willows, open and covered ground, cuttings propagation timing, technogenically disturbed lands, rooting of cuttings, the Norilsk Industrial District

For citation: Varaksin G.S., Cherbakova N.N. The Influence of the Cuttings Propagation Timing on the Rooting Ability of Cuttings of Some Willow Species in the Norilsk Industrial District. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 52–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-52-62>

Введение

Для Норильского промышленного района (НПР) актуальной проблемой остается восстановление земель и растительного покрова, поврежденных вследствие негативного воздействия интенсивной промышленной деятельности [26, 30]. Один из эффективных способов решения данной проблемы – создание древесных насаждений из местных быстрорастущих растительных ресурсов – видов рода *Salix*, способных выдерживать суровые климатические условия, устойчивых к антропогенным нагрузкам и стремительно «реанимирующим» нарушенные территории [1, 4, 14–17, 35]. Накоплен значительный опыт использования ив в области биорекультивации техногенных ландшафтов [6, 12–17, 21–24, 31]. Черенкование – перспективный метод получения посадочного материала древесных растений, который применяется в различных почвенно-климатических условиях России [8, 10, 18, 19, 26, 34]. Исследования такого способа размножения растений показали, что поиск оптимального срока черенкования также является ключевым аспектом для успешности укоренения и приживаемости растений. Данный период зависит от анатомических и морфологических особенностей видов в различные фазы роста и развития материнских растений, которые характеризуются уникальным содержанием фитогормонов, влияющих на физиологические процессы, включая готовность стеблевых черенков к укоренению [32]. Благодаря правильно подобранным срокам черенкования можно ускоренно получить в большом количестве черенковые саженцы, идентичные материнским растениям.

Цель данного исследования – определение влияния сроков черенкования в зависимости от фазовых маточного растения на укоренение черенков ивы.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось с 25 мая по 5 сентября 2022–2023 гг. в условиях открытого и закрытого грунтов НПР. Объект исследования – черенки местных видов рода *Salix*. Черенковый материал собирался в питомнике Научно-исследовательского института сельского хозяйства и экологии Арктики Сибирского отделения РАН (г. Норильск), что обеспечивало высокую степень адаптации саженцев к местным почвенно-гидрологическим условиям. Применялись общепринятые в лесном хозяйстве методики [8, 10, 21]. Статистическая обработка данных [11] выполнялась с помощью компьютерной программы Excel. Для оценки достоверности результатов рассчитывался коэффициент изменчивости и значение критерия Стьюдента, применяемые в многофакторных опытах.

Заготовку черенков осуществляли с прямых, неповрежденных частей побегов маточных растений следующих видов ив: ивы шерстистой (*S. lanata* L.), ивы копьевидной (*S. hastata* L.) и ивы прутовидной (*S. viminalis* L.), – устойчивых к техногенному воздействию [7]. При этом учитывались результаты фенологических наблюдений за их ростом и развитием [5, 20, 27, 29]. Черенкование

осуществляли в различные фазы развития маточных растений: набухание почек (II–III декада мая), начало роста листьев (I декада июня), массовое распускание листьев (II–III декады июня), интенсивный рост растений (I–II декады июля), появление осенней раскраски (II декада августа) [28]. Испытания отобранных видов проводились в 5 вариантах, каждый из которых включал 3 повторности по 30 шт. Черенки заготавливали длиной 45 см и диаметром не менее 6 мм, с 2–3 вегетативными почками. Срезка проводилась в 1-й половине дня, при этом нижний срез выполнялся наклонно под самой почкой, поскольку именно в этом месте скапливаются питательные вещества и активно формируется каллюс, что в дальнейшем способствует интенсивному развитию корней (рис. 1). После срезки черенковый материал подвергался обработке стимулятором роста Гетероауксином в соответствии с инструкцией [9]. Черенки помещали на 24 ч в раствор стимулятора на глубину 3–5 см, в специально подготовленные пластиковые емкости. Температура рабочего раствора составляла 20 °С.



Рис. 1. Заготовка и обработка черенкового материала для закладки опытов

Fig. 1. Harvesting and treating the cuttings for the experiments

Обработанные черенки высаживались вертикально в вегетативные емкости, вместимостью 0,5 л в специальную питательную грунтовую смесь на основе органоминеральных ресурсов, широко распространенных на территории НПП [31]. Глубина посадки составляла 1/3 длины черенка с обязательным условием оставления не менее 2 почек над поверхностью грунтовой смеси. После посадки черенки обильно увлажняли, соблюдая определенный график и норму полива. За обработкой стимулятором роста следовала высадка материала в открытый грунт, в лунки на расстоянии 0,3×0,3 м друг от друга, после чего черенки также обильно поливали. Систематически вели наблюдения за процессом укоренения. Осмотр растений проводили на 3, 5, 7, 10, 15-й дни после посадки, также следили за развитием корней и распусканием ростовых почек, что являлось важным признаком дальнейшей приживаемости саженцев.

НПП находится в арктической зоне с субарктическим климатом, характеризующимся резкими континентальными условиями. Зима суровая и долгая, снежный покров устойчивый, лето относительно короткое и прохладное. Переходные сезоны, осень и особенно весна, очень непродолжительные. Среднегодовая температура воздуха равна –9,6 °С, в июле варьирует от 8 до 15 °С, достигая 35 °С, в январе – от –29 до –34 °С, с минимальным значением – –53 °С. Годовое количество осадков составляет около 400 мм. Снегопад начинается с конца сентября, а снежный покров сходит в последних числах мая – начале

июня, вскрытие рек наблюдается в то же время. Ветры в зимний период в основном юго-восточные и восточные, а в летний – северо-западные и юго-восточные, средняя скорость – 5,0 м/с, абсолютный максимум может достигать ~ 40 м/с [25]. Сезонная динамика метеофакторов вегетационного периода 2022–2023 гг. на основе [2] представлена в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Температура воздуха и количество осадков за вегетационный период 2022–2023 гг.
The air temperature and amount of precipitation for the growing season 2022–2023

Показатель	Месяц				
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Температура воздуха, °С: средняя фактическая за 2022 г.	1,8	13,5	15,6	11,6	2,7
средняя фактическая за 2023 г.	–2,0	8,5	15,6	15,5	5,4
среднемноголетняя (2001–2021 гг.)	–2,6	9,7	14,9	11,5	5,03
Количество осадков, мм: фактическое за 2022 г.	11,4	16,0	7,7	103,1	116,6
фактическое за 2023 г.	74,4	78,6	99,4	25,8	102,5
среднемноголетнее фактическое (2001–2021 гг.)	36,1	42,3	51,2	62,8	45,3

Таблица 2

Количество дней и ветра вегетационного периода 2022–2023 гг.
The number of days and winds of the growing season 2022–2023

Показатель	2022	2023	Среднее (фактическое)
Количество дней вегетационного периода	119	115	103
Преобладающие ветры в вегетационный период	3; СЗ	СЗ; ЮВ	СЗ; ЮВ

Анализ погодных условий в вегетационные периоды 2022–2023 гг. выявил значительные отклонения температуры воздуха в 2022 г., когда весна была ранняя, а осень оказалась холодной, распределение осадков в течение лета характеризовалось как неравномерное: в начале вегетации отмечался недостаток влаги, а в конце – избыток. В 2023 г. погодные условия благоприятствовали укоренению черенков, однако в первые дни вегетационного периода установилась прохладная и влажная погода. Позже температура воздуха соответствовала средним многолетним показателям, а количество осадков превышало среднюю многолетнюю норму более чем в 1,5 раза. Несмотря на их обилие, низкая температура в июне замедлила наступление фазы роста растений. Таким образом, собранные метеорологические данные для 2022–2023 гг. подтверждают особенности климата НПП с неравномерным распределением осадков и резкими колебаниями температуры воздуха, которые оказывают существенное влияние на изучаемые объекты, прежде всего на их укореняемость, а также дальнейший рост и развитие саженцев.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты укоренения черенков исследуемых видов ивы в условиях закрытого и открытого грунтов НПП приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средняя (с ошибкой) укореняемость черенков некоторых видов *Salix* в 2022–2023 гг. при заготовке в различные фенофазы развития маточных растений, %
 The average (with error) rooting ability of cuttings of some *Salix* species in 2022–2023 when harvested in different phenophases of development of maternal plants, %

Фаза развития маточного растения	2022 г.						2023 г.					
	открытый грунт			закрытый грунт			открытый грунт			закрытый грунт		
	<i>S. lanata</i> L.	<i>S. hastata</i> L.	<i>S. viminalis</i> L.	<i>S. lanata</i> L.	<i>S. hastata</i> L.	<i>S. viminalis</i> L.	<i>S. lanata</i> L.	<i>S. hastata</i> L.	<i>S. viminalis</i> L.	<i>S. lanata</i> L.	<i>S. hastata</i> L.	<i>S. viminalis</i> L.
Набухание почек	13±0,4	16±0,2	18±0,1	23±0,2	27±0,2	34±0,1	31±0,1	36±0,1	39±0,1	69±0,04	80±0,1	82±0,1
Начало роста листьев	21±0,1	23±0,2	26±0,1	54±0,1	60±0,1	68±0,04	32±0,1	34±0,1	39±0,1	74±0,04	81±0,03	87±0,01
Массовое распускание листьев	37±0,1	43±0,1	46±0,1	62±0,1	67±0,1	74±0,04	39±0,1	46±0,1	48±0,1	67±0,1	74±0,04	81±0,03
Интенсивный рост растения	4±0,6	6±0,5	12±0,2	83±0,03	87±0,01	89±0,03	41±0,1	48±0,1	51±0,1	70±0,1	82±0,1	83±0,03
Появление осенней раскраски листьев	32±0,1	34±0,2	36±0,1	39±0,1	46±0,2	48±0,1	30±0,0	36±0,1	36±0,1	32±0,1	34±0,1	36±0,1

Согласно данным табл. 3, оптимальные сроки черенкования для изучаемых видов ивы приходятся на начало роста листьев и активное развитие растений, в эти периоды было получено максимальное количество укоренившихся черенков. Высокие результаты в указанные фенофазы были зафиксированы для *S. viminalis* L. и *S. hastata* как в открытом, так и в закрытом грунте, в то время как у *S. lanata* L. при сопоставимых условиях выявлены немного более низкие показатели. Укоренение черенков, выполненное в период набухания почек и появления осенней раскраски, продемонстрировало ощутимо худшие результаты, особенно в условиях открытого грунта в 2022 г. Вероятной причиной могли стать погодные условия, оказавшие существенное влияние на укореняемость посадочного материала на этапе приживаемости, что подтверждается данными других исследователей [3, 12, 32–35].

У *S. viminalis* L. было достигнуто наибольшее укоренение черенков, составившее 89 % в фазе набухания почек в закрытом грунте и 51 % в период интенсивного развития маточных растений в открытом грунте. Лучшими сроками для черенкования *S. hastata* L. оказались этапы массового распускания листьев и активного роста маточных растений: укоренение черенков достигало 48 % в от-

крытом грунте и 87 % в закрытом грунте за время исследования. Установлены аналогичные закономерности процесса укоренения у *S. lanata* L. в сравнении с двумя другими видами. Наилучшие результаты для нее были получены в начале роста листьев и интенсивного развития растений – 83 % в закрытом грунте и 41 % в открытом грунте в 2023 г. Приведенные показатели могут свидетельствовать о приспособленности данных видов ивы к размножению черенками в арктических условиях.

На 2-м году исследования зафиксирована высокая степень укоренения черенков, заготовленных на протяжении всех фенологических стадий развития маточных растений, за исключением осенней раскраски листьев. Осенью у большинства растений замедляется активный рост побегов, что приводит к снижению процента успешного укоренения черенков [14]. Также были получены положительные результаты укоренения посадочного материала ивы в условиях открытого грунта этого года, что вероятно связано с благоприятными погодными условиями. Уровень укоренения достигал 20 % по сравнению с предыдущим годом исследования, что связано с изменениями абиотических факторов среды, в частности, режима влажности почвы в период приживаемости растений в условиях НПР. Кроме того, было отмечено значительное преимущество в результатах укоренения в закрытом грунте по сравнению с открытым, достигающее около 40 %. Полученные данные можно объяснить прежде всего условиями выращивания (микроклиматом): влажность воздуха в течение процесса укореняемости поддерживалась на уровне 70–85 %, а температура воздуха – в пределах 20–25 °С.

Черенки всех исследуемых видов ив продемонстрировали высокую способность к укоренению в закрытом грунте на протяжении почти всего цикла развития маточных растений и быстро формировали корни при соблюдении оптимальных условий выращивания (рис. 2).



Рис. 2. Корнеобразование черенков ивы в закрытом грунте

Fig. 2. The rooting of willow cuttings in closed ground

Заключение

В ходе работы установлено влияние сроков черенкования на успешное укоренение черенков видов рода *Salix*: *S. lanata* L., *S. hastata* L. и *S. viminalis* L. В условиях Норильского промышленного района оптимальными сроками черенкования, при которых происходит быстрое формирование корневой системы и успешная приживаемость саженцев ивы, являются периоды набухания почек в случае выращивания посадочного материала в условиях закрытого грунта, начала роста листьев и интенсивного развития маточных растений в

открытом и закрытом грунтах. При этом важно учитывать погодные условия, поскольку они могут существенно воздействовать на процесс укоренения. Для достижения наилучшего результата необходимо также принимались во внимание биологические особенности вида, наилучшее соотношение абиотических факторов и условия выращивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анциферов Г.И. Ива. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 101 с.
Antsiferov G.I. *Willow*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 101 p. (In Russ.).
2. Архив погоды в Норильске. Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Норильске (дата обращения: 04.04.25).
Weather Archive for Norilsk. (In Russ.).
3. Афонин А.А. Динамика развития побегов ивы трехтычинковой при разном атмосферном увлажнении // Лесоведение. 2023. № 1. С. 44–51.
Afonin A.A. Development Dynamics of the Almond Willow's Shoots on Different Levels Atmospheric Moisture. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2023, no. 1, pp. 44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114823010023>
4. Валягина-Малютина Е.Т. Ивы европейской части России: иллюстрир. пособ. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2004. 217 с.
Valyagina-Malyutina E.T. *Willows of the European part of Russia: Illustrated Guide*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2004. 217 p. (In Russ.).
5. Вараксин Г.С., Антоненко С.Н. Фенологические особенности кустарниковых видов ив в окрестностях г. Норильска // Материалы Всерос. конф., посвящ. 60-летию ин-та леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН и 70-летию образования Красноярск. края. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2004. 491 с.
Varaksin G.S., Antonenko S.N. Phenological Features of Shrubby Willow Species in the Vicinity of Norilsk. *Proceedings of the All-Russian Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the V.N. Sukachev Institute of Forest (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) and the 70th Anniversary of the Krasnoyarsk Region*. Krasnoyarsk, Institute of Forest (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), 2004. 491 p. (In Russ.).
6. Вараксин Г.С., Кузнецова Г.В. Особенности биологической рекультивации в Норильском промышленном районе // Сиб. лесн. журн. 2016. № 2. С. 92–101.
Varaksin G.S., Kuznesova G.V. Specifics of Biological Recultivation in Norilsk Industrial Region. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2016, no. 2, pp. 92–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20160209>
7. Вараксин Г.С., Кузнецова Г.В., Евграфова С.Ю., Шапченкова О.А. Опыт биологической рекультивации техногенных ландшафтов в Норильском промышленном районе // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 1039–1047.
Varaksin G.S., Kuznetsova G.V., Evgrafova S.Yu., Shapchenkova O.A. Biological Recultivation of Technogenic Landscapes in Norilsk Industrial Region. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*, 2014, no. 6, pp. 1039–1047. (In Russ.).
8. Вехов Н.К., Ильин М.П. Вегетативное размножение древесных растений летними черенками. Л.: ВИР, 1934. 284 с.
Vekhov N.K., Il'in M.P. *Vegetative Propagation of Woody Plants by Summer Cuttings*. Leningrad, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) Publ., 1934. 284 p. (In Russ.).
9. Гетероауксин: инструкция. Режим доступа: <https://edelstarus.ru/udobreniya/200-geteroauksin-instrukcija-po-primeneniju-stimuljatora-rosta-otzyvy-formula-sostav.html> (дата обращения: 27.03.25).
Heteroauxin: Instructions. (In Russ.).

10. Граница Ю.В., Соколова Н.А., Лежнин К.Т. Выращивание посадочного материала в древесном питомнике декоративных растений: курс лекций. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-т, 2012. 236 с.

Granitsa Yu.V., Sokolova N.A., Lezhnin K.T. *Growing Planting Material in a Tree Nursery of Ornamental Plants: Course of Lectures*. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2012. 236 p. (In Russ.).

11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Dospikhov B.A. *Field Experiment Methodology (with the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 351 p. (In Russ.).

12. Епанчинцева О.В., Тишкина Е.А., Монтиле А.А. Особенности роста и развития в первые годы выращивания различных таксонов рода *Salix* L. на урбанизированной территории Екатеринбурга // Вестн. Бурят. гос. с.-х. акад. им. В.П. Филиппова, 2021. № 3(64). С. 83–91.

Epanchintseva O.V., Tishkina E.A., Montile A.A. Features of Growth and Development in the First Years of Growing Various Taxa of Genus *Salix* L. in the Urbanized Territory of Ekaterinburg. *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii imeni V.P. Filippova* = Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov, 2021, no. 3(64), pp. 83–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.34655/bgsha.2021.64.3.011>

13. Захарова Л.А. Устойчивость видов рода *Salix* L. к аэротехногенному загрязнению атмосферы: дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 176 с.

Zakharova L.A. *Resistance of Species of the Genus Salix L. to Aerotechnogenic Atmospheric Pollution*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Novosibirsk, 2005. 176 p. (In Russ.).

14. Комиссаров Д.А. Биологические основы размножения древесных растений черенками. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 291 с.

Komissarov D.A. *Biological Principles of Propagation of Woody Plants by Cuttings*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 291 p. (In Russ.).

15. Кулагин А.Ю. Биологические особенности некоторых видов ив в техногенных местообитаниях Предуралья и Южного Урала: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 1983. 19 с.

Kulagin A.Yu. Biological Characteristics of Some Willow Species in Technogenic Habitats of the Cis-Urals and Southern Urals: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Tomsk, 1983. 19 p. (In Russ.).

16. Кулагин А.Ю. Ивы: техногенез и проблемы оптимизации нарушенных ландшафтов. Уфа: Гилем, 1998. 193 с.

Kulagin A.Yu. Willows: Technogenesis and Problems of Optimization of Disturbed Landscapes. Ufa, Gilem Publ., 1998. 193 p. (In Russ.).

17. Мартынова Н.А., Тохтарь В.К. Некоторые подходы к направленному подбору видов при создании устойчивых культурфитоценозов в антропогенно нарушенных экотопах // Науч. ведомости Белгородск. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2011. № 9(104). Вып. 15/1. С. 308–312.

Martynova N.A., Tokhtar' V.K. Some Approaches to Directed Selection of Species at Stable Agrophytocoenosis Creation in Anthropogenously Transformed Ecotopes. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* = Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences, 2011, no. 9(104), iss. 15/1, pp. 308–312. (In Russ.).

18. Морозов И.Р. Ивы СССР, их использование и применение в защитном лесоразведении. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 168 с.

Morozov I.R. *Willows of the USSR, Their Use and Application in Protective Afforestation*. Moscow – Leningrad. Goslesbumizdat, 1950. 168 p. (In Russ.).

19. Новицкая Г.Н. Черенкование кустарников // Цветоводство. 2013. № 1. С. 3–6. Novitskaya G.N. Cuttings of Shrubs. *Tsvetovodstvo* = Floriculture, 2013, no. 1, pp. 3–6. (In Russ.).

20. Пахов А.С. Фенология аллювиальных видов ив в условиях дельты реки Северной Двины // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития: тез. докл. Всерос. науч. конф. М.: ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2017. С. 408–409.

Pakhov A.S. Phenology of Alluvial Willow Species in the Conditions of the Northern Dvina River Delta. *Monitoring of the State and Pollution of the Environment. Main Results and Development Paths: Scientific Conference Abstracts of the All-Russian Scientific Conference*. Moscow, Federal State Budgetary Institution “Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology of the Roshydromet and the Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 408–409. (In Russ.).

21. Поликарпова Ф.Я., Пилюгина В.В. Выращивание посадочного материала зеленым черенкованием. М.: Росагропромиздат, 1991. 96 с.

Polikarpova F.Ya., Pilyugina V.V. *Growing Planting Material by Green Cuttings*. Moscow, Rosagropromizdat Publ., 1991. 96 p. (In Russ.).

22. Поляков А.А. Лесная рекультивация земель Таймыра и Норильского промышленного района как компонент биологической рекультивации // Биологические ресурсы Таймыра и перспективы их использования: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: сб. науч. тр. СПб.: Астерион, 2003. С. 183–186.

Polyakov A.A. Forest Reclamation of Lands in Taimyr and Norilsk Industrial Region as a Component of Biological Reclamation. *Biological Resources of Taimyr and Prospects for Their Use: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference.: Collection of Scientific Papers*. St. Petersburg, Asterion Publ., 2003, pp. 183–186. (In Russ.).

23. Поляков А.П. Полезащитные лесные полосы на Ямальской сельскохозяйственной опытной станции: бюл. НТИ. Л.: НИИСХ Крайнего Севера, 1957. № 2. С. 44–46.

Polyakov A.P. Shelterbelts at the Yamal Agricultural Experimental Station: *Bulletin of NTI*. Leningrad, Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic, 1957, no. 2, pp. 44–46. (In Russ.).

24. Поспелова Е.Б., Поспелов И.Н. Флора сосудистых растений Таймыра и сопредельных территорий. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2007. Ч. 1. 457 с.

Pospelova E.B., Pospelov I.N. *Flora of Vascular Plants of Taimyr and Adjacent Territories*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2007, part 1. 457 p. (In Russ.).

25. Савченко В.А., Новицкий М.А. Современный климат Норильска. М.: ГАРТ, 2003. 168 с.

Savchenko V.A., Novitskij M.A. *Modern Climate of Norilsk*. Moscow, GART Publ., 2003. 168 p. (In Russ.).

26. Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А. Негативное воздействие воздушных выбросов предприятий г. Норильска на растительность тундры и лесотундры // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 903–922.

Telyatnikov M.Yu., Pristyazhnyuk S.A. Anthropogenous Influence of Norilsk Industrial Area on Plant Vegetation Cover of the Tundra and Forest Tundra. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2014, vol. 7, pp. 654–668.

<https://doi.org/10.1134/S1995425514060158>

27. Турецкая Р.Х., Поликарпова Ф.Я. Вегетативное размножение растений с применением стимуляторов роста. М.: Наука, 1968. 290 с.

Turetskaya R.Kh., Polikarpova F.Ya. *Vegetative Propagation of Plants using Growth Stimulants*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 290 p. (In Russ.).

28. Чербакова Н.Н., Вараксин Г.С. Сроки черенкования некоторых видов ивы в Норильском промышленном районе // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений: материалы XXVI Междунар. науч. конф. 2023. С. 207–211.

Cherbakova N.N., Varaksin G.S. Timing of Cuttings of Some Willow Species in the Norilsk Industrial Region. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rastenij: Materialy XXVI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii* = Gardening, Seed Growing, Intro-

duction of Woody Plants: Materials of the XXVI International Scientific Conference, 2023, pp. 207–211. (In Russ.).

29. Чербакова Н.Н., Вараксин Г.С. Характеристика рода *Salix* и особенности фенологического развития некоторых видов в Норильском промышленном районе // Хвойные бореал. зоны. 2024. XLII, № 1. С. 43–50.

Cherbakova N.N., Varaksin G.S. Characterization of the Genus *Salix* and Peculiarities of Phenological Development of Some Species in the Norilsk Industrial Region. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the boreal area, 2024, vol. XLII, no. 1, pp. 43–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-1-43-50>

30. Чупрова И.Л. Оптимизация техногенных ландшафтов Крайнего Севера (Норильский промышленный район, п-ов Таймыр): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Петрозаводск, 2006. 59 с.

Chuprova I.L. *Optimization of Technogenic Landscapes of the Far North (Norilsk Industrial Region, Taimyr Peninsula)*: doc. biol. sci. diss. abs. Petrozavodsk, 2006. 59 p. (In Russ.).

31. Янченко З.А., Чербакова Н.Н. Оценка органоминеральных ресурсов рекультивации Таймыра // Наука и технологии Сибири. 2024. № 4(15). С. 108–110.

Yanchenko Z.A., Cherbakova N.N. Assessment of Organomineral Resources for the Reclamation of Taimyr. *Nauka i tekhnologii Sibiri*, 2024, no. 4(15), pp. 108–110. (In Russ.).

32. Haissig B.E. Influences of Auxins and Auxin Synergists on Adventitious Root Primordium Initiation and Development. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1974, vol. 4, no. 2, pp. 311–323.

33. Harayama H., Uemura A., Utsugi H., Han Q., Kitao M., Maruyama Y., The Effects of Weather, Harvest Frequency, and Rotation Number on Yield of Short Rotation Coppice Willow over 10 Years in Northern Japan. *Biomass and Bioenergy*, 2020, vol. 142, art. no. 105797. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105797>

34. Keita N., Bourgeois B., Evette A., Tisserant M., González E., Breton V., Goulet C., Poulin M. Growth Response of Cuttings to Drought and Intermittent Flooding for Three *Salix* Species and Implications for Riverbank Soil Bioengineering. *Environmental Management*, 2021, vol. 67, pp. 1137–1144. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01444-3>

35. Ma X., Pang Z., Wu J., Zhang G., Dai Y., Zou J., Kan H. Seasonal Pattern of Stem Radial Growth of *Salix matsudana* and its Response to Climatic and Soil Factors in a Semi-Arid Area of North China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, vol. 28, art. no. e01701. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01701>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 635.92:632.937.31:582.477.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-63-77

Пигментный состав хвои биоты восточной (*Platycladus orientalis* (L.) Franco) при интродукции в условиях России и Казахстана

Н.Н. Бессчетнова¹, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

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

В.П. Бессчетнов^{1✉}, *д-р биол. наук*; *ResearcherID*: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

Б.А. Кентбаева², *д-р биол. наук*; *ResearcherID*: [G-8228-2019](https://orcid.org/0000-0003-0969-9754),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0969-9754>

Е.Ж. Кентбаев², *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [G-7677-2019](https://orcid.org/0000-0002-3308-1287),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3308-1287>

Н.А. Бабич³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

¹Нижегородский государственный агротехнологический университет, д. 97, просп. Гагарина, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru✉

²Казахский национальный аграрный исследовательский университет, просп. Абая, д. 8, г. Алматы, Республика Казахстан, 050050; kentbayeva@mail.ru, kentbayev@mail.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; forest@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.11.23 / Одобрена после рецензирования 03.02.24 / Принята к печати 06.02.24

Аннотация. Изучен пигментный состав листового аппарата биоты восточной (*Platycladus orientalis* (L.) Franco) при интродукции на территорию Российской Федерации (Нижегородская область) и Республики Казахстан (Алматинская область). Актуальность работы обусловлена потребностью в совершенствовании ассортимента городских зеленых насаждений. Биота восточная весьма востребована в данном контексте. Объектом исследования служили ее одновозрастные особи семенного происхождения, высаженные на участках с координатами 56°14'30" с. ш. 43°57'16" в. д. (Россия) и 43°14'31" с. ш. 76°57'7" в. д. (Казахстан), таким образом разница по географической широте составила 12°59'59", по долготе – 33°0'51". Предметом исследования выступала территориальная изменчивость содержания и соотношения пластидных пигментов 1-летней хвои, одновременно отобранной в указанных локациях. В работе использован спектрофотометрический метод. Установили реакцию пигментного состава хвои на изменения условий произрастания интродуцентов на территориально разобнесенных участках. Содержание хлорофиллов неодинаково и в казахстанской локации выше, чем в российской. Концентрация каротиноидов различалась в меньшей степени и в казахстанской локации (0,30±0,016 мг/г) оказалась ниже, чем в российской (0,34±0,006 мг/г). Однофакторный дисперсионный анализ выявил существенную разницу в пигментном составе хвои особей биоты. Коэффициент наследуемости на казахстанском участке составил от 32,50±13,50 % по содержанию каротиноидов до 69,30±6,14 % по доле хлорофилла-*b* в общем пигментном составе; на российском – от 40,64±11,87 % по содержанию каротиноидов до 79,59±4,08 % по отношению содержания каротиноидов к суммарному содержанию хлорофиллов. Двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил стати-

© Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кентбаева Б.А., Кентбаев Е.Ж., Бабич Н.А., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

стическую значимость дифференцирующего влияния различий в лесорастительных условиях мест расселения интродуцентов на формирование общего фона фенотипической дисперсии показателей пигментного состава их хвои. Наибольшие оценки указанного эффекта ($85,25 \pm 0,37$ %) достигнуты по доле хлорофилла-*b* в пигментном составе, наименьшие ($9,19 \pm 2,27$ %) – по содержанию каротиноидов. Влияние индивидуальной изменчивости особей на каждом из участков меньше, а ее оценки чаще не получали статистического подтверждения: от $4,61 \pm 9,54$ % (доля хлорофилла-*a* в общем пигментном составе) до $27,83 \pm 7,22$ % (содержание хлорофилла-*a*). Изменения условий местопрорастания особей биоты, связанные с размещением на разных участках, вызвали снижение концентрации хлорофиллов и повышение содержания каротиноидов в их хвое на российской локации.

Ключевые слова: биота восточная, интродукция, хвоя, пигментный состав, хлорофилл-*a*, хлорофилл-*b*, каротиноиды, дисперсионный анализ

Для цитирования: Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кентбаева Б.А., Кентбаев Е.Ж., Бабич Н.А. Пигментный состав хвои биоты восточной (*Platycladus orientalis* (L.) Franco) при интродукции в условиях России и Казахстана // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 63–77. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-63-77>

Original article

The Pigment Composition of the Needles of *Platycladus orientalis* (L.) Franco during its Introduction in the Conditions of Russia and Kazakhstan

Natalia N. Besschetnova¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

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

Vladimir P. Besschetnov², Doctor of Biology; ResearcherID: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

Botagoz A. Kentbaeva², Doctor of Biology; ResearcherID: [G-8228-2019](https://orcid.org/0000-0003-0969-9754),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0969-9754>

Erzhan J. Kentbaev³, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [G-7677-2019](https://orcid.org/0000-0002-3308-1287),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3308-1287>

Nikolay A. Babich³, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru

²Kazakh National Agrarian Research University, prosp. Abaya, 8, Almaty, 050050, Republic of Kazakhstan; kentbayeva@mail.ru, kentbayev@mail.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; forest@narfu.ru

Received on November 10, 2023 / Approved after reviewing on February 3, 2024 / Accepted on February 6, 2024

Abstract. The pigment composition of the leaf apparatus of the *Platycladus orientalis* (L.) Franco has been studied during its introduction to the territory of the Russian Federation (the Nizhny Novgorod Region) and the Republic of Kazakhstan (the Almaty Region). The relevance of the work is determined by the need to improve the range of urban green spaces. *Platycladus orientalis* (L.) Franco is in high demand in this context. The object of the study has

been its same-aged individuals of seed origin, planted in areas with coordinates 56°14'30" N 43°57'16" E (Russia) and 43°14'31" N, 76°57'7" E (Kazakhstan), thus the difference in geographical latitude has been 12°59'59" N, and in longitude – 33°0'51" E. The subject of the study has been the territorial variability of the content and ratio of plastid pigments of 1-year-old needles simultaneously sampled in the specified locations. The spectrophotometric method has been used in the work. The reaction of the pigment composition of the needles to changes in the growth conditions of introduced species in geographically separated areas has been established. The chlorophyll content varies and is higher in the Kazakh location than in the Russian one. The concentration of carotenoids has varied to a lesser extent, and in the Kazakh location (0.30 ± 0.016 mg/g) it has been lower than in the Russian one (0.34 ± 0.006 mg/g). One-way ANOVA has revealed a significant difference in the pigment composition of the needles of biota individuals. The coefficient of heritability in the Kazakh site has ranged from 32.50 ± 13.50 % for the carotenoid content to 69.30 ± 6.14 % for the proportion of chlorophyll-*b* in the total pigment composition; in the Russian site – from 40.64 ± 11.87 % for the carotenoid content to 79.59 ± 4.08 % for the ratio of the carotenoid content to the total chlorophyll content. Two-way ANOVA has confirmed the statistical significance of the differentiating effect of differences in forest growth conditions of the sites of settlement of introduced species on the formation of the general background of phenotypic dispersion of the pigment composition of their needles. The highest estimates of the indicated effect (85.25 ± 0.37 %) have been achieved for the proportion of chlorophyll-*b* in the pigment composition, the lowest (9.19 ± 2.27 %) – for the content of carotenoids. The influence of individual variability of individuals in each of the sites is less, and its estimates have more often not been statistically confirmed: from 4.61 ± 9.54 % (the proportion of chlorophyll-*a* in the total pigment composition) to 27.83 ± 7.22 % (the content of chlorophyll-*a*). Changes in the growth conditions of biota individuals associated with their placement in different areas have caused a decrease in the concentration of chlorophylls and an increase in the content of carotenoids in their needles in the Russian location.

Keywords: *Platycladus orientalis* (L.) Franco, introduction, needles, pigment composition, chlorophyll-*a*, chlorophyll-*b*, carotenoids, analysis of variance

For citation: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaeva B.A., Kentbaev E.J., Babich N.A. The Pigment Composition of the Needles of *Platycladus orientalis* (L.) Franco during its Introduction in the Conditions of Russia and Kazakhstan. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 63–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-63-77>

Введение

Потребность в оптимизации напряженной экологической обстановки в границах урбанизированных территорий, параметры которой часто заметно отклоняются от норм комфортности, не ослабевает. В настоящее время проблема приобрела глобальный характер, затронула многие государства на постсоветском пространстве, включая Российскую Федерацию и Республику Казахстан. В арсенале средств борьбы с негативными последствиями проявления данной проблемы неизменно присутствует постепенная интеграция объектов и систем озеленения в элементы городских ландшафтов. Расширение и совершенствование ассортимента создаваемых при этом искусственных насаждений во многом предопределяет повышение их продуктивности, устойчивости и долговечности, а также обуславливает возможность наиболее полного достижения целей использования таких насаждений. Нередко для этого требуется активное привлечение видов инорайонной дендрофлоры, способных эффективно выполнять свои санитарно-гигиенические, декоративно-эстетические и рекреационно-бальнеологические функции в лесорастительных условиях но-

вых мест расселения [4, 5, 8]. В данный список с полным основанием можно включить биоту восточную (*Platycladus orientalis* (L.) Franco), природный ареал которой охватывает территорию Китая и Южной Кореи [18, 30, 36, 37]. Здесь она приурочена к горным местностям и предгорьям [24, 30, 32, 33], используется в плантационном [19, 24, 35, 37] и лесном [20, 26] хозяйстве, паркостроении и озеленении населенных мест [12, 13, 15]. Заметное утилитарное значение обуславливает ее многоплановое изучение [15, 17], включая географическую изменчивость и селекцию [15, 17, 25]. В систематическом плане это растение относится к монотипному роду семейства Кипарисовые (Cupressaceae Gray) и габитуально представляет собой дерево или крупный кустарник [12, 18, 36]. В странах СНГ и Евразийского экономического союза является интродуцентом [7]. Обширный перечень вопросов, связанных с практическим применением вида в указанном регионе, пока еще освещен в научной литературе недостаточно. Одной из причин, сдерживающих широкое распространение здесь данного экзота, является отсутствие достаточного объема сведений об особенностях его физиологии и других биологических аспектах, определяющих резистентность, адаптированность, репродуктивный потенциал и прочие характеристики растений.

Цель исследования – установить пигментный состав хвои биоты восточной при ее интродукции в Нижегородскую (Россия) и Алматинскую (Казахстан) области.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служили одновозрастные (биологический возраст – 7 лет) особи биоты восточной семенного происхождения. Они были одновременно высажены в интродукционно-коллекционные участки Нижегородского государственного агротехнологического университета (Россия) и Казахского национального аграрного исследовательского университета (Казахстан). Их координаты 56°14'30" с. ш. 43°57'16" в. д. и 43°14'31" с. ш. 76°57'7" в. д., а абсолютная высота – 141 и 872 м над ур. м. соответственно. Такое географическое позиционирование сформировало вектор территориального перемещения в 12°59'59" с. ш. 33°0'51" в. д. и интервал высот в 731 м. Предметом исследования выступала географическая изменчивость содержания и соотношения пластидных пигментов в 1-летней хвое, одновременно отобранной в каждой из указанных локаций.

Методологический подход, принятый в работе, обеспечил соблюдение принципа единственного логического различия, согласно которому для каждого из опытных участков определены единые схемы рендомизированного расположения растений, одинаковая агротехника их выращивания, однотипный исходный материал (2-летние сеянцы). Для устранения возможного влияния разных экологических факторов сравнение расположенных на отдельном опытном участке объектов осуществлялось только в пределах его границ при выровненном микрорельефе и гомогенизированных почвенных характеристиках. В целях элиминации воздействия фактора времени, вызывающего возникновение хронографической изменчивости, все побеги для последующих лабораторных исследований отбирали одновременно (25 ноября 2023 г.) с участков на территории Республики Казахстан и Российской Федерации. Таким методиче-

ским приемом обеспечивалось одинаковое физиологическое состояние побегов, которое на момент учета фиксировалось в фазе перехода к зимнему покою. Отбор биологических образцов осуществляли из периферии среднего яруса хорошо освещенной части кроны. При этом в формируемую выборку не включали приросты, поврежденные вследствие воздействия биотических или абиотических факторов, или с отклонениями от нормального развития. На опытных участках (варианты опыта) обследовано по 5 типичных растений (повторности). С каждого из них отобрано по 5 побегов, послуживших источниками хвои для лабораторного анализа. Полученный биоматериал изучали по широкому спектру характеристик пигментного состава листового аппарата растений (табл. 1).

Таблица 1

Показатели пигментного состава хвои саженцев биоты восточной
The indicators of the pigment composition of the needles
of *Platycladus orientalis* (L.) Franco seedlings

Категория показателей	Признак	Условное обозначение
Оценки раздельного содержания пластидных пигментов	Содержание хлорофилла- <i>a</i>	Признак 1
	Содержание хлорофилла- <i>b</i>	Признак 2
	Содержание недифференцированных каротиноидов	Признак 3
Оценки суммарного содержания пигментов	Сумма содержания хлорофилла- <i>a</i> и хлорофилла- <i>b</i>	Признак 4
	Суммарное содержание пластидных пигментов	Признак 5
Показатели соотношения в содержании пластидных пигментов	Отношение содержания хлорофилла- <i>a</i> к содержанию хлорофилла- <i>b</i>	Признак 6
	Отношение содержания хлорофилла- <i>a</i> к содержанию недифференцированных каротиноидов	Признак 7
	Отношение содержания хлорофилла- <i>b</i> к содержанию недифференцированных каротиноидов	Признак 8
	Отношение содержания каротиноидов к суммарному содержанию хлорофилла- <i>a</i> и хлорофилла- <i>b</i>	Признак 9
Доля пластидных пигментов в их общем составе	Доля хлорофилла- <i>a</i> в общем пигментном составе	Признак 10
	Доля хлорофилла- <i>b</i> в общем пигментном составе	Признак 11
	Доля каротиноидов в общем пигментном составе	Признак 12

Теоретическая платформа анализа пигментного комплекса хвои была представлена классическими работами [21–23, 27–29, 31, 34]. Инструментом исследования служил спектрофотометр СФ-2000 с программным обеспечением GRASS GIS 7.6.1 / QGIS 3.4. С его помощью фиксировали максимумы поглощения хлорофилла-*a*, хлорофилла-*b* и каротиноидов, для чего выбирали длины волн 665, 649 и 452,5 нм соответственно. Учитывая возможность смещения указанных максимумов под влиянием оптических свойств используемого экстрагента [10, 11, 22, 27], параллельно сканировали его тест-контроль-

ный образец. Концентрацию указанных веществ сырой массы хвои вычисляли по уравнениям Ветштейна и Хольма для 96%-го этанола [21, 22, 27, 34]. Массу рабочей навески устанавливали на аналитических весах Acculab Vison VIC-300d3 с точностью до 0,001 г. Такая же навеска готовилась по каждому образцу для определения в ней доли абсолютно сухого вещества после высушивания в шкафах HS 61 А. Первичная единица выборки представлена разовым учетом каждого из анализируемых показателей по вариантам и повторностям опыта. Их число по отдельному признаку составило 50 ед.; всего в базе данных – 600 ед. Наряду с информацией о непосредственном содержании пластидных пигментов использовали расчетные значения, что широко принято в лесоводственных [2, 9, 16, 32] и биологических [6, 14] исследованиях, в т. ч. при изучении пигментного состава фотосинтезирующего аппарата [1, 3, 21, 28]. Статистический и дисперсионный анализ выполнены по общепринятым методическим схемам.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследованные особи биоты восточной с разных опытных участков проявили заметную фенотипическую неоднородность в содержании и соотношении фотосинтетических пигментов. Такая ситуация зафиксирована по всем анализируемым признакам как в географическом масштабе между сравниваемыми локациями (Казахстан и Россия), так и на уровне индивидуальной изменчивости в пределах каждой из них. Как можно видеть на рис. 1, содержание хлорофилла-а в хвое биоты восточной на разных участках неодинаково, и на момент учета обобщенные оценки казахстанской локации ($Total_1 = 0,88 \pm 0,012$ мг/г) были несколько выше, чем в российской ($Total_2 = 0,81 \pm 0,019$ мг/г). Такое соотношение создало превышение первой над второй в 1,08 раза, или на 0,063 мг/г. При том, что по величине диапазоны лимитов рассматриваемого показателя ($\Delta_{lim} = \max - \min$) различались незначительно – 0,32 мг/г (казахстанская локация) и 0,38 мг/г (российская), – по границам они заметно не совпадали: 0,79...1,12 мг/г в первом случае и 0,64...1,02 мг/г – во втором. Обобщенное по 2 участкам значение ($Total_0$) составило $0,85 \pm 0,012$ мг/г.

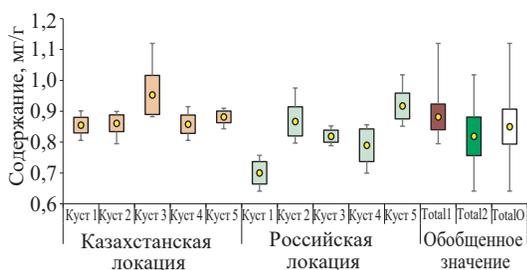


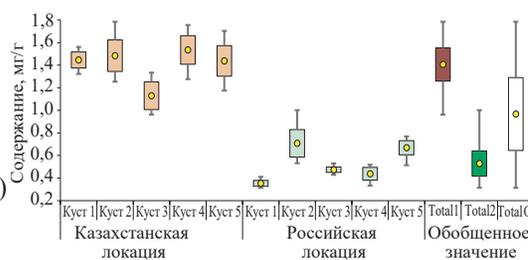
Рис. 1. Содержание хлорофилла-а в хвое биоты восточной (точками обозначены средние значения, «коробками» – границы нормы, «усами» – лимиты)

Fig. 1. The chlorophyll-a content in the needles of *Platycladus orientalis* (L.) Franco (the dots indicate the average values, the “boxes” – the limits of the norm, the “whiskers” – the limits)

Не менее значимая характеристика пигментного состава – содержание хлорофилла-*b* – также подвержена изменчивости (рис. 2). Ее обобщенные значения на казахстанском и российском опытных участках соответственно составили: $1,410 \pm 0,044$ и $0,528 \pm 0,034$ мг/г. Можно отметить различия между ними в 2,66 раза, или на 0,878 мг/г, что больше по сравнению с различиями в содержании хлорофилла-а. Соотношения лимитов изменились столь же значительно. Диапазоны достигли уровня 0,82 и 0,69 мг/г, заметно различаясь по величине и в еще большей мере – по границам: 0,96...1,78 и 0,31...1,00 соответственно.

Рис. 2. Содержание хлорофилла-*b* в хвое биоты восточной (условные обозначения – см. рис. 1)

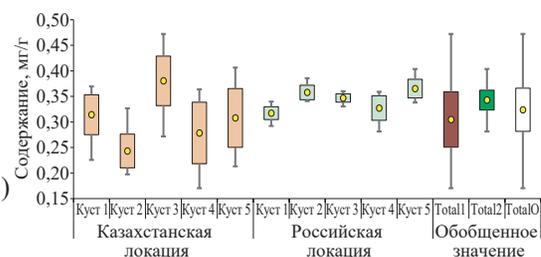
Fig. 2. The chlorophyll-*b* content in the needles of *Platycladus orientalis* (L.) Franco (for the legend see Fig. 1)



Концентрация каротиноидов в хвое биоты восточной (рис. 3) различалась в меньшей степени, чем показатели хлорофилла. Кроме того, обобщенные средние значения для казахстанской локации ($0,30 \pm 0,016$ мг/г) в данном случае были несколько ниже по сравнению с российской ($0,34 \pm 0,006$ мг/г). Их сопоставление обнаружило разницу в 1,12 раза, или на 0,019 мг/г. Иначе вели себя и показатели изменчивости: характеристики российской опытной группы в оценках по среднеквадратическому отклонению и лимитам выглядели более стабильно. Так, абсолютный диапазон казахстанской группы учетных растений ($\Delta_{lim1} = 0,302$ мг/г) в 2,47 раза, или на 0,180 мг/г, превосходил аналогичный показатель российской группы ($\Delta_{lim2} = 0,122$ мг/г).

Рис. 3. Содержание каротиноидов в хвое биоты восточной (условные обозначения – см. рис. 1)

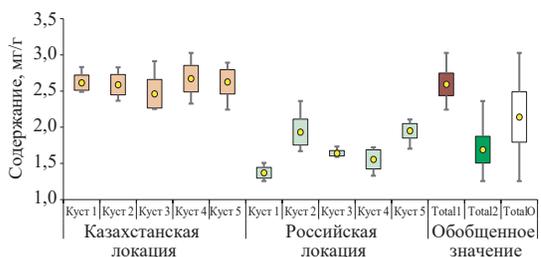
Fig. 3. The content of carotenoids in the needles of *Platycladus orientalis* (L.) Franco (for the legend see Fig. 1)



Наиболее информативным параметром в силу своего интегрального характера выступало суммарное содержание пластидных пигментов в тканях 1-летней хвои исследуемых растений (рис. 4). Различия в средних значениях данного параметра оказались наиболее контрастными, и в казахстанской локации ($2,59 \pm 0,047$ мг/г) они были в 1,53 раза, или на 0,903 мг/г выше, чем в российской ($1,69 \pm 0,055$ мг/г). При этом указанные статистики в первом случае более стабильны по сравнению со вторым. Разброс их лимитов ($\Delta_{lim1} = 0,785$ мг/г и $\Delta_{lim2} = 1,107$ мг/г) в полной мере отражал указанную тенденцию: в казахстанской части опыта зафиксирована величина меньше в 1,41 раза, или на 0,322 мг/г.

Рис. 4. Суммарное содержание пигментов в хвое биоты восточной (условные обозначения – см. рис. 1)

Fig. 4. The total pigment content in the needles of *Platycladus orientalis* (L.) Franco (for the legend see Fig. 1)



По остальным характеристикам пигментного состава, таким как отношение или доля содержания, сформировались свойственные им картины распределения и соотношения основных описательных статистик. Поскольку все отмеченные различия между особями возникли на фоне выровненных на каждом опытном участке условий местопроизрастания, то можно признать, что они в

той или иной мере обусловлены наследственными причинами, связанными с особенностями генотипов исследуемых растений. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил это предположение (табл. 2).

Таблица 2

Существенность различий между особями биоты восточной по содержанию и балансу пластидных пигментов в казахстанской и российской локациях опыта
The significance of differences between the individuals of *Platyclusus orientalis* (L.) Franco in terms of the content and balance of plastid pigments in the Kazakh and Russian experimental locations

Признак	Критерий Фишера F_{on}	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)						Критерии различий	
		по Плохинскому			по Снедекору				
		h^2	$\pm s_h^2$	F_h^2	h^2	$\pm s_h^2$	F_h^2	HCP ₀₅	D ₀₅
<i>Казахстанская локация</i>									
Признак 1	2,84	0,3620	0,1276	2,838	0,2687	0,1463	1,838	0,071	0,103
Признак 2	3,82	0,4331	0,1134	3,820	0,3606	0,1279	2,820	0,238	0,343
Признак 3	2,41	0,3250	0,1350	2,407	0,2196	0,1561	1,407	0,095	0,137
Признак 4	1,87	0,2724	0,1455	1,872	0,1484	0,1703	0,872	0,256	0,369
Признак 5	0,52	0,0950	0,1810	0,525	-0,1050	0,2210	-0,475	0,317	0,456
Признак 6	9,34	0,6513	0,0697	9,338	0,6251	0,0750	8,338	0,114	0,164
Признак 7	1,48	0,2286	0,1543	1,481	0,0878	0,1824	0,481	1,030	1,482
Признак 8	5,20	0,5098	0,0980	5,199	0,4565	0,1087	4,199	1,614	2,322
Признак 9	5,85	0,5392	0,0922	5,850	0,4924	0,1015	4,850	0,036	0,052
Признак 10	4,00	0,4443	0,1111	3,998	0,3748	0,1250	2,998	0,039	0,056
Признак 11	11,28	0,6930	0,0614	11,284	0,6729	0,0654	10,284	0,042	0,060
Признак 12	5,56	0,5266	0,0947	5,563	0,4771	0,1046	4,563	0,029	0,041
<i>Российская локация</i>									
Признак 1	8,77	0,6370	0,0726	8,772	0,6085	0,0783	7,772	0,081	0,116
Признак 2	11,29	0,6930	0,0614	11,286	0,6729	0,0654	10,286	0,133	0,191
Признак 3	3,42	0,4064	0,1187	3,423	0,3264	0,1347	2,423	0,032	0,046
Признак 4	11,37	0,6946	0,0611	11,372	0,6747	0,0651	10,372	0,199	0,287
Признак 5	10,50	0,6774	0,0645	10,500	0,6552	0,0690	9,500	0,225	0,324
Признак 6	15,71	0,7585	0,0483	15,705	0,7463	0,0507	14,705	0,224	0,322
Признак 7	10,35	0,6742	0,0652	10,347	0,6515	0,0697	9,347	0,102	0,147
Признак 8	12,17	0,7089	0,0582	12,174	0,6909	0,0618	11,174	0,303	0,436
Признак 9	19,50	0,7959	0,0408	19,501	0,7872	0,0426	18,501	0,020	0,029
Признак 10	10,39	0,6750	0,0650	10,386	0,6524	0,0695	9,386	0,024	0,034
Признак 11	14,09	0,7381	0,0524	14,088	0,7236	0,0553	13,088	0,034	0,049
Признак 12	18,39	0,7862	0,0428	18,389	0,7767	0,0447	17,389	0,013	0,019

Примечание: F_{on} – опытное значение критерия Фишера; $h^2 \pm s_h^2$ – доля влияния организованного фактора с ошибкой; F_h^2 – критерий Фишера в оценке достоверности доли влияния организованного фактора; HCP₀₅ – наименьшая существенная разность на 5%-м уровне значимости; D₀₅ – критерий Тьюки на 5%-м уровне значимости. Табличное значение критерия Фишера на 5%-м (F_{05}) и 1%-м (F_{01}) уровнях значимости – 1,88 и 2,41 соответственно.

Для подавляющего большинства признаков (9 из 12 в казахстанской локации и все – в российской) расчетом критерия Фишера установлены существенные различия между особями. Он превысил минимально допустимые для принятого в опыте числа степеней свободы как на 5%-м, так и на 1%-м уровнях значимости. При этом на участке казахстанской локации оценки составили от

2,41 (признак 3) до 11,28 (признак 11), а на российской – от 3,42 (признак 3) до 19,50 (признак 9). Такой итог 1-го этапа дисперсионного анализа позволил опровергнуть его нулевую гипотезу об отсутствии статистически значимых различий между особями биоты восточной, имеющими семенное происхождение, что стало основанием для оценок доли влияния организованного фактора на формирование фенотипической дисперсии. В частности, для казахстанской локации расчеты по алгоритму Плохинского показали, что в вариантах с подтвержденной значимостью различий эффект, вызванный эндогенной спецификой пигментного состава хвои особей семенного происхождения, заметен и достигал от $32,50 \pm 13,50$ % ($F_h^2 = 2,407$) по содержанию каротиноидов до $69,30 \pm 6,14$ % ($F_h^2 = 11,284$) по доле хлорофилла-*b* в общем пигментном составе.

В российской локации эксперимента сложилась несколько иная ситуация. Здесь влияние организованного фактора на формирование общего фона фиксируемой дисперсии сказывалось в большей мере: от $40,64 \pm 11,87$ % ($F_h^2 = 3,423$) также по содержанию каротиноидов до $79,59 \pm 4,08$ % ($F_h^2 = 19,501$) по отношению содержания каротиноидов к суммарному содержанию хлорофилла-*a* и хлорофилла-*b*. Получение аналогичных оценок на тех же участках методом Снедекора привело к сопоставимым (отчасти меньшим) результатам.

Оценить силу раздельного влияния на формирование наблюдавшейся в опыте дисперсии каждого из организованных факторов, в нашем случае ими выступали различия в территориальной локализации участков (фактор А) и индивидуальные различия между особями семенного происхождения на каждом из них (фактор В), а также вскрыть долю эффекта их взаимодействия (фактор АВ) смог двухфакторный дисперсионный анализ (табл. 3). Влияние различий в местоположении участков на возникновение существенных различий в пигментном составе хвои биоты восточной нашло подтверждение статистической надежности в оценках критериев Фишера. Они превысили соответствующие табличные пределы на принятых в лесоводственных исследованиях условиях точности оценок. При том, что практически по всем признакам наблюдалась именно такая ситуация, по содержанию каротиноидов существенность различий получила подтверждение на 5%-м уровне значимости, но не достигла его на 1%-м уровне.

Таблица 3

**Результаты двухфакторного дисперсионного анализа
пигментного состава хвои биоты восточной**
**The results of a two-way ANOVA of the pigment composition
of the needles of *Platykladus orientalis* (L.) Franco**

Признак	Источник дисперсии, факторы влияния	Критерий Фишера F_{on}	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$
Признак 1	А	14,61	0,1405	0,0215	0,1820	0,0204
	В	7,24	0,2783	0,0722	0,2086	0,0791
	АВ	5,11	0,1966	0,0803	0,2750	0,0725
	Z*	–	0,3846	0,6154	0,3344	0,6656
Признак 2	А	441,40	0,8389	0,0040	0,8848	0,0029
	В	6,44	0,0490	0,0951	0,0273	0,0973
	АВ	4,74	0,0361	0,0964	0,0376	0,0962
	Z	–	0,0760	0,9240	0,0502	0,9498

Окончание табл. 3

Признак	Источник дисперсии, факторы влияния	Критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$
Признак 3	A	6,08	0,0919	0,0227	0,1215	0,0220
	B	2,36	0,1424	0,0858	0,0811	0,0919
	AB	2,66	0,1611	0,0839	0,1992	0,0801
	Z	–	0,6046	0,3954	0,5983	0,4017
Признак 4	A	358,06	0,8107	0,0047	0,8626	0,0034
	B	6,07	0,0550	0,0945	0,0306	0,0969
	AB	4,84	0,0438	0,0956	0,0463	0,0954
	Z	–	0,0906	0,9094	0,0604	0,9396
Признак 5	A	229,7116	0,7641	0,0059	0,8304	0,0042
	B	3,7681	0,0501	0,0950	0,0251	0,0975
	AB	3,9578	0,0527	0,0947	0,0537	0,0946
	Z	–	0,1331	0,8669	0,0908	0,9092
Признак 6	A	670,23	0,8120	0,0047	0,8445	0,0039
	B	15,28	0,0741	0,0926	0,0451	0,0955
	AB	13,51	0,0655	0,0935	0,0789	0,0921
	Z	–	0,0485	0,9515	0,0315	0,9685
Признак 7	A	19,68	0,2725	0,0182	0,3969	0,0151
	B	1,92	0,1064	0,0894	0,0489	0,0951
	AB	1,22	0,0673	0,0933	0,0229	0,0977
	Z	–	0,5538	0,4462	0,5313	0,4687
Признак 8	A	188,59	0,6931	0,0077	0,7727	0,0057
	B	6,68	0,0982	0,0902	0,0585	0,0942
	AB	4,19	0,0617	0,0938	0,0658	0,0934
	Z	–	0,1470	0,8530	0,1030	0,8970
Признак 9	A	391,04	0,7775	0,0056	0,8355	0,0041
	B	12,24	0,0973	0,0903	0,0602	0,0940
	AB	5,74	0,0456	0,0954	0,0507	0,0949
	Z	–	0,0795	0,9205	0,0536	0,9464
Признак 10	A	441,38	0,8368	0,0041	0,8803	0,0030
	B	6,08	0,0461	0,0954	0,0254	0,0975
	AB	5,44	0,0412	0,0959	0,0443	0,0956
	Z	–	0,0758	0,9242	0,0500	0,9500
Признак 11	A	805,34	0,8525	0,0037	0,8857	0,0029
	B	15,17	0,0642	0,0936	0,0390	0,0961
	AB	9,67	0,0409	0,0959	0,0477	0,0952
	Z	–	0,0423	0,9577	0,0275	0,9725
Признак 12	A	340,11	0,7695	0,0058	0,8323	0,0042
	B	10,62	0,0961	0,0904	0,0590	0,0941
	AB	4,85	0,0439	0,0956	0,0473	0,0953
	Z	–	0,0905	0,9095	0,0614	0,9386

*Неорганизованный фактор, или остаточная дисперсия, соответствующая внутригрупповой (случайной) изменчивости, индуцируемой пестротой фона не учитываемых в опыте факторов среды.

Представленные оценки определили возможность нахождения доли влияния рассматриваемого организованного фактора – различия между опытными участками. В расчетах на платформе алгоритма Плохинского наибольшие оценки ($85,25 \pm 0,37$ %) достигнуты по доле хлорофилла-*b* в общем пигментном составе хвои биоты восточной, в то время как наименьшие ($9,19 \pm 2,27$ %) – по содержанию каротиноидов. Близкие к максимуму результаты зафиксированы для количества хлорофилла-*b* и доли хлорофилла-*a* в общем пигментном составе: $83,89 \pm 0,40$ и $83,68 \pm 0,41$ % соответственно. Содержание хлорофилла-*a* в хвое биоты восточной, хотя и было подвержено существенным расхождениям на разных участках, показало сдержанную реакцию растений на изменение их местоположения в географическом масштабе: $14,05 \pm 2,15$ %. По другим рассматриваемым признакам пигментного состава хвои такое территориальное перемещение вызвало возникновение более контрастных различий.

Материалы табл. 3 свидетельствуют об ощутимо меньшем, но преимущественно статистически значимом влиянии индивидуальной изменчивости особей семенного происхождения на формирование их фенотипической изменчивости на каждом из опытных участков. В подавляющем большинстве случаев (10 из 12) на существенность обнаруженных различий указывали опытные F-критерии ($F_{\text{оп}} = 3,77 \dots 15,28$), превысившие минимально допустимый уровень ($F_{0,05/01} = 2,61/3,83$). Исключение составили содержание каротиноидов и отношение к нему содержания хлорофилла-*a*. В тех случаях, когда существенность различий, вызванных действием фактора В, была подтверждена, вычислялась доля его влияния. Она оказалась не столь заметной, как по фактору А, а ее оценки чаще не получали статистического подтверждения и располагались в диапазоне от $4,61 \pm 9,54$ % (признак 10) до $27,83 \pm 7,22$ % (признак 1).

Эффект взаимодействия факторов (фактор АВ) как правило (11 из 12 признаков) вызывал возникновение существенных различий, что фиксируется расчетными критериями Фишера ($F_{\text{оп}} = 2,66 \dots 13,51$), превысившими соответствующие табличные значения ($F_{\text{АВ}0,05/01} = 2,61/3,83$). Этого не наблюдалось только для отношения содержания хлорофилла-*a* к содержанию каротиноидов. Однако действие фактора АВ, как и фактора В, оказалось ограниченным: от $3,61 \pm 9,64$ % (признак 2) до $19,66 \pm 8,03$ % (признак 1) при неподтвержденной в ряде случаев статистической значимости оценок доли его участия в формировании общей дисперсии.

Доля остаточной дисперсии, возникновение которой обусловлено неустраняемой пестротой фоновых условий среды каждого из опытных участков, а также неизбежным влиянием не учитываемых в опыте случайных факторов, варьировала от 4,85 % (признак 6) и 4,23 % (признак 10) до 60,46 % (признак 3). Географическая изменчивость, вызванная различиями в параметрах экологического фона территориально разобщенных участков (фактор А), в данном контексте не рассматривалась.

Построение расчетной части анализа на алгоритме Снедекора дало сопоставимый в основных чертах с приведенными выше данными результат.

В порядке обсуждения итогов работы можно отметить, что содержание и баланс пластидных пигментов в хвое биоты восточной в целом соответствуют сложившимся представлениям по этому вопросу, освещенным в публикациях о хвойных [6, 28, 29, 31] и лиственных [1] породах, включая представителей семейства кипарисовых [3].

Выводы

1. Пигментный состав хвои генетически неидентичных особей биоты восточной, дислоцированных на территориально разобщенных участках в предгорной зоне Заилийского Алатау (Республика Казахстан) и в зоне хвойно-широколиственных лесов Нижегородского Поволжья (Российская Федерация), неодинаков и характеризуется индивидуальной внутривидовой изменчивостью.

2. Фенотипические различия содержания и соотношения хлорофилла-*a*, хлорофилла-*b* и каротиноидов в хвое биоты восточной во многом обусловлены спецификой генотипов особей, имеющих семенное происхождение, что проявилось в пределах каждого из опытных участков и получило подтверждение результатами однофакторного дисперсионного анализа.

3. Контрастные условия местопроизрастания семенных потомств биоты восточной, связанные с их размещением на разных участках при интродукции на территорию Республики Казахстан и Российской Федерации, вызвало ответную реакцию, выразившуюся в повышении концентрации хлорофиллов и незначительном снижении уровня каротиноидов в хвое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Пигментация листовых пластин представителей рода береза (*Betula L.*) // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 3. С. 29–38.

Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Genus Birch (*Betula L.*) Leaf Plates Pigmentation. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 29–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-3-29-38>

2. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Селекционная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной методами многомерного анализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 2. С. 58–64.

Besschetnov V.P., Besschetnova 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. (In Russ.).

3. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Котынова М.Ю. Сезонный характер содержания пигментов в хвое туи западной в условиях Нижегородской области // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 3. С. 38–58.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kotynova M.Y. Seasonal Character of the Pigment Content in the Needles of Northern White-Cedar in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2022, no. 3, pp. 38–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.3.38>

4. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Паникаров И.И. Пылезадерживающая способность хвои ели колючей в насаждениях г. Нижнего Новгорода // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2024. Вып. 247. С. 188–208.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Panikarov I.I. The Dust-Retaining Ability of the Needles of the Prickly Spruce in the Plantings of Nizhny Novgorod. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2024, iss. 247, pp. 188–208. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.247.188-208>

5. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов П.В. Дифференциация пылезадерживающей способности кроны тополей // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 48–64.

Besschetnova N.N., Besschetnov P.V. Differentiation of the Dust Holding Capacity of Poplar Crowns. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 5, pp. 48–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-48-64>

6. Есичев А.О., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Бабич А.Н., Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А. Содержание и баланс запасных веществ в побегах лиственницы сибирской в условиях реинтродукции в Нижегородскую область // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 1. С. 17–27.

Yesichev A.O., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich A.N., Kentbayev E.Zh., Kentbayeva B.A. Content and Balance of Storage Compounds in Siberian Larch Shoots Under its Reproduction in Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 17–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-1-17-27>

7. Кентбаева Б.А., Кентбаев Е.Ж., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Муратов К.П. Содержание и соотношение пластидных пигментов в хвое биоты восточной при интродукции // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. XLII, № 3. С. 13–22.

Kentbaeva B.A., Kentbaev E.Zh., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Muratov K.P. The Content and Ratio of Plastid Pigments in the Needles of the *Platycladus orientalis* during Introduction. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2024, vol. XLII, no. 3, pp. 13–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-3-13-22>

8. Паникаров И.И., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Взаимозависимость параметров хвои ели колючей в определении ее пылезадерживающей способности // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. XLI, № 6. С. 495–503.

Panikarov I.I., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. The Interdependence of the Parameters of the Needles of the Prickly Spruce in Determining its Dust-Holding Ability. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2023, vol. XLI, no. 6, pp. 495–503. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-6-495-503>

9. Усольцев В.А., Плюха Н.И., Цепордей И.С. Отношение диаметра кроны к диаметру ствола: всеобщие модели лесообразующих видов Евразии // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. XLII, № 1. С. 36–42.

Usoltsev V.A., Plyukha N.I., Tsepordey I.S. The Ratio of Crown Diameter to Stem Diameter: Generic Models of Forest-Forming Species of Eurasia. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2024, vol. XLII, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-1-36-42>

10. Шлык А.А. О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b* // Биохимия. 1968. Т. 33, вып. 2. С. 275–285.

Shlyk A.A. On the Spectrophotometric Determination of Chlorophylls *a* and *b*. *Biokhimiya* = Biochemistry, 1968, vol. 33, iss. 2, pp. 275–285. (In Russ.).

11. Шлык А.А. Определение хлорофилла и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений / под ред. О.А. Павлиновой. М.: Наука, 1971. С. 154–170.

Shlyk A.A. Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Green Leaf Extracts. *Biokhimicheskie metody v fiziologii rastenij*. Ed. by O.A. Pavlinova. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 154–170. (In Russ.).

12. Altaf R., Altaf S., Hussain M., Shah R.U., Ullah R., Ullah M.I., Rauf A., Ansari M.J., Alharbi S.A., Alfarraj S., Datta R. Heavy Metal Accumulation by Roadside Vegetation and Implications for Pollution Control. *PLOS ONE*, 2021, vol. 16, iss. 5, art. no. e0249147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249147>

13. Belkayali N., Gur M. Heavy Metal Accumulation in Shrubs Used in Roadside Planting. *Global NEST Journal*, 2020, vol. 22, iss. 3, pp. 297–305. <https://doi.org/10.30955/gnj.003140>

14. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 9–25. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-9-25>

15. Chang E., Guo W., Dong Y., Jia Z., Zhao X., Jiang Z., Zhang L., Zhang J., Liu J. Metabolic Profiling Reveals Key Metabolites Regulating Adventitious Root Formation in Ancient *Platycladus orientalis* Cuttings. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 14, art. no. 1192371. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1192371>
16. Dawkins H.C. Crown Diameters: Their Relation to Bole Diameter in Tropical Forest Trees. *The Commonwealth Forestry Review*, 1963, vol. 42, no. 4(114), pp. 318–333. <https://www.jstor.org/stable/42603453>
17. Fan Z.-j., Dong D.-y., Zheng R., Wang M.-z., Wang Q.-f., Guan W.-b. Avian Community Diversity in *Platycladus orientalis* Ancient Trees at the Jingfu Temple in Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, vol. 35(5), pp. 46–55. [https://doi.org/10.13332/j.1000-1522\(2013\)05-0046-10](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522(2013)05-0046-10)
18. Hong D.-Y., Blackmore S. Plants of China. A Companion to the *Flora of China*. Beijing, Cambridge, Science Press, Cambridge University Press, 2015. 475 p.
19. Li C.-y., Ma L.-y., Wang X.-q., Xu X. Short-Term Effects of Tending on the Undergrowth Diversity of *Platycladus orientalis* Plantations in Beijing Mountainous Areas. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, vol. 29(3), pp. 60–66. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2007.03.010>
20. Li X.-w., Jia L.-m., Li G.-d., Wang P., Hao X.-f. Influence of Tending on Biodiversity of Shrub and Herbage in *Platycladus orientalis* Recreational Forest in Beijing Lower Mountainous Area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, vol. 31(6), pp. 193–197. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2009.06.036>
21. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, 1987, vol. 148, pp. 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
22. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls *a* and *b* of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, vol. 11, iss. 5, pp. 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
23. Lidholm J., Gustafsson P. A Functional Promoter Shift of a Chloroplast Gene: A Transcriptional Fusion Between a Novel *psbA* Gene Copy and the *trnK(UUU)* Gene in *Pinus contorta*. *The Plant Journal*, 1992, vol. 2, iss. 6, pp. 875–886. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113x.1992.t01-4-00999.x>
24. Ma F.-f., Jia L.-m., Duan J., Zhou X. Compilation of Site Index Table for Plantations of *Platycladus orientalis* in Beijing Mountainous Area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, vol. 30(6), pp. 78–82. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2008.06.006>
25. Mao A.-h., Li J.-x., Zhang C.-y., Li Q.-j., Wang S., Chen X.-y., Li Y. Geographic Variation and Provenance Selection of *Platycladus orientalis* in a 19-Year-Old Testing Plantation. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, vol. 32(1), pp. 63–68. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2010.01.020>
26. Min G., Yunmao R., Xiaodong Z., Sifan C., Yu G., Huijuan W., Ze G., Xiaodong L. Effects of Thinning on Canopy Characteristics and Potential Crown Fire Behavior of *Platycladus orientalis* in Xishan Forest Farm of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, vol. 44(8), pp. 56–65. <https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210455>
27. Porra R.J., Thompson W.A., Kriedemann P.E. Determination of Accurate Extinction Coefficients and Simultaneous Equations for Assaying Chlorophylls *a* and *b* Extracted with Four Different Solvents: Verification of the Concentration of Chlorophyll Standards by Atomic Absorption Spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*, 1989, vol. 975, iss. 3, pp. 384–394. [https://doi.org/10.1016/S0005-2728\(89\)80347-0](https://doi.org/10.1016/S0005-2728(89)80347-0)
28. Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic Decline and Pigment Loss during Autumn Foliar Senescence in Western Larch (*Larix occidentalis*). *Tree Physiology*, 1997, vol. 17, iss. 12, pp. 767–775. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.12.767>
29. Schoefs B., Franck F. Chlorophyll Synthesis in Dark-Grown Pine Primary Needles. *Plant Physiology*, 1998, vol. 118, iss. 4, pp. 1159–1168. <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1159>

30. Shi Y., Yu X.-x., Yue Y.-j., Wang X.-p., Qin Y.-s., Chen J.-q. Intraspecific Competitions in *Platycladus orientalis* Natural Forests in Beijing Mountainous Area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, vol. 30(supp. 2), pp. 36–40.

<https://doi.org/13332/j.1000-1522.2008.s2.014>

31. Skuodienė L. Quantitative Changes in Aminoacid Proline and Chlorophyll in the Needles of *Picea abies* Karst. (L.) during Stress and Adaptation. *Biologija*, 2001, vol. 47, no. 2, pp. 54–56.

32. Wang J., Xia Y., Zhao D., Chu X., Hu M., Hu J., Liu H. Crown Scale and Growth Space Demands of Main Tree Species in Urban Forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, vol. 40(3), pp. 42–54 <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170331>

33. Wang Y., Chen L.-h., Yu X.-x., Yang Q.-H., Yang X.-b., Xiao Y., Wang X.-p. Comparison of Transpiration Characteristics of Two Typical Coniferous Species in Beijing Mountainous Area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, vol. 30(supp. 2), pp. 193–196.

<https://doi.org/13332/j.1000-1522.2008.s2.034>

34. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*, 1994, vol. 144, iss. 3, pp. 307–313.

[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)

35. Zhao K., Li J., Xu C. Coupling Relationship between Stand Structure and Color Patch of *Platycladus orientalis* Plantations. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, vol. 41(1), pp. 82–91. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180316>

36. Zhou J.-c., Ma L.-y. Effects of Fertilization on the Growth of Trees in Forestland Converted from Farmland in Pingshan County, Hebei Province of Northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, vol. 30(6), pp. 64–70.

<https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2008.06.025>

37. Zhou R.-w., An Y.-t., Wang H., Ren Y.-m., Wang Q.-f., He B.-h., Chen P.-f., Lin D.-y. Quantitative Relationships of Intra- and Interspecific Competition of *Platycladus orientalis* Plantation in Beijing Xishan National Forest Park. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, vol. 32(6), pp. 27–32. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2010.06.020>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*161.443.6:57.085

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-78-92

Адаптация к условиям почвы отселектированных на устойчивость к засолению *in vitro* регенерантных линий березы

О.С. Машкина^{1,2}, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [H-7362-2014](https://orcid.org/0000-0001-8252-2192),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8252-2192>

Т.М. Табацкая¹, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-2914-2021](https://orcid.org/0000-0003-1104-4255),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1104-4255>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; mashkinaos@mail.ru[✉], tatyana.tabacky@gmail.com

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., д. 1, г. Воронеж, Россия, 394018; mashkinaos@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 25.11.23 / Одобрена после рецензирования 08.02.24 / Принята к печати 11.02.24

Аннотация. Тканевая и клеточная селекция растений в культуре *in vitro* является перспективным направлением, дополняет и ускоряет традиционную селекцию. Моделирование стресса в строго контролируемых условиях на селективных средах позволяет проводить отбор по устойчивости к негативным факторам среды (в т. ч. к засухе и засолению), сохранять и клонировать *in vitro* варианты с искомыми признаками. Для лесных древесных растений вопросы, касающиеся адаптации толерантных генотипов к условиям *ex vitro*, изучены недостаточно. В рамках данного исследования рассмотрены особенности адаптации к нестерильным условиям почвы 3 линий березы: пушистой, карельской и далекарлийской – отселектированных в культуре *in vitro* на устойчивость к засолению (NaCl и Cd(NO₃)₂). Оценивали приживаемость, рост и развитие растений в зависимости от возраста, состава субстрата и схемы адаптации. Выявлено, что для успешной приживаемости регенерантов березы в условиях почвы их подготовка к этому этапу должна начинаться на стадии микроразмножения. Показана целесообразность использования питательной среды ½ MS без гормонов для получения регенерантов с активным спонтанным ризогенезом, нормальным ростом и развитием, без признаков соматической изменчивости, сбалансированных по размеру побегов и корневой системы. Наиболее высокая приживаемость *ex vitro* (в среднем 97–99 %) получена при 2-этапной схеме адаптации растений: 14 суток в условиях лаборатории, затем 14 суток в теплице (по сравнению с 1-этапной адаптацией – 28 суток в лаборатории) с последующей высадкой в мае в защищенный грунт теплицы. Показана предпочтительная высадка 1-месячных регенерантов высотой 4,5–6,0 см в контейнеры с субстратом из торфогрунта в сочетании с перлитом в соотношении 3:1. У всех 3 линий установлено активное боковое ветвление корней – в среднем 6–7 корней 1-го порядка и 18–29 корней 2-го порядка. По-видимому, более низкая кратковременная ночная температура в теплице в весенний период по сравнению с дневной стимулирует формирование развитой разветвленной корневой системы. Это обеспечивает лучшее снабжение растений водой и элементами питания, способствуя полной реализации их адаптивного потенциала. После 1–2 лет доращивания в теплице устойчивые к засолению саженцы соответствовали размерам стандартного поса-



дочного материала, который может быть использован для целей защитного лесоразведения и создания испытательных культур.

Ключевые слова: береза, толерантные линии, микроразмножение, субстрат, адаптация, рост, корнеобразование, *in vitro*, *ex vitro*

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзаданий № AAA-A-A20-120012890092-6 и № 123040400004-8 Федерального агентства лесного хозяйства. При подготовке публикации использовались материалы биоресурсной научной коллекции ВНИИЛГИСБиотех «Коллекция *in vitro* клонов ценных генотипов лиственных древесных растений».

Для цитирования: Машкина О.С., Табачкая Т.М. Адаптация к условиям почвы отселектированных на устойчивость к засолению *in vitro* регенерантных линий березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 78–92. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-78-92>

Original article

Adaptation to Soil Conditions of *in vitro* Regenerated Birch Lines Selected for Salinity Resistance

Olga S. Mashkina^{1,2}✉, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-7362-2014](https://orcid.org/0000-0001-8252-2192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8252-2192>

Tat'yana M. Tabatskaya¹, Senior Research Scientist; ResearcherID: [ABB-2914-2021](https://orcid.org/0000-0003-1104-4255), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1104-4255>

¹All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 304087, Russian Federation; mashkinaos@mail.ru✉, tatyana.tabacky@gmail.com

²Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation; mashkinaos@mail.ru✉

Received on November 25, 2023 / Approved after reviewing on February 8, 2024 / Accepted on February 11, 2024

Abstract. Tissue and cellular plant *in vitro* breeding is a promising trend that complements and accelerates traditional breeding. Stress modelling under strictly controlled conditions on selective media allows for selection based on resistance to negative environmental factors (including drought and salinity), and preserving and cloning *in vitro* of selected variants with the desired traits. For forest woody plants, issues related to the adaptation of tolerant genotypes to *ex vitro* conditions have not been sufficiently studied. This research examines the adaptation features to non-sterile soil conditions of 3 birch lines: downy birch, Karelian birch and Ornäs birch selected through *in vitro* culture for resistance to salinity (NaCl and Cd(NO₃)₂). The survival rate, growth and development of plants have been evaluated depending on age, substrate composition and adaptation patterns. It has been revealed that for birch regenerants to successfully survive in soil conditions, their preparation for this stage should begin at the stage of micropropagation. The expediency of using ½ MS nutrient medium without hormones to obtain regenerants with active spontaneous rhizogenesis, normal growth and development, without signs of somaclonal variability, balanced in size shoots and root system has been shown. The highest *ex vitro* survival rate (on average 97–99 %) has been obtained with a 2-stage plant adaptation scheme for plants: 14 days in laboratory conditions, then 14 days in a greenhouse (compared to 1-stage adaptation – 28 days in the laboratory), followed by planting in May in protected soil of a greenhouse. The preferred planting of 1-month-old

regenerants 4.5–6 cm high in containers with a substrate of peat soil combined with perlite in a ratio of 3:1 has been shown. All 3 lines have shown active lateral root branching, with an average of 6–7 roots 1st-order roots and 18–29 2nd-order roots. Apparently, a lower short-term nighttime temperature in the greenhouse in spring compared to the daytime one stimulates the formation of a developed branched root system. This ensures a better supply of water and nutrients to plants, contributing to the full realization of their adaptive potential. After 1 to 2 years of further growing in a greenhouse, salinity-resistant seedlings have corresponded to the sizes of standard planting material, which can be used for protective afforestation and the creation of test crops.

Keywords: birch, tolerant lines, micropropagation, substrate, adaptation, growth, root formation, *in vitro*, *ex vitro*

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignments no. AAA-A-A20-120012890092-6 and no. 123040400004-8 of the Federal Forestry Agency. In preparing the publication, materials from the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology bioresource scientific collection “Collection of *in vitro* Clones of Valuable Genotypes of Deciduous Woody Plants” were used.

For citation: Mashkina O.S., Tabatskaya T.M. Adaptation to Soil Conditions of *in vitro* Regenerated Birch Lines Selected for Salinity Resistance. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 78–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-78-92>

Введение

В условиях меняющегося климата, участвующих засух, увеличения масштабов засоления почв, техногенного загрязнения возрастает значимость адаптивной селекции, отбора и создания продуктивных и в то же время стрессоустойчивых форм древесных растений. Береза является одной из лесообразующих и хозяйственно ценных пород России, входит в число главных пород для защитного лесоразведения, эффективность которого определяется наличием толерантных, в т. ч. к засухе и засолению, форм [12, 22].

Тканевая и клеточная селекция растений *in vitro* является перспективным направлением, дополняя и ускоряя традиционный селекционный процесс [5, 19, 20, 24, 26]. Применение биотехнологического подхода дает возможность не только отбирать варианты (отдельные клетки, ткани, целые растения) с искомыми признаками, но и сохранить их и клонировать *in vitro* в короткие сроки. Однако для лесных древесных растений исследования в данном направлении немногочисленны [2, 17, 19], а ряд вопросов недостаточно хорошо изучен, в частности, не определены оптимальные схемы подготовки и адаптации толерантных генотипов к условиям *ex vitro*. Содержащиеся в литературе сведения касаются в основном акклиматизации к нестерильным условиям клонированного *in vitro* селекционного посадочного материала древесных растений, отобранных в природе или полученных методами традиционной селекции [1, 18], а не материала, подвергнутого многократным стрессам, в результате которых у растений нередко происходят морфологические, генетические, физиолого-биохимические и другие изменения [21].

Адаптация и перевод микрорастений из стерильных (*in vitro*) в нестерильные (*ex vitro*) условия является одним из уязвимых и критических этапов клонального микроразмножения, на котором может погибнуть значительная часть культур [4]. Это заключительный и одновременно один из наиболее

стрессовых этапов клонирования *in vitro*, который в целом определяет успех микроразмножения многолетних растений [8]. Известно, что в условиях *in vitro* растения формируют специфический «культуральный фенотип», отличный от обычных растений и носящий приспособительный характер [3]. Чаще всего растения культивируют на плотной агаризованной питательной среде, которая имеет низкую насыщенность кислородом и ведет к гипоксии и обезвоживанию корней. В культуральных сосудах повышена относительная влажность воздуха, отмечается дефицит углекислого газа, в результате у растений появляются нефункционирующие устьица, корневая система часто недоразвита и лишена бокового ветвления, нарушается водный баланс, изменяются процессы транспирации и дыхания, фотосинтетической активности. Недоразвитие (или отсутствие) эпикутикулярного воскового слоя приводит к избыточной транспирации и затрудняет процесс акклиматизации *ex vitro* [25]. Из-за присутствия сахарозы в среде и низкой концентрации CO_2 растения переходят на гетеротрофный тип питания.

Нарушение физиологических процессов в культуре *in vitro*, слабая водоудерживающая способность и чрезмерное испарение листьями в сочетании с недостаточным поглощением корнями воды из почвы часто обуславливают быстрое обезвоживание растений и их гибель [3]. Согласно данным М.А. Кодун-Ивановой [6], в 1-й месяц адаптации микрорастения испытывают наибольший водный стресс, когда наблюдаются максимальные интенсивность транспирации, скорость влагопотери и водный дефицит.

Поэтому необходимо учитывать все факторы, как внутренние, так и внешние, влияющие на адаптацию растений-регенерантов березы *ex vitro*: возраст, размеры и состояние растений перед высадкой в почву, субстраты для адаптации клонов, их генотипические особенности и др. Отмечается, что для успешного приспособления растений-регенерантов к условиям *ex vitro* их подготовка должна начинаться *in vitro* [8, 25].

По результатам наших предыдущих многолетних исследований по моделированию солевого стресса (NaCl , $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) *in vitro* у разных видов и гибридов березы были отселектированы наиболее устойчивые линии [22].

Цель настоящей работы – выявление особенностей адаптации к условиям *ex vitro* отселектированных на толерантность к засолению хлоридом натрия и нитратом кадмия регенерантных линий березы.

Объекты и методы исследования

Материалом для исследования служили 3 ранее отселектированные в культуре *in vitro* солеустойчивые линии березы пушистой (*B. pubescens* Ehrh., 3п/т), березы карельской (*B. pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, Ю/т) и березы далекарлийской (*B. pendula* f. *'dalecarlica'* (L.f.) Schneid, R2/т), показавшие комплексную устойчивость к NaCl и Cd , а также их исходные клоны (3п, Ю, R2) из коллекции *in vitro* Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии [7].

Исходные коллекционные клоны хранили путем субкультивирования 1 раз в 5–6 месяцев при стандартных условиях (16-часовой фотопериод, температура – 25–26 °С, освещенность – 2,0 клк) на основе пролиферации пазушных меристем. Для хранения и клонального микроразмножения исходных и отселек-

тированных растений применяли модифицированную нами безгормональную питательную среду [11, 15]. В качестве базовой использовали среду Мурасиге и Скуга с половинным содержанием макросолей ($\frac{1}{2}$ MS) [23] и сниженной (до 10 г/л вместо стандартных 30 г/л) концентрацией сахарозы. На этапе хранения культур в среды добавляли активированный уголь (2 %), а для долгосрочного хранения брали биологические пробирки (21×200 мм), в которые высаживали по 1 микропобегу. Микрочеренкование растений осуществляли в конических колбах, вместимостью 150 мл, по 3–5 микропобов в каждой.

Схема отбора *in vitro* по устойчивости к засолению представлена в нашей публикации [22] и основана на использовании 2 модельных биотест-систем: сначала коллекции клонов березы *in vitro* (культура микропобегов), а затем стеблевых каллусных культур, полученных от наиболее устойчивых к засолению микроклонов. Селекционная работа базировалась на генетическом разнообразии клонов, входящих в состав коллекции, и индуцированной клеточной гетерогенности каллусных культур, а также отборе наиболее устойчивых растений с применением селективных питательных сред, включающих хлорид натрия (0,2–1,0 %). Отобранные толерантные к засолению NaCl линии березы дополнительно испытывали на способность переносить воздействие кадмия в виде азотнокислой соли $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ в концентрации 10^{-4} М.

Микрорастения первоначально клонировали *in vitro* в январе–марте до необходимого количества (не менее 50 растений на линию) и оценивали коэффициент мультипликации (количество микрочеренков от 1 побега), рост побегов в высоту, общую длину корней (суммарную длину всех корней 1 растения) и их количество в сравнении с исходными клонами. Это позволяет определить эффективность использования отобранных линий для массового размножения, проверить качество посадочного материала *in vitro*.

Выращивание отселектированных линий березы в условиях *ex vitro* проводили в 2 этапа: I этап – адаптация растений в пластиковых контейнерах (в условиях лаборатории, теплицы); II этап – доращивание на грядке в теплице.

Одномесячные *in vitro*-растения высаживали в контейнеры, вместимостью 1 л, заполненные субстратом, по 10 растений в каждый. Для минимизации водного стресса перед помещением в почвенный субстрат осуществляли «воздушную закалку» (аэрацию) растений в открытых культуральных сосудах в течение 2–3 суток на среде с добавлением по 1,0 мл дистиллированной нестерильной воды. Для снижения повреждения корни не отмывали от агара.

Оценивали 2 схемы адаптации (апрель–май): А) растения выращивали в условиях лаборатории (в контейнерах) в течение 28 суток с последующей высадкой в закрытый грунт теплицы; Б) контейнерные растения выдерживали 14 суток в условиях лаборатории, затем 14 суток в теплице и высаживали на грядку в теплицу. Испытывали 4 типа субстратов, приготовленных на основе торфа и перлита в соотношении 3:1. Основой субстрата служили готовые торфогрунты российского производства с различным содержанием минеральных добавок: верховой нейтрализованный торф (ООО РТК, Москва); pH – 5,5–6,5; верховой нейтрализованный торф «Премиум» (ООО «Агро Торф ЛТД», Псковская обл.) с содержанием (мг/кг) не менее: азота – 100, фосфора – 9 и калия – 10, pH – 5,5–6,5; торфогрунт универсальный («Экорост», Московская обл.), состоящий из торфа верхового, песка, муки известняковой, с содержанием (мг/кг) не менее: азота – 300, фосфора – 200 и калия – 350; pH – 5,4–6,6; торфо-

грунт «Фаско» (ООО «Фаско», Московская обл.) из торфа верхового и низинного, песка, муки известняковой, с содержанием (мг/кг) не менее: азота – 350, фосфора – 400 и калия – 500, pH – 6–7.

Повышенную влажность (80–90 %) обеспечивали укрытием пересаженных в субстрат растений другим прозрачным контейнером того же объема. Через 7–10 суток укрытие снимали, снижая влажность воздуха до значений окружающей среды и выдерживали при освещенности 1,0–1,5 клк, 16-часовом фотопериоде, температуре 18–23 °С. Через 28 суток адаптации все растения высотой 8–10 см с хорошо развитой корневой системой пикировали в середине мая в грунт теплицы летнего типа, покрытой поликарбонатом (освещение естественное, без туманообразующей установки), для их доращивания. Состав грунта: торф, почва, песок в соотношении 1:1:1. Размещение растений – 100 шт. на 1 м² с междурядьем 10 см, между растениями в ряду – 10 см.

Реакцию растений на условия *ex vitro* определяли на всех этапах адаптации после высадки в почву. Учитывали приживаемость (доля прижившихся растений по отношению к числу высаженных), рост и развитие побегов и корневой системы при разных схемах адаптации, использованных субстратах. Все эксперименты проводили в 2-кратной повторности, каждая из которых (регенерантная линия, исходный клон) включала по 20 растений.

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью пакета программ Stadia 7.0 Professional (InCo, Россия). Для сравнения выборок использовали t-критерий Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Микрочеренкование отселектированных линий (подготовительный этап in vitro). Клонированные *in vitro* образцы линий березы формировали нормальный морфотип, характеризовались активным спонтанным ризогенезом (до 100 % укорененных растений) и хорошим ростом (табл. 1, см. рисунок).

Таблица 1

Морфометрические показатели 2-месячных растений березы после микрочеренкования на безгормональной питательной среде ½ MS The morphometric parameters of 2-month-old birch plants after micrografting on a ½ MS hormone-free nutrient medium

Клон, линия	Высота побегов (h), см	Общая длина корней, см	Количество корней, шт.	h/l	Коэффициент мультипликации
<i>Исходные клоны</i>					
Зп	9,0 ± 0,13	9,8 ± 0,04	3,6 ± 0,33	0,92	7,6 ± 0,11
Ю	8,4 ± 0,17	10,8 ± 0,21	3,3 ± 0,33	0,82	6,6 ± 0,07
R2	8,8 ± 0,21	12,0 ± 0,22	4,3 ± 0,13	0,73	6,3 ± 0,09
<i>Среднее</i>	8,8 ± 0,14	10,9 ± 0,17	3,8 ± 0,17	0,82 ± 0,21	6,8 ± 0,15
<i>Регенерантные линии</i>					
Зп/т	9,5 ± 0,10*	13,2 ± 0,17	8,3 ± 0,13	0,72	7,3 ± 0,26
Ю/т	8,9 ± 0,21	11,4 ± 0,11	7,3 ± 0,33	0,78	6,1 ± 0,22
R2/т	9,1 ± 0,10	10,6 ± 0,08	6,7 ± 0,25	0,86	6,5 ± 0,19
<i>Среднее</i>	9,2 ± 0,18*	11,7 ± 0,18**	7,4 ± 0,17**	0,79 ± 0,01	6,6 ± 0,13

Примечание: Представлены усредненные данные 3 циклов черенкования. *Различия с исходными клонами (контролем) статистически значимы при P < 0,05; ** – при P < 0,001.



а

б



в



г



д



е



ж

Этапы адаптации к условиям *ex vitro* растений-регенерантов, устойчивых к засолению (NaCl , $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$): а – опытная партия солеустойчивых клонов березы *in vitro*; б – укорененное микрорастение; в, г – адаптация в условиях лаборатории; д – адаптация в теплице; е, ж – посадочный материал 1-го года вегетации

The stages of adaptation to *ex vitro* conditions of regenerated salinity-resistant (NaCl , $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) plants: а – pilot batch of salt-resistant *in vitro* birch clones; б – rooted microplant; в, г – adaptation under laboratory conditions; д – adaptation in a greenhouse; е, ж – planting material of the 1st year of vegetation

Образцы также демонстрировали высокую сохранность (в среднем 92,7 % через 2 месяца культивирования с варьированием от 89,3 до 99,3 % у разных линий) и регенерационную активность (коэффициент мультипликации составил 6,1–7,3), что сопоставимо с показателями исходных клонов (сохранность – 85–92 %, коэффициент мультипликации – 6,3–7,6).

Не отмечено дисбаланса между линейными размерами надземной части побега и его корневой системой. Соотношение высоты побегов и общей (суммарной) длины корней отселектированных линий и их исходных клонов составили соответственно 0,82 и 0,79. В обоих случаях *in vitro* формировались корни 1-го порядка, отходящие непосредственно от базальной части микро-

побега. При этом среднее количество корней у линий было в 2 раза выше, чем у исходных клонов (7–8 и 3–4 шт. соответственно). Такая многочисленность (мочковатость) корней увеличивает их всасывающую поверхность, что может обеспечить лучшее поглощение воды и питательных веществ после высадки растений в почвенный субстрат. Есть данные, что низкое соотношение длины «побег:корень», т. е. между транспирирующей и поглощающей поверхностями у сеянцев способствует последующему более быстрому росту корней и лучшей выживаемости растений при их пересадке в условия водного дефицита [14].

Таким образом, на питательной среде без гормонов микропобеги березы имели хороший рост, нормальное развитие, высокую ризогенную активность, увеличенное (по сравнению с исходными клонами) количество корней 1-го порядка. Следует отметить, что исследователи для укоренения микропобегов используют питательные среды с гормонами ауксиновой природы [10, 18]. В работе В.И. Деменко и др. [4] отмечается, что процесс ризогенеза, морфология и структура корней в этом случае зависят от типа и концентрации ауксина, а укорененные без его применения побеги лучше приживались *ex vitro*. В экспериментах с триплоидной осиною наблюдалась значительная диспропорция у растений-регенерантов (надземная часть в 2 раза преобладала над корневой системой), укорененных на питательной среде с индолилмасляной кислотой (0,5–1,0 мг/л) [10]. Для повышения приживаемости таких растений авторы рекомендуют перед высадкой в почву проводить декапитацию верхушечного побега с оставлением 2 междоузлий, что может стимулировать развитие пазушных побегов и привести к многостволости. Это потребует дополнительного этапа по формированию саженца с 1 стволом, что усложняет и удорожает выращивание посадочного материала.

Для сравнения, наши предыдущие исследования показали, что спонтанное укоренение микропобегов на питательных средах без гормонов приводило к формированию пропорционально развитых регенерантов березы, тополя и осины, пригодных для высадки в почву. Причем растения хорошо приживались в почве (70–100 % в зависимости от генотипа) при их «прямой» высадке, т. е. из культуры *in vitro* сразу в нестерильный грунт теплицы [11]. Ограничивающим фактором использования такого приема являются резкие температурные перепады в начале вегетационного сезона (апрель–май), что оказывает существенное влияние на адаптацию микрорастений в зависимости от срока их высадки в теплицу летнего типа. Так, значительные суточные колебания температуры (от –0,1 до +23,3 °С) в I декаде мая 2023 г. на фоне повышенной влажности в теплице привели в первые 10 дней после высадки к гибели значительной части растений (приживаемость составила в среднем 40 %). В период же выровненного температурного режима (II и III декады июня 2023 г.) приживаемость в теплице была высокой и составила в среднем 88,3 % для регенерантных линий и 85 % для их исходных клонов. По этой причине для успешной адаптации растений к условиям теплицы в более ранние сроки нами была проведена их поэтапная подготовка с предварительной акклиматизацией в лабораторных условиях.

Влияние субстрата на адаптацию размноженных in vitro растений к условиям ex vitro. Все испытанные субстраты на основе верхового торфа были пригодны для выращивания березы (табл. 2). Однако лучший рост и прижи-

ваемость регенерантов получены при использовании торфогрунта «Фаско». Субстрат, состоящий из смеси торфогрунта «Фаско» и перлита (в соотношении 3:1), по-видимому, обеспечивал растения полноценным минеральным питанием, аэрацией (благодаря пористой структуре перлита) и водоснабжением. Это положительно сказывалось на приживаемости и росте растений. Высота 28-дневных саженцев составила 8,4 см при 6,5–6,8 см на остальных субстратах, приживаемость – 99,3 % при 76,7–83,3 % в других вариантах.

Таблица 2

**Влияние субстрата на рост и приживаемость регенерантов березы
в нестерильных условиях (на примере клона регенерантной линии 3п/т)
The effect of the substrate on the growth and survival rate of birch regenerants under
non-sterile conditions (using the example of a clone of the 3 p/t regenerant line)**

Субстрат	Высота саженцев, см	Приживаемость, %
Торф верховой, перлит (3:1)	6,8 ± 0,09	76,7 ± 1,67
Торф верховой «Премиум», перлит (3:1)	6,5 ± 0,11*	83,3 ± 1,26*
Торфогрунт универсальный, перлит (3:1)	6,8 ± 0,13	88,3 ± 0,63**
Торфогрунт «Фаско», перлит (3:1)	8,4 ± 0,11**	99,3 ± 0,25**

Примечание: Указаны данные для 28-дневных регенерантов в условиях лаборатории. *Различия с субстратом из торфа верхового и перлита статистически значимы при $P < 0,01$; ** – при $P < 0,001$.

Возраст регенерантов перед высадкой в почвенный субстрат. Исследования показали, что для высадки в контейнеры пригодны растения-регенеранты березы 2 сроков культивирования *in vitro*, как 1-, так и 2-месячные, различающиеся по росту в высоту: средnekрупные (1-месячные, высотой 4,5–6,0 см) и крупные (2-месячные, высотой 6,5–8,0 см). В обоих случаях растения имели нормальный морфотип, крепкие стволы, отличались внутриклоновой однородностью по росту и высокой (до 100 %) частотой укоренения. Этому, возможно, способствует выращивание микрорастений в индивидуальных сосудах, что устраняет конкурентное негативное влияние на развитие. Тем не менее преимуществом использования 1-месячных растений по сравнению с 2-месячными является возможность сокращения срока культивирования *in vitro*, а также увеличения продолжительности 1-го вегетационного сезона *ex vitro*, что позволяет получать хорошо адаптированный посадочный материал. Технические приемы пикировки 1-месячных растений в субстрат контейнеров удобны и менее трудоемки, чем 2-месячных с более длинными стволиками и корневой системой. Кроме того, чем короче цикл культивирования *in vitro*, предшествующий акклиматизации *ex vitro*, тем, по-видимому, менее выражены особенности, характерные для «культурального *in vitro* фенотипа».

Влияние схемы адаптации на развитие корневой системы регенерантов. Приживаемость микрорастений в нестерильных условиях зависит и от качества корневой системы. Она должна быть хорошо развитой, разветвленной (с боковым ветвлением) и функционирующей, способной к поглощению элементов питания из почвенного субстрата, обеспечивающей последующий рост и развитие растений *ex vitro*. Чем сильнее разветвлен корень, тем больше корневая система имеет зон активного поглощения (расположенных в зоне деления и растяжения клеток кончика корешка, а также в зоне корневых волосков) воды и минеральных элементов [9]. Есть мнение, что дефекты работы корневой системы растений-регенерантов являются одной из основных причин их низкой приживаемо-

сти в почвенном субстрате. Даже 100%-ное укоренение побегов *in vitro* не всегда обеспечивает развитие корневой системы в условиях нестерильной почвы [25].

Результаты эксперимента показали, что независимо от схемы адаптации у регенерантов в почвенном субстрате происходило активное боковое ветвление корней с формированием корней 2-го порядка. Однако среднее количество корней и 1-го, и 2-го порядка было существенно выше при выращивании контейнерных растений в течение 14 суток в условиях лаборатории, затем 14 суток в теплице. Причем все 3 проанализированные линии сходно реагировали на данные условия (табл. 3).

Таблица 3

Среднее (с ошибкой) количество корней (шт.) 1-го и 2-го порядка у линий березы при разных схемах адаптации в условиях *ex vitro*
The average (with error) number of 1st-order and 2nd-order roots in birch lines under different adaptation schemes under *ex vitro* conditions

Линия	А		Б	
	Корни 1-го порядка	Корни 2-го порядка	Корни 1-го порядка	Корни 2-го порядка
Зп/т	4,6 ± 0,06	13,2 ± 0,23	7,3 ± 0,20*	27,8 ± 0,63*
Ю/т	4,7 ± 0,08	10,8 ± 0,06	5,8 ± 0,17*	18,0 ± 0,16*
R2/т	5,1 ± 0,11	10,5 ± 0,12	7,0 ± 0,29*	29,4 ± 0,49*
<i>Среднее</i>	4,6 ± 0,07	11,4 ± 0,19	6,3 ± 0,17*	23,8 ± 0,86*

Примечание: Почвенный субстрат: торфогрунт «Фаско» и перлит (3:1). Указаны данные для 1-месячных контейнерных растений. *Различия варианта со схемой адаптации Б по сравнению с вариантом со схемой адаптации А статистически значимы при $P < 0,001$.

Это может быть связано с тем, что при выращивании весной в теплице летнего типа растения испытывают существенные колебания температуры в суточном цикле (более низкая ночная температура чередуется с оптимальной или близкой к ней дневной) по сравнению с относительно одинаковой (18–23 °С) – в лаборатории. Есть сведения, что снижение ночной температуры на 5–10 °С стимулирует формирование корневой системы и тормозит рост стебля в высоту [9]. По данным А.Ф. Титова и др. [16], ежесуточно повторяющиеся кратковременные низкотемпературные воздействия (дроп-воздействия) могут обеспечить повышенную скорость фотосинтеза, способствуя более полной реализации адаптивного потенциала растений.

Кроме того, развитие и рост корней зависят от соотношения температуры воздуха и почвы в корнеобитаемом слое. Согласно данным И.Н. Рахтеенко [13], наилучшее нарастание активных (всасывающих) корней у сосны и ели наблюдается при температуре почвы 10–12 °С, дуба и липы – при более высокой температуре – 15–17 °С. Оптимальной температурой корнеобитаемого слоя субстрата для поглощения и усвоения ионов, в т. ч. фосфора, необходимого для развития и роста корневой системы, считают 18–23 °С.

Влияние схемы адаптации на приживаемость и рост растений в грунте теплицы. Приживаемость растений в грунте теплицы была существенно выше в варианте Б и составила в среднем 97,0 против 79,2 % в варианте А (табл. 4). Вероятно, более развитая (превосходящее количество корней 1-го и 2-го порядка) корневая система при схеме адаптации по варианту Б обеспечивает лучшее снабжение растений водой и элементами питания, что, в свою очередь, положи-

тельно сказывается на их приспособительных возможностях *ex vitro*, в частности, приживаемости.

Таблица 4

Приживаемость и высота регенерантов березы в грунте теплицы в зависимости от схемы их адаптации в контейнерах
The survival rate and height of birch regenerats in the greenhouse soil, depending on the scheme of their adaptation in containers

Линия	А		Б	
	Высота, см	Приживаемость, %	Высота, см	Приживаемость, %
Зп/т	25,9 ± 0,20	83,3 ± 1,67	36,2 ± 0,04*	99,9 ± 0,03*
Ю/т	31,1 ± 0,24	75,0 ± 2,50	31,7 ± 0,10	99,9 ± 0,05*
R2/т	25,9 ± 0,49	80,0 ± 1,44	27,1 ± 0,40	95,0 ± 1,44*
<i>Среднее</i>	27,6 ± 0,41	79,2 ± 0,96	31,7 ± 0,57*	97,0 ± 0,72*

Примечание: Учет приживаемости 1-месячных контейнерных растений проводили через 1 месяц после их высадки в грунт теплицы, высоты – в конце 1-го года вегетации (сентябрь). *Различия варианта со схемой адаптации Б по сравнению с вариантом со схемой адаптации А статистически значимы при $P < 0,001$.

Не отмечено существенных различий по росту в высоту растений отдельных линий в зависимости от схемы адаптации, за исключением линии Зп/т, где превышение по данному признаку составило 1,4 раза в варианте Б. Очевидно, приживаемость саженцев березы в большей степени по сравнению с ростом в высоту определена последовательностью этапов их адаптации *ex vitro*. В конце 1-го года вегетации (конец сентября) в условиях защищенного грунта теплицы высота растений (вариант Б) в среднем составила 31,7 см, средний коэффициент вариации – 12,2 %, а после 2 лет доращивания – соответственно 53–69 см и 30,6 %, что сопоставимо с размерами их исходных клонов (табл. 5). Причем диаметр стволика у корневой шейки у линий Зп/т и Ю/т был достоверно выше по сравнению с их исходными клонами.

Таблица 5

Показатели роста 2-летних саженцев регенерантных линий березы и их исходных клонов в условиях защищенного грунта теплицы, 2023 г.
The growth performance of 2-year-old seedlings of regenerated birch lines and their original clones in the protected greenhouse soil, 2023

Клон, линия	Высота растений		Диаметр у корневой шейки	
	см	св, %	мм	св, %
<i>Исходные клоны</i>				
Зп	76,9 ± 4,29	26,2	4,5 ± 0,10	10,8
Ю	50,8 ± 3,76	36,2	3,6 ± 0,13	18,3
R2	77,5 ± 3,48	21,1	4,0 ± 0,12	14,7
<i>Среднее</i>	67,9 ± 2,68	32,5	4,0 ± 0,10	16,9
<i>Регенерантные линии</i>				
Зп/т	69,0 ± 3,88	26,4	5,4 ± 0,14**	12,3
Ю/т	66,4 ± 4,08*	29,5	5,2 ± 0,23**	21,6
R2/т	52,6 ± 3,22**	29,9	3,9 ± 0,17	21,4
<i>Среднее</i>	62,4 ± 2,29	30,6	4,8 ± 0,13**	23,3

*Различия регенерантных линий с исходными клонами статистически значимы при $P < 0,01$, ** – при $P < 0,001$.

В соответствии с ОСТ 56-98-93 (Отраслевой стандарт. Сеянцы и саженцы основных древесных и кустарниковых пород. Технические условия. Утв. и введен в действие приказом Рослесхоза от 10.12.1993 № 327), высота 1–2-летних берез повислой, карельской и пушистой в лесостепной зоне должна быть не менее 20–25 см, диаметр стволика у корневой шейки – не менее 2–3 мм. Следует отметить, что в документе приведены значения, рекомендуемые для сеянцев и саженцев, полученных традиционным способом (не в культуре *in vitro*). Таким образом, растения толерантных линий исследованных видов берез, полученные по технологии *in vitro*, соответствовали размерам стандартного посадочного материала, имели здоровую и хорошо развитую корневую систему, прямые, неповрежденные стволы и поэтому пригодны для создания испытательных культур и использования для целей защитного лесоразведения.

Заключение

Приживаемость, рост и развитие побегов и корневой системы толерантных к засолению (NaCl , $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) линий березы (прошедших многократный солевой стресс в культуре *in vitro*) в 1-й месяц адаптации в нестерильных условиях зависят от возраста регенерантов перед высадкой в грунт, субстрата и схемы адаптации. Для успешного приспособления растений к условиям *ex vitro* их подготовка должна начинаться уже на этапе микроразмножения. Показано, что клонирование *in vitro* растений следует проводить на безгормональной питательной среде со сниженным содержанием макросолей ($\frac{1}{2}$ MS) и сахарозы (10 г/л). Это позволит получить полноценно развитые и сбалансированные по размеру побега и корневой системы растения-регенеранты, без признаков соматональной изменчивости, с сохранением у отобранных линий индивидуальных ростовых особенностей исходных клонов. Установлено, что оптимальными регламентами адаптации регенерантов березы к условиям закрытого грунта являются: 1) высадка в нестерильный субстрат 1-месячных (а не 2-месячных) растений высотой 4,5–6,0 см; 2) использование субстрата в контейнере, состоящего из смеси торфогрунта «Фаско» (включающего различные типы торфа и песок, обогащенного азотом, фосфором и калием) и перлита (3:1); 3) 2-этапная схема адаптации контейнерных растений общей длительностью выращивания 28 суток (14 суток в условиях лаборатории, затем 14 суток в теплице) с последующей их высадкой в середине мая в защищенный грунт теплицы. Выполнение перечисленных условий позволит обеспечить приживаемость растений в субстрате и грунте теплицы (до 97–99 %), их хороший рост, полноценное развитие побегов и функционирующей разветвленной корневой системы, т. е. будет способствовать реализации адаптивного потенциала толерантных к засолению линий. Полученные данные дают возможность усовершенствовать методические регламенты подготовки и адаптации устойчивых линий разных видов и разновидностей березы к условиям *ex vitro*, вырастить качественный, стандартный по размерам посадочный материал для создания испытательных культур и использования для целей защитного лесоразведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бовичева Н.А., Шабунин Д.А., Жигунов А.В., Подольская В.А. Выращивание саженцев триплоидной осины из регенерантов, полученных по технологии *in vitro* // Тр. СПбНИИЛХ. 2006. Вып. 3(16). С. 68–76.

Bovicheva N.A., Shabunin D.A., Zhigunov A.V., Podolskaya V.A. Growing of triploid aspen seedlings from regenerants obtained through *in vitro* technology. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2006, iss. 3(16), pp. 68–76. (In Russ.).

2. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Влияние кадмия на геммо- и ризогенез карельской березы // Физиология растений. 2022. Т. 69, № 4. С. 408–416.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Effect of Cadmium on Gemmation and Rhizogenesis in Karelian Birch. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2022, vol. 69, art. no. 72. <https://doi.org/10.1134/S1021443722040197>

3. Гигалошвили Т.С., Родькин О.И., Реуцкий В.Г. Условия микроклонирования формируют специфический культуральный фенотип // Биология клеток растений *in vitro*, биотехнология и сохранение генофонда. М.: ИФР РАН, 1997. С. 413.

Gigaloshvili T.S., Rod'kin O.I., Reutskij V.G. Microcloning Conditions Form a Specific Cultural Phenotype. *In vitro Plant Cell Biology, Biotechnology and Gene Pool Conservation*. Moscow, K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology RAS Publ., 1997, p. 413. (In Russ.).

4. Деменко В.И., Лебедев В.Г. Адаптация растений, полученных *in vitro*, к нестерильным условиям // Изв. ТСХА. 2011. Вып. 1. С. 60–70.

Demenko V.I., Lebedev V.G. Adaptation of *in vitro* Plants to Non-Sterile Conditions. *Izvestiya Timiryazevskoj sel'skokhozyajstvennoj akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy, 2011, iss. 1, pp. 60–70. (In Russ.).

5. Жигунов А.В. Применение биотехнологий в лесном хозяйстве России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 27–35.

Zhigunov A.V. Use of Biotechnology in the Russian Forest Sector. *Lesnoj Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 2, pp. 27–35. (In Russ.).

6. Кодун-Иванова М.А. Показатели водного стресса микроклонально размноженных растений осины *Populus tremula* при их выращивании в условиях *ex vitro* // Тр. БГТУ. 2017. Сер. 1, № 2. С. 146–155.

Kodun-Ivanova M.A. Indicators of Water-Stress of Microclonal Aspen *Populus tremula* to the *ex vitro* Conditions. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2017, ser. 1, no. 2, pp. 146–155. (In Russ.).

7. Коллекция *in vitro* клонов ценных генотипов лиственных древесных растений. Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. Режим доступа: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/569228/> (дата обращения: 03.03.24).

Collection of *in vitro* Clones of Valuable Genotypes of Deciduous Woody Plants. *Scientific and Technological Infrastructure of the Russian Federation*. (In Russ.).

8. Красинская Т.А., Кухарчик Н.В., Кастрюцкая М.С. Адаптационный процесс растений-регенерантов, выращенных в культуре *in vitro*, в условиях *ex vitro* и способы его улучшения // Плодоводство. 2010. Т. 22. С. 309–320.

Krasinskaya T.A., Kukharchik N.V., Kastritskaya M.S. Adaptation Process of Plant Regenerants after *in vitro* in *ex vitro* Conditions and Ways to Improve it. *Plodovodstvo*, 2010, vol. 22, pp. 309–320. (In Russ.).

9. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений: в 2 т. Т. 2. М.: Юрайт, 2023. 459 с.

Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Plant Physiology*: In 2 vols. vol. 2. Moscow, Yurajt Publ., 2023. 459 p. (In Russ.).

10. Макаров С.С., Антонов А.М., Александрова Ю.В., Лебедева О.П., Кузнецова И.Б. Адаптация триплоидной осины к условиям *ex vitro* с применением гидропонной установки // Сиб. лесн. журн. 2023. № 3. С. 27–33.

Makarov S.S., Antonov A.M., Alexandrova Yu.V., Lebedeva O.P., Kuznetsova I.B. Adaptation of Triploid Aspen to *ex vitro* Conditions Using a Hydroponic System. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2023, no. 3, pp. 27–33. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15372/SJFS20230304>

11. Машикина О.С., Табацкая Т.М., Внукова Н.И. Технология долгосрочного хранения в культуре *in vitro* ценных генотипов березы и выращивание на ее основе посадочного материала // Биотехнология. 2019. Т. 35, № 3. С. 57–67.

Mashkina O.S., Tabatskaya T.M., Vnukova N.I. Long-term *in vitro* Storage Technique of Valuable Birch Genotypes and Plant Production on its Basis. *Biotechnologiya* = Russian Journal of Biotechnology, 2019, vol. 35, no. 3, pp. 57–67. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21519/0234-2758-2019-35-3-57-67>

12. Михин В.И., Михина Е.А. Особенности формирования защитных насаждений из березы повислой с Центральной лесостепи России // Лесотехн. журн. 2019. № 4. С. 41–49.

Mikhin V.I., Mikhina E.A. Features of Formation of Protective Plantings from a Birch Hanging in the Central Forest-Steppe of Russia. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, no. 4, pp. 41–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/5>

13. Рахтеенко И.Н. Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений. Минск: АН БССР, 1963. 254 с.

Rakhteenko I.N. *Growth and Interaction of Root Systems of Woody Plants*. Minsk, Academy of Sciences of the Belarusian Soviet Socialist Republic Publ., 1963. 254 p. (In Russ.).

14. Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Зайцева М.И., Нелаева К.Г. Морфометрические критерии оценки качества контейнерных сеянцев хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 42–57.

Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 42–57. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-42-57>

15. Табацкая Т.М., Машикина О.С. Опыт длительного хранения коллекции ценных генотипов березы с использованием безгормональных питательных сред // Лесоведение. 2020. № 2. С. 147–161.

Tabatskaya T.M., Mashkina O.S. An Experiment of a Long-Term Preservation of a Valuable Birch Genotypes Collection Using Non-Hormone Nutrient Media. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2020, no. 2, pp. 147–161. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S0024114820020084>

16. Титов А.Ф., Шibaева Т.Г., Икконен Е.Н., Шерудило Е.Г. Реакции растений на кратковременные ежесуточные понижения температуры: феноменология и механизмы // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 6. С. 599–615.

Titov A.F., Shibaeva T.G., Ikkonen E.N., Sherudilo E.G. Plant Responses to a Daily Short-Term Temperature Drop: Phenomenology and Mechanisms. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2020, vol. 67, no. 6, pp. 599–615. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S0015330320060184>

17. Худолієва Л.В., Куцоконь Н.К. Порівняння солестійкості представників родин *Populus* і *Salix* в умовах *in vitro* // ScienceRise: Biological Science. 2018. № 2(11). С. 35–38.

Khudolieva L., Kutsokon N. *In vitro* Evaluation of Salt Tolerance of Poplars and Willows. *ScienceRise: Biological Science*, 2018, no. 2(11), pp. 35–38. (In Ukr.).

<https://doi.org/10.15587/2519-8025.2018.129702>

18. Chornobrov O., Melnyk O., Karpuk A., Vasylyshyn R. Peculiarities of Plant Adaptation of Interspecific Hybrid *Betula ex vitro*. *Scientific Horizons*, 2023, vol. 26, no. 11, pp. 49–57. <https://doi.org/10.48077/scihor11.2023.49>

19. Fernández R., Bertrand A., Casares A., García R., González A., Tamés R.S. Cadmium Accumulation and its Effect on the *in vitro* Growth of Woody Fleabane and Mycorrhized White Birch. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 152, iss. 3, pp. 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.011>

20. Jan N., Qazi H.A., Ramzan S., John R. Developing Stress-Tolerant Plants Through *in vitro* Tissue Culture: Family *Brassicaceae*. *Biotechnologies of Crop Improvement*, 2018, vol. 1, pp. 327–372. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78283-6_10

21. Kou J., Yan D., Qin B., Zhou Q., Liu C., Zhang L. Physiological Response Mechanism of European Birch (*Betula pendula* Roth) to PEG-induced Drought Stress and Hydration. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 14, art. no. 1226456. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1226456>

22. Mashkina O.S., Tabatskaya T.M., Korchagin O.M. *In vitro* Selection of Birch for Tolerance to Salinity Stress. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, art. no. 012082. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012082>

23. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, vol. 15, iss. 13, pp. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>

24. Rai M.K., Kalia R.K., Singh R., Gangola M.P., Dhawan A.K. Developing Stress Tolerant Plants through *in vitro* Selection – An Overview of the Recent Progress. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, vol. 71, iss. 1, pp. 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.10.021>

25. Rohr R., Iliev L., Scaltsoyiannes A., Tsoulpha P. Acclimatization of Micropropagated Forest Trees. *Acta Horticulturae*, 2003, vol. 616, pp. 59–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.616.3>

26. Terletskaia N., Khailenko N., Zhambakin K. Stability of Cereal Crops to Drought and Saline Stress *in vivo* and *in vitro*. *Journal of Life Sciences*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 135–144. <https://doi.org/10.17265/1934-7391/2013.02.006>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 634.739.2:581.192

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-93-106

Плантационная и дикорастущая клюква *Vaccinium oxycoccos* L. на болотах южноприбалтийского типа

С.Б. Селянина¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAG-4781-2019](https://orcid.org/0000-0003-0829-7518),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0829-7518>

Н.А. Кутакова², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [T-1150-2019](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8195-2115>

А.И. Селянина³, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9457-5505>

И.Н. Зубов¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [G-5351-2011](https://orcid.org/0000-0003-3037-2449),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3037-2449>

К.А. Кононов¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7044-7687>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163012; gumin@fciactic.ru, zubov.ivan@bk.ru, k.kononov@list.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.kutakova@narfu.ru

³Северный государственный медицинский университет, просп. Троицкий, д. 51, г. Архангельск, Россия, 163069; anastasiya.s.2020@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.23 / Одобрена после рецензирования 18.02.24 / Принята к печати 20.02.24

Аннотация. На плантации «Архангельская клюква» (Холмогорский р-н Архангельской обл.) проходят испытания несколько сортов клюквы болотной (*Vaccinium oxycoccos* L.) и гибриды, выведенные Центрально-европейской лесной опытной станцией (г. Кострома). Целью исследования является сравнение химического состава и органолептических свойств выращиваемых на плантации ягод различных сортов и дикорастущих. Образцы ягод отобраны на плантации и на соседнем болоте (дикорос) осенью 2020 и 2022 гг. и хранились в морозильной камере. Органолептические свойства оценивали дегустационным методом; размер ягод определен с 20 повторениями. Для установления влажности, зольности, суммы органических кислот применили общепринятые методы анализа, количества аскорбиновой кислоты – метод Тильманса. Спектроскопию водных экстрактов ягод проводили в диапазоне 200–800 нм. По результатам визуальной оценки ягод и измерения их величины отмечена однородность плодов гибрида 635-V и сорта Фомич. Влажность всех образцов почти одинакова – от 88,0±0,2 до 90,0±0,1 %. Зольность понижена, колеблется от 1,09±0,06 до 1,39±0,12 % а. с. в. Максимальная сумма органических кислот (25–26 % а. с. в.) обнаружена в ягодах сорта Фомич и гибрида 635-V, минимальная – в дикорастущих ягодах (19–20 % а. с. в.). По содержанию аскорбиновой кислоты превосходят остальные дикорос и гибрид. Спектры водных экстрактов ягод однотипны. Изучение особенностей состава ягод позволяет считать сорт Фомич и гибрид 635-V наиболее перспективными для лечебного питания, производства напитков и кондитерских изделий. Высокий балл органолептических показателей, внешний вид, окраска и аромат (запах) отмечены у ягод дикорастущей клюквы, однако в качестве витаминного препарата они менее привлекательны, чем произрастающие в других регионах. Результаты исследования состава и свойств ягод позволяют рекомендовать планта-

ционное выращивание клюквы болотной на болотах южноприбалтийского типа ввиду ее повышенной урожайности.

Ключевые слова: клюква болотная, органолептические свойства, аскорбиновая кислота, органические кислоты, спектральные характеристики

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 1022041100152-7-1.5.8).

Для цитирования: Селянина С.Б., Кутакова Н.А., Селянина А.И., Зубов И.Н., Кононов К.А. Плантационная и дикорастущая клюква *Vaccinium oxycoccos* L. на болотах южноприбалтийского типа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 93–106.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-93-106>

Original article

Plantation and Wild Cranberry *Vaccinium oxycoccos* L. in the Southern White Sea Type Swamps

Svetlana B. Selyanina¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAG-4781-2019](https://orcid.org/0000-0003-0829-7518), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0829-7518>

Natalia A. Kutakova^{2✉}, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [T-1150-2019](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8195-2115>

Anastasiya I. Selyanina³, Applicant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9457-5505>

Ivan N. Zubov¹, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [G-5351-2011](https://orcid.org/0000-0003-3037-2449), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3037-2449>

Kirill A. Kononov¹, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7044-7687>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prosp., 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; gumin@fciactic.ru, zubov.ivan@bk.ru, k.kononov@list.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.kutakova@narfu.ru✉

³Northern State Medical University, prosp. Troitsky, 51, Arkhangelsk, 163069, Russian Federation; anastasiya.s.2020@yandex.ru

Received on November 28, 2023 / Approved after reviewing on February 18, 2024 / Accepted on February 20, 2024

Abstract. Several varieties of swamp cranberry (*Vaccinium oxycoccos* L.) and hybrids bred by the Central European Forest Experimental Station (Kostroma) are being tested at the “Arkhangelsk Cranberry” plantation (Kholmogorsky District, Arkhangelsk Region). The aim of the study has been to compare the chemical composition and organoleptic properties of berries of different varieties grown on the plantation and wild ones. Berry samples were collected from the plantation and the neighbouring swamp (wild harvest) in the fall of 2020 and 2022 and stored in the freezer. The organoleptic properties have been assessed by the tasting method; berry size has been determined with 20 repetitions. To determine the moisture and ash content, as well as the amount of organic acids, generally accepted methods of analysis have been used; for the amount of ascorbic acid, the Tillmans method has been used. Spectroscopy of aqueous berry extracts has been carried out in the range of 200–800 nm. According to the results of visual evaluation of the berries and measurement of their size, the uniformity of the fruits of the 635-V hybrid and the Fomich variety has been noted. The moisture content of all samples has been almost the same – from 88.0 ± 0.2 to 90.0 ± 0.1 %. The ash content has been reduced, fluctuating from 1.09 ± 0.06 to 1.39 ± 0.12 % of a. d. v. The maximum amount

of organic acids (25–26 % a. d. v.) has been found in the berries of the Fomich variety and the 635-V hybrid, the minimum – in wild berries (19–20 % of a. d. v.). In terms of ascorbic acid content, they surpass other wild plants and hybrids. The spectra of aqueous extracts of berries are uniform. The study of the characteristics of the berry composition allows us to consider the Fomich variety and the 635-V hybrid the most promising for therapeutic nutrition, beverage and confectionery production. Wild cranberries have a high score of organoleptic parameters, colour and aroma (smell), however, as a vitamin supplement they are less attractive than those grown in other regions. The results of the study of the composition and properties of berries allow us to recommend plantation cultivation of cranberries in the swamps of the Southern White Sea type due to its increased yield.

Keywords: swamp cranberry, organoleptic properties, ascorbic acid, organic acids, spectral characteristics

Acknowledgements: The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. 1022041100152-7-1.5.8).

For citation: Selyanina S.B., Kutakova N.A., Selyanina A.I., Zubov I.N., Kononov K.A. Plantation and Wild Cranberry *Vaccinium oxycoccos* L. in the Southern White Sea Type Swamps. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 93–106. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-93-106>

Введение

Для северных регионов России характерно широкое распространение болот [24]. Их функционирование определяет экологическое состояние и климат в региональном и глобальном масштабах [16]. В частности, в Архангельской области заболоченность варьирует в разных районах от 8 до 50 % по данным Росреестра. Следует отметить, что на этой территории преобладают верховые болота, значительная часть которых относится к южноприбеломорскому типу.

В настоящее время осушение болот считается экологически необоснованным ввиду важности их климатообразующих, гидрологических, газорегуляторных и биотических функций. В естественном состоянии заболоченные территории малопригодны для ведения традиционной сельскохозяйственной деятельности. Однако при особых подходах их вовлечение в производственный оборот может быть достаточно эффективным.

Сохранение заболоченных ландшафтов в состоянии, близком к природному, и получение товарной продукции обеспечивает так называемое мокрое, или болотное, земледелие (Paludikulture) [19]. Оно предусматривает сбор дикоросов и культивирование болотных ягод, лекарственных растений, сфагновых мхов и др. [25]. Высокая заболоченность Архангельской области и обширность неиспользуемых территорий в совокупности с суровыми климатическими условиями определяют интерес местных предпринимателей к болотному земледелию. В частности, в 2012 г. в Холмогорском районе организован кооператив «Архангельская клюква», занимающийся выращиванием клюквы болотной *Vaccinium oxycoccos* L. [5], деятельность которого курирует филиал Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ВНИИЛМ) Центрально-европейская лесная опытная станция (ЦЕ ЛОС, г. Кострома).

Начиная с 2014 г. на опытной площадке в пределах верхового болота Дикое, относящегося к доминирующему в регионе южноприбеломорскому типу, проведены испытания различных сортов клюквы болотной российской селекции: Дар Костромы, Краса Севера [28], Фомич и гибрид 635-V. Сорты Дар Ко-

стромы и Краса Севера запатентованы в конце 90-х гг. ВНИИЛМ. Сорт Фомич является охраняемым селекционным достижением. Гибрид 635-V – результат селекции ЦЕ ЛОС, родительские формы – клюква болотная и клюква крупноплодная – проходит совместные сортоиспытания на участках кооператива. Для промышленного культивирования выбраны сорта Фомич, Дар Костромы и гибрид 635-V.

Итоги 10-летней деятельности кооператива «Архангельская клюква» указывают на рентабельность распространения этого опыта на всю область. Однако продвижение технологий болотного земледелия в регионе ограничено рядом факторов. Например, перспективы использования получаемой продукции определяются ее свойствами и составом, которые во многом обусловлены условиями произрастания и сортовой принадлежностью [15, 21].

В литературе есть отдельные публикации, посвященные характеристике ягод клюквы, как дикорастущей, так и культивируемой в Западной и Средней Сибири, Ленинградской области, республике Коми, Белоруссии и др. [2, 3, 13–15, 22]. На ЦЕ ЛОС созданы 7 российских сортов клюквы болотной: Алая заповедная, Дар Костромы, Краса Севера, Сазоновская, Северянка, Соминская, Хотавецкая. Проведено сравнение сорта Краса Севера с крупноплодной клюквой сортов американской селекции Ben Leer, Mac Farlen, Pilgrim, Stevens в условиях Москвы [6, 23]. Выведено несколько российских сортов клюквы крупноплодной: Рубиновая россыпь, Таежная красавица, Черная ранняя и др., однако по зимостойкости они уступают клюкве болотной.

Описан опыт плантационного выращивания клюквы в Удмуртии, в Нижнем Новгороде [9, 10]. Указано, что доход от эксплуатации 1 га клюквенника на верховом болоте за год в 5–7 раз превышает доход от древесины, получаемой за весь оборот рубки в аналогичных условиях произрастания [12]. Для Архангельской области этот вопрос остался без рассмотрения.

Урожайность клюквы в значительной степени определяется местом произрастания. Для Архангельской области, как указывает А.Ф. Черкасов [27], средняя урожайность клюквы болотной (дикорос) составляет 120–140 кг/га и максимальная – 250–300 кг/га. Средний урожай ягод костромских сортов клюквы на участках равняется около 10 т/га [26].

Опубликованы результаты исследований интродукции нескольких новых сортов клюквы болотной в Нижегородской области [12], продемонстрировавшие их повышенную урожайность. В работах [9, 17] отмечено, что плодоношение изученных сортов клюквы крупноплодной на плантации в Удмуртии отличается стабильностью.

Ягоды клюквы обладают рядом полезных свойств [20]. Например, крупноплодная американская клюква (*Vaccinium macrocarpon*) используется в пищевых добавках с целью улучшения состояния мочевыводящих путей [31]. В последние годы в Европе постоянно растет спрос на добавки на основе натуральных продуктов [32], продажи приближаются к 7 млрд евро в год [29]. В частности, Италия занимает лидирующие позиции в Европе по потреблению пищевых добавок растительного происхождения [30]. Антиоксидантные свойства фенольных компонентов экстрактов клюквы описаны отечественными [2, 3, 7] и зарубежными [33] авторами.

Для клюквы, выращенной на плантации, не разработаны рекомендации по эффективному использованию в связи с недостатком данных. Целью исследования является сравнение химического состава и органолептических свойств

ягод клюквы болотной (*Vaccinium oxycoccos* L.) различных сортов, выращиваемых на плантации в Архангельской области, и дикорастущих на болоте того же южноприбеломорского типа.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили ягоды клюквы болотной 2 сортов, рекомендовавших себя как наиболее продуктивные в условиях Архангельской области – Дар Костромы и Краса Севера, а также ягоды сорта Фомич и гибрида 635-V. В качестве образцов для сравнения (контроль) использовали пробы ягод дикорастущей клюквы, произрастающей на примыкающем к плантации участке болотного массива, не подверженном действию мелиорации согласно данным (<https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-arkhangelsk>). Сборы осуществляли в конце сентября 2020 и 2022 гг.

Место отбора – болото Дикое (64°06'11" с. ш. 41°035'48" в. д.), плантация ягодного кооператива «Архангельская клюква», – характерный для региона верховой болотный массив южноприбеломорского типа с преобладанием ленточно-грядового рельефа, который практически не выражен ближе к окрайкам (рис. 1). Детальная разведка проводилась Горьковским отделением института «Гипроторфразведка» в 1960 г. [1]. Подстилающие породы – песок, суглинки, глина – имеют ледниковое происхождение. Питание в основном атмосферное. Грунтовые воды подходят к поверхности. Основная часть залежи составлена малозольным верховым комплексным и фускум-торфом низкой степени разложения (5–15 % с увеличением по глубине до 20–25 %).

Абсолютные доминанты в растительном покрове болота (проективное покрытие – до 95 %) – сфагновые мхи, преимущественно мезоолиготрофные влаголюбивые виды (*Sphagnum magellanicum* Brid., *Sph. fuscum* (Schimp.) Klinggr., *Sph. angustifolium* (C. Jensen ex. Russow) C. Jensen). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (*Andromeda polifolia* L., *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr. et *palustris* Pers., *Scheuchzeria palustris* F. Muell и *Eriophorum vaginatum* L.) не превышает 25 %. Древесный ярус представлен единичными деревьями сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) формы *Uliginosa* по окрайкам болотного массива.



Рис. 1. Общий вид болотного массива Дикое в местах отбора проб:
а – естественный участок; б – участок культивирования клюквы

Fig. 1. The general view of the Dikoe swamp massif at the sampling sites:
а – natural area; б – cranberry cultivation area

На участке культивирования клюквы перед посадкой проведена расчистка гряд от сорной растительности и другие работы.

При анализе образцов клюквы размер ягод определяли весовым методом в 20 повторностях по среднему для выборки, полученной путем квартования пробы, максимальному и минимальному. Установление влажности и зольности ягод проводили общепринятыми методами [11]; pH измеряли в водных вытяжках, настоянных в течение 2 ч на кипящей водяной бане при гидромодуле 20. Спектральные исследования водных вытяжек проводили на УФ-спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в диапазоне 200–800 нм при 5-кратном разбавлении. Суммарное содержание органических кислот (ОК) в пересчете на яблочную кислоту определяли по методике, представленной в статье [18], а содержание аскорбиновой кислоты (АК) согласно [11]. Органолептические свойства оценивали дегустационным методом по расширенному списку в соответствии с ГОСТ 8756.1–2017. В опросе участвовали 35 респондентов.

Результаты исследования и их обсуждение

Отобранные для исследования образцы различных сортов клюквы болотной значительно отличаются по внешнему виду, размеру, степени однородности как диаметра и формы, так и окраски ягод (рис. 2).

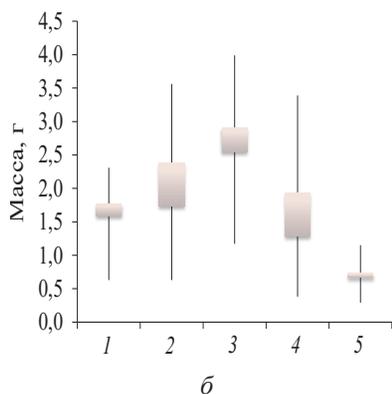


Рис. 2. Ягоды клюквы болотной: а – внешний вид и размер ягод (сбор 23 сентября 2022 г.); б – средняя, максимальная и минимальная масса ягод (усредненные данные по сборам 2020 и 2022 гг.). Сорта: 1 – гибрид 365-V; 2 – Фомич; 3 – Дар Костромы; 4 – Краса Севера; 5 – дикорос (контроль)

Fig. 2. The swamp cranberry fruits: а – appearance and size of the fruits (harvested on September 23, 2022); б – average, maximum and minimum weight of the fruits (average data on the harvests of 2020 and 2022). The varieties: 1 – 365-V hybrid; 2 – Fomich; 3 – Dar Kostromy; 4 – Krasa Severa; 5 – wild harvest (control)

Ягоды дикорастущей клюквы имеют округлую форму, равномерны по окраске, степени зрелости, линейному размеру и массе. Они значительно меньше всех рассмотренных культивируемых сортов. Гибрид 635-V также достаточно выровнен по размеру и массе, причем в большей степени, чем Фомич. Для ягод гибрида 635-V свойственна приплюснутая форма, а для сорта Фомич – округлая. Они соответственно в 2,0–2,5 и 2,0–3,5 раза крупнее, чем у дикорастущей, а по окраске и зрелости менее однородны. Ягоды сорта Краса Севера характеризуются вытянутой эллипсоидной формой и варьированием размера и зрелости в широком интервале значений. Сорт Дар Костромы отличается наиболее крупными ягодами (в 4–5 раз больше, чем у дикорастущей) приплюснутой формы с четко выраженными равномерно зрелыми гранями.

Разница во влажности между исследованными сортами не превышает 1,7–2,6 отн. % (влажность в пределах от $88,0 \pm 0,2$ до $90,0 \pm 0,1$ отн. %). Сортные различия в зольности несколько больше и достигают 15–17 % а. с. в. при низких абсолютных значениях: наименьшие ($1,09 \pm 0,06$ % а. с. в.) выявлены у ягод сорта Краса Севера, наибольшие ($1,39 \pm 0,12$ % а. с. в.) – у ягод гибрида 635-V (рис. 3).

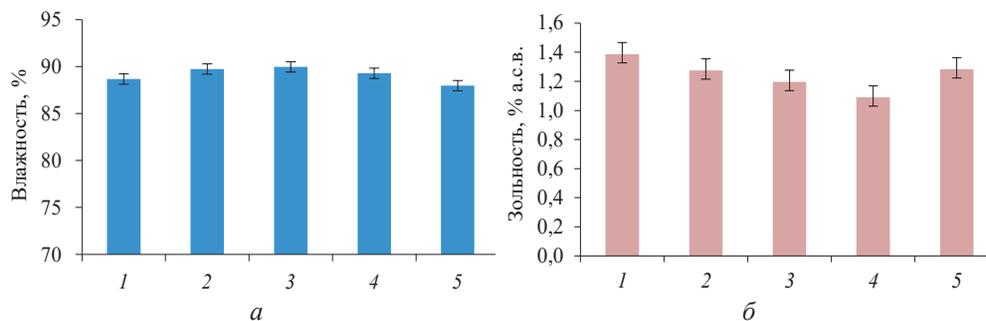
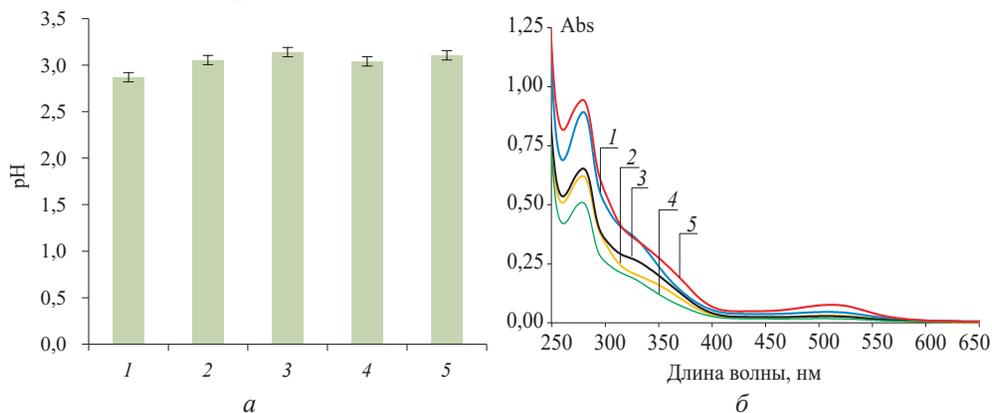


Рис. 3. Характеристика ягод клюквы болотной: *а* – влажность; *б* – зольность. Сорта – см. рис. 2

Fig. 3. The characteristics of swamp cranberry fruits: *a* – moisture content; *b* – ash content. For the names of the varieties see Fig. 2

В целях изучения химического состава проведена водная экстракция измельченных ягод при гидромодуле 20. Значения pH, спектры водных вытяжек образцов в ультрафиолетовой и видимой области, суммарное содержание ОК и массовая доля АК отражены на рис. 4. Показатель pH водных вытяжек всех исследованных сортов близки между собой (2,9–3,1).



Продолжение рис. 4

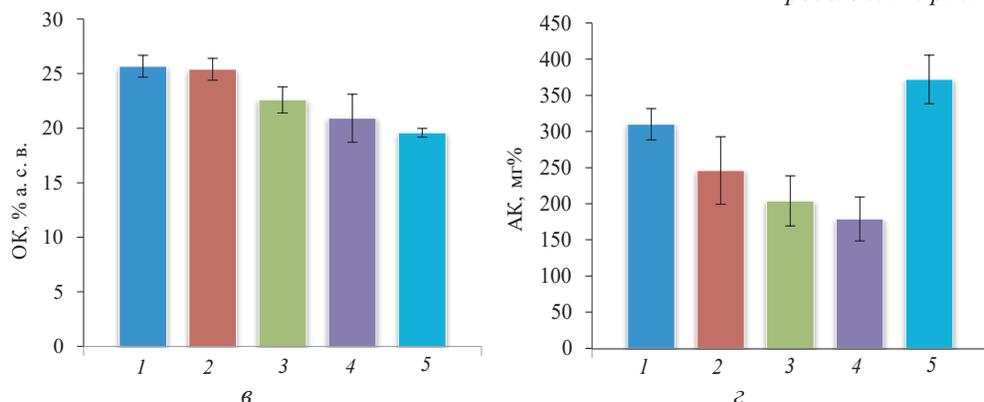


Рис. 4. Характеристика водных вытяжек из ягод клюквы болотной: *a* – pH; *б* – спектры; *в* – содержание ОК; *г* – содержание АК в сухом веществе ягод. Сорта – см. рис. 2

Fig. 4. The characteristics of aqueous extracts from swamp cranberry fruits: *a* – pH; *б* – spectra; *в* – organic acid content; *г* – ascorbic acid content in the dry matter of berries. For the names of the varieties see Fig. 2

Спектры водных вытяжек сходны у всех исследуемых образцов. На спектральных кривых в ультрафиолетовой и видимой областях прослеживается 3 максимума поглощения: в ультрафиолетовой области – при длинах волн 280 и 330 нм, на границе голубой и зеленой областей видимого спектра – при 510–520 нм. Заметны отличия в интенсивности оптической плотности – самые большие во всем диапазоне длины волн характерны для гибрида 635-V и дикороса.

Колебания в содержании кислот более заметны. Сумма ОК в наибольшем количестве (25–26 % а. с. в.) представлена в ягодах сорта Фомич и гибрида 635-V, а в наименьшем – в дикорастущих ягодах (19–20 % а. с. в.). Для сортов Дар Костромы и Краса Севера свойствен промежуточный показатель. По количеству АК сорта располагаются по убыванию следующим образом: дикорос – гибрид 635-V – Фомич – Дар Костромы – Краса Севера.

Для определения органолептических свойств разработана анкета, включающая список показателей: внешний вид, величина ягод, однородность и яркость окраски, аромат (запах), сочность, ощущение сладости, кислотность, общее впечатление от вкуса – с градацией свойств по 5-балльной шкале, и проведен опрос респондентов. Усредненные результаты обработки материалов анкетирования представлены на рис. 5.

Все изученные сорта близки к дикорастущей клюкве по кислоте, сочности и общим вкусовым ощущениям. Сахаристость выражена слабо. Высокий балл внешнего вида, окраски и аромата имеет дикорастущая клюква, пониженные оценки внешнего вида свойственны для сорта Краса Севера и окраски – для гибрида 635-V и сорта Фомич.

При рассмотрении внешнего вида и величины ягод представляется логичным наличие сортовых различий, а также значительное увеличение массы ягод у культивированных сортов клюквы болотной по сравнению с дикорастущей. Для технической переработки более привлекательно сырье с крупными и выровненными плодами, созревающими почти одновременно, например, гибрид 635-V и сорт Дар Костромы при культивировании в условиях южноприбалтийских болот.

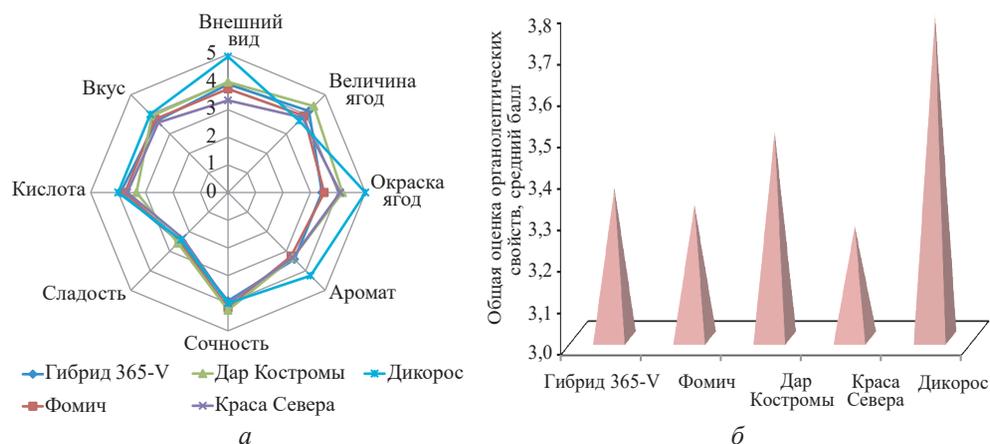


Рис. 5. Органолептические свойства ягод клюквы болотной:
 а – по отдельным характеристикам; б – по совокупности свойств

Fig. 5. The organoleptic properties of swamp cranberry fruits:
 a – by individual characteristics; б – by the totality of properties

По результатам визуального описания ягод в совокупности с данными органолептического анализа можно отметить, что наиболее равномерные по размеру и созреванию ягоды имеют более высокие показатели внешнего вида и обобщенной оценки сорта. При этом обращает внимание увеличенное значение позиций, характеризующих привлекательность для респондентов, ягод дикорастущей клюквы. Это, по-видимому, объясняется приверженностью к традиционным ягодникам для получения продуктов питания. При необходимости розничной реализации урожая изменить ситуацию может популяризация сортовой клюквы.

Влажность исследованных ягод хорошо согласуется с известными сведениями для этого вида, а зольность в 2,0–2,5 раза ниже средней [20]. Незначительные колебания значений в зависимости от сорта и низкое содержание зольных компонентов вполне закономерны ввиду одинаковости гидрологических условий и низкой торфности торфяной почвы.

Анализ водорастворимой части ягод демонстрирует сходные кислотность и спектры поглощения у всех образцов. При детальном рассмотрении спектров отчетливо прослеживается выраженный пик при длине волны 280 нм, который трактуется как характерный для низкомолекулярных соединений фенольной природы [8]. Плечо в области 330 нм следует объяснить присутствием преимущественно флавоноидов, а небольшой максимум в области 510–520 нм – антоцианами. Хорошо видна близкая пропорциональность в соотношении этих групп у всех образцов, что указывает на однотипность состава вне зависимости от сорта.

Содержание суммы ОК в исследованных ягодах клюквы болотной, произрастающей на типичном верховом болоте южноприбалтийского типа, как дикороса, так и культивируемой, близко или выше средних значений этого показателя в ягодах клюквы из других регионов России [4, 7, 14, 15], а АК – несколько понижено. Последний факт связан, по-видимому, с замедленным темпом биосинтетических процессов в условиях обедненного питания, низких температур и недостатка солнечной радиации, свойственных верховым болотам региона проведения работ.

Такие особенности состава с учетом количественных характеристик делают сорт Фомич и гибрид 635-V наиболее перспективными для лечебного питания в качестве продуктов, регулирующих обменные процессы, поддерживающих кислотно-щелочной баланс и обладающих ярко выраженным противомикробным действием. По антиоксидантным свойствам, которые приписывают АК, отличаются ягоды дикорастущей клюквы. Однако следует констатировать, что в качестве витаминного препарата они менее привлекательны, чем ягоды из других регионов.

Заключение

Образцы ягод 4 сортов клюквы болотной, выращенной на плантации «Архангельская клюква»: Дар Костромы, Краса Севера, Фомич и гибрид 635-V – по своим характеристикам близки к дикорастущей клюкве, собранной на болоте того же типа в той же местности. С учетом повышенной урожайности сортов выращивание клюквы болотной можно рекомендовать для освоения заболоченных территорий Архангельской области.

Для промышленной переработки, например, производства напитков и кондитерских изделий (мармеладов, джемов и т. д.) рекомендуются гибрид 635-V и районированный сорт Фомич, имеющие повышенное содержание органических кислот на фоне достаточно высоких органолептических показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Архангельский геологический фонд. Инв. № 329-Т (29.03.2007). *Arkhangelsk Geological Fund*, inv. no. 329-T (29.03.2007). (In Russ.).
2. Белова Е.А., Тритек В.С., Шульгау З.Т., Гуляев А.Е., Кривых Е.А., Коваленко Л.В., Дренин А.А., Ботиров Э.Х. Изучение фенольных соединений ягод трех видов растений рода *Vaccinium*, произрастающих в Ханты-Мансийском автономном округе // Химия раст. сырья. 2020. № 1. С. 107–116.
Belova Ye.A., Tritsek V.S., Shul'gau Z.T., Gulyayev A.E., Krivykh E.A., Kovalenko L.V., Drenin A.A., Botirov E.Kh. The Study of Phenolic Compounds of the Berries of Three Species of Plants of the Genus *Vaccinium* Growing in the Khanty-Mansi Autonomous Area. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2020, no. 1, pp.107–116. (In Russ.).
<https://doi.org/10.14258/jcprm.2020014534>
3. Борисенков М.Ф., Бакутова Л.А., Пещ А.В. Антиоксидантная активность водных экстрактов плодов клюквы обыкновенной (*Vaccinium oxycoccus* L.), произрастающей на территории республики Коми // Химия раст. сырья. 2014. № 4. С. 89–95.
Borisenkov M.F., Bakutova L.A., Peshch A.V. Antioxidant Activity of Water Extracts Cranberry Fruit *Vaccinium oxycoccus* L., Growing on the Republic of Komi. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2014, no. 4, pp. 89–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1304089>
4. Горбунов А.Б., Кукушкина Т.А. Динамика химического состава ягод интродуцированных сортов и форм клюквы в условиях Центрального сибирского ботанического сада СО РАН // Химия раст. сырья. 2021. № 4. С. 241–249.
Gorbunov A.B., Kukushkina T.A. Dynamics of the Chemical Composition of Berries of Introduced Cultivars and Forms of Cranberries in the Conditions of Central Siberian Botanical Garden SB RAS. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2021, no. 4, pp. 241–249. (In Russ.).
<https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048977>
5. Горлышева Е.С., Ващукова К.С., Кононов К.А., Солдатенкова М.В. Биотехнологические перспективы культивирования клюквы на севере России / Арктика вчера,

сегодня, завтра: сб. материалов Всерос. очно-заочн. науч.-практ. конф., посвящ. 220-летию со дня рожд. выдающегося полярного исследователя Петра Кузьмича Пахтусова. Архангельск, 2020. С. 272–276.

Gorlysheva E.S., Vashukova K.S., Kononov K.A., Soldatenkova M.V. Biotechnological Prospects for Cranberry Cultivation in Northern Russia. *The Arctic Yesterday, Today, Tomorrow: Collection of Materials from the All-Russian Full-Time and Part-Time Scientific and Practical Conference Dedicated to the 220th Anniversary of the Birth of the Outstanding Polar Explorer Pyotr Kuzmich Pakhtusov*. Arkhangelsk, 2020, pp. 272–276. (In Russ.).

6. Донских В.Г., Симахин М.В., Наконечная Д.В., Папушин В.Р. Сравнительная оценка плодов клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) в условиях Московской области // АгроЭкоИнфо: Электрон. научно-произв. журнал. 2022. № 5. Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_508.pdf (дата обращения: 07.04.25).

Donskikh V.G., Simakhin M.V., Nakonechnaya D.V., Pashutin V.R. Comparative Evaluation of the Fruit of the Bolt Cranberry (*Oxycoccus palustris* pers.) in the Conditions of the Moscow Region. *AgroEcoInfo: Elektronnyj nauchno-proizvodstvennyj zhurnal* = AgroEcoInfo: Electronic Science-Productive Magazine, 2022, no. 5. (In Russ.).

<https://doi.org/10.51419/202125508>

7. Еремеева Н.Б., Макарова Н.В. Изучение содержания антиоксидантов и их активности в концентрированных экстрактах из ягод клюквы (*Vaccinium oxycoccus*), облепихи (*Hippophae rhamnoides* L.), ежевики (*Rubus fruticosus*), калины (*Viburnum opulus* L.) и рябины (*Sorbus aucuparia* L.) // Химия раст. сырья. 2021. № 4. С. 157–164.

Eremeeva N.B., Makarova N.V. Study of the Content of Antioxidants and Their Activity in Concentrated Extracts of Cranberry (*Vaccinium oxycoccus*), Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.), Blackberry (*Rubus fruticosus*), Viburnum (*Viburnum opulus* L.) and Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2021, no. 4, pp. 157–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049365>

8. Колдаев В.М. Интегральные показатели спектров поглощения экстрактов из зеленых листьев // Изв. СамНЦ РАН. 2017. Т. 19, № 2(3). С. 463–467.

Koldayev V.M. Integrated Indexes of Absorption Spectrums from Green Leaves Extracts. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017, vol. 19, no. 2(3), pp. 463–467. (In Russ.).

9. Корепанова Д.Д., Новиков И.Л. Выращивание плантационной клюквы на минеральных и торфяных почвах в условиях удмуртской республики // Вестн. удмуртск. ун-та. Сер.: Биология. Науки о земле. 2011. Вып. 3. С. 43–46.

Korepanova D.D., Novikov I.L. Cultivation of Cranberries on Mineral and Peat Soils in the Conditions of the Udmurt Republic. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Nauki o zemle* = Bulletin of Udmurt University. Series: Biology. Earth Sciences, 2011, iss. 3, pp. 43–46. (In Russ.).

10. Краснова С.И. Сравнительная характеристика сортов клюквы крупноплодной и болотной // Лесопользование и гидролесомелиорация. Ч. 1. СПб.; Вологда, 2007. С. 157–162.

Krasnova S.I. Comparative Characteristics of Large-Fruited and Marsh Cranberry Varieties. *Forest Management and Hydroforestry Reclamation: Part 1*. St. Petersburg, Vologda, 2007, pp. 157–162. (In Russ.).

11. Кутакова Н.А., Богданович Н.И., Селянина С.Б., Коптелова Е.Н., Коровкина Н.В. Лабораторный практикум по технологии биологически активных веществ и углеродных адсорбентов: в 2 ч. Ч. 2. Анализ БАВ. Архангельск, 2015. 114 с.

Kutakova N.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B., Koptelova E.N., Korovkina N.V. *Laboratory Practical Training on the Technology of Biologically Active Substances and Carbon Adsorbents: in 2 Parts. Part 2. Analysis of Biologically Active Substances*. Arkhangelsk, 2015. 114 p. (In Russ.).

12. Лубенская С.И. Сравнительная оценка сортов клюквы болотной урожая 2005 года на плантации Затонского опытно-показательного лесхоза // Лесной комплекс Нижегородского Поволжья: проблемы, состояние и перспективы развития: сб. науч. ст. Н. Новгород: НГСХА, 2006. С. 210–212.

Lubenskaya S.I. Comparative Evaluation of Marsh Cranberry Varieties of the 2005 Harvest on the Plantation of the Zatonsky Experimental and Demonstration Forestry Enterprise. *Forestry Complex of the Nizhny Novgorod Volga Region: Problems, Status and Development Prospects: Collection of Scientific Articles*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2006, pp. 210–212. (In Russ.).

13. Лугинина Е.А. Содержание витаминов в плодах дикорастущих ягодных растений Севера // Современные тенденции развития технологий здоровье-сбережения: сб. тр. 7-й науч. конф. с Междунар. участием. ФГБНУ ВИЛАР, 2019. С. 222–228.

Luginina E.A. Vitamin Content in Fruits of Wild Berry Plants of the North. *Sovremennye tendentsii razvitiya tekhnologij zdorov'esberezheniya = Achievements and Perspectives for Design of New Herbal Medicines: Collection of Works of the 7th Scientific Conference with International Participation*. All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, 2019, pp. 222–228. (In Russ.).

14. Лютикова М.Н., Ботиров Э.Х. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы // Химия раст. сырья. 2015. № 2. С. 5–27.

Lyutikova M.N., Botirov E.Kh. The Chemical Composition and the Practical Application of Berries Cranberries and Cranberry. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2015, no. 2, pp. 5–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502429>

15. Меркушева Н.Н., Конохова О.М., Малькова Е.Б. Изучение биохимического состава клюквы в зависимости от сортовой и видовой принадлежности / Интродукция, сохранение и использование биологического разнообразия флоры: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию Центральн. ботан. сада НАН Беларуси. Минск, 2022. Ч. 2. С. 128–130.

Merkusheva N.N., Konyukhova O.M., Malkova E.B. Studying the Biochemical Composition of Cranberries Depending on the Variety and Species. *Introduktsiya, sokhranenie i ispol'zovanie biologicheskogo raznoobraziya flory = Assessment, Conservation and Sustainable Use of Plant Biological Diversity: Materials of the International Scientific Conference Dedicated to the 90th anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus*. Minsk, 2022, part 2, pp. 128–130. (In Russ.).

16. Минаева Т.Ю., Сирин А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи соврем. биологии. 2011. № 4(131). С. 393–406.

Minaeva T.Yu., Sirin A.A. Peatland Biodiversity and Climate Change. *Uspekhi sovremennoj biologii = Biology Bulletin Reviews*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 164–175.

17. Новиков И.Л., Чиркова Н.М. Повышение продуктивности лесных болот Удмуртской Республики интродукцией крупноплодной клюквы // Вестн. Ижевск. гос. сельскохозяйств. акад.: науч.-практ. журн. 2010. № 4(25). С. 42–43.

Novikov I.L., Chirkova N.M. Increasing the Productivity of Forest Swamps in the Udmurt Republic by Introducing Large-Fruited Cranberries. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii: nauchno-prakticheskij zhurnal = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy: Scientific and Practical Journal*, 2010, no. 4(25), pp. 42–43. (In Russ.).

18. Оленников Д.Н., Танхаева Л.М., Николаева Г.Г., Маркарян А.А. Методика количественного определения суммарного содержания органических кислот в растительном сырье // Растит. ресурсы. 2004. Вып. 3. С. 112–116.

Olennikov D.N., Tankhaeva L.M., Nikolaeva G.G., Markaryan A.A. Methodology for Quantitative Determination of Total Organic Acid Content in Plant Materials. *Rastitelnye resursy*, 2004, iss. 3, pp. 112–116. (In Russ.).

19. Панов В.В., Мисников О.С. Современные тенденции развития торфяной отрасли России // Тр. Инсторфа. 2015. № 11(64). С. 3–12.

Panov V.V., Misnikov O.S. Modern Trends of Development of Peat Industry in Russia. *Trudy Instorfa*, 2015, no. 11(64), pp. 3–12. (In Russ.).

20. Пищевая ценность и химический состав «Клюква». Режим доступа: https://health-diet.ru/base_of_food/sostav/142.php (дата обращения: 26.06.24).

Nutritional Value and Chemical Composition of "Cranberry". (In Russ.).

21. Рогожин В.В. Биохимия сельскохозяйственной продукции. СПб.: ГИОРД, 2014. 544 с.

Rogozhin V.V. *Biochemistry of Agricultural Products*. St. Petersburg, GIORD Publ., 2014. 544 p. (In Russ.).

22. Рупасова Ж.А., Гаранович И.М., Шпитальная Т.В., Павловский Н.Б., Василевская Т.И., Криницкая Н.Б., Дрозд О.В., Ленковец Т.И., Фролова Л.В., Пигуль М.Л. Интродукция малораспространенных культур плодовоговодства в условиях Беларуси (клюква крупноплодная, голубика высокорослая, актинидия аргута, актинидия коломикта, актинидия полигамная): моногр. / под ред. В.Н. Решетникова. Минск: Белорусск. наука, 2019. 210 с.

Rupasova Zh.A., Garanovich I.M., Shpital'naya T.V., Pavlovskij N.B., Vasilevskaia T.I., Krinitskaya N.B., Drozd O.V., Lenkovets T.I., Frolova L.B., Pigul' M.L. *Introduction of Rare Fruit Crops in the Conditions of Belarus (Large-Fruited Cranberry, Highbush Blueberry, Actinidia arguta, Actinidia kolomikta, Actinidia polygama)*: Monograph. Ed. by V.N. Reshetnikov. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2019. 210 p. (In Russ.).

23. Симахин М.В., Донских В.Г., Наконечная Д.В., Ладыженская О.В. Полиморфизм признаков плодов клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) в условиях Московской области // Вестн. Курск. гос. с.-х. акад. 2022. № 7. С. 57–63.

Simakhin M.V., Donskikh V.G., Nakonekhaya D.V., Ladyzhenskaya O.V. Polymorphism of Fruit Fruit of Cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.) in the Conditions of the Moscow Region. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii* = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy, 2022, no. 7, pp. 57–63. (In Russ.).

24. Сирин А.А., Маркина А.В., Минаева Т.Ю. Заболоченность Арктической зоны России // Болотные экосистемы Северо-Востока Европы и проблемы экологической реставрации в зоне многолетней мерзлоты: материалы Междунар. полевого симп. Сыктывкар: Ин-т биолог. КомиНЦ УрОРАН, 2017. С. 16–22.

Sirin A.A., Markina A.V., Minaeva T.Yu. Swampiness of the Arctic Zone of Russia. *Swamp Ecosystems of North-East Europe and Problems of Ecological Restoration in the Permafrost Zone*: Proceedings of the International Field Symposium. Syktyvkar, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 16–22. (In Russ.).

25. Татаринцева В.Г., Селянина С.Б. Перспективы использования ресурсов торфяных болот Архангельской области // Экология и управление природопользованием. Экологическая безопасность территорий (проблемы и пути решения). Томск, 2021. Вып. 4. С. 91–93.

Tatarintseva V.G., Selyanina S.B. Prospects for the Use of Peat Bog Resources in the Arkhangelsk Region. *Ecology and Environmental Management. Environmental Safety of Territories (Problems and Solutions)*. Tomsk, 2021, iss. 4, pp. 91–93. (In Russ.).

26. Тяк Г.В., Курлович Л.Е., Макеев В.А., Макеева Г.Ю., Тяк А.В. Выращивание клюквы и голубики на землях лесного фонда, вышедших из-под торфодобычи // Лесохоз. информ. 2015. № 1. С. 72–76.

Tyak G.V., Kurlovich L.E., Makeev V.A., Makeeva G.U., Tyak A.V. Cranberry and Blueberry Production in Forest Lands Abandoned after Peat Production. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2015, no. 1, pp. 72–76. (In Russ.).

27. Черкасов А.Ф., Буткус В.Ф., Горбунов А.Б. Клюква. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 214 с.

Cherkasov A.F., Butkus V.F., Gorbunov A.B. *Cranberry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 214 p. (In Russ.).

28. Ягодный кооператив «Архангельская клюква». Официальный сайт: <http://www.pitekbio.ru/sample-page> (дата обращения: 27.06.24).

Berry Cooperative "Arkhangelsk Cranberry". (In Russ.).

29. Czepielewska E., Makarewicz-Wujec M., Rózewski F., Wojtasik E., Kozłowska-Wojciechowska M. Drug Adulteration of Food Supplements: A Threat to Public Health in the European Union? *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2018, vol. 97, pp. 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.06.014>

30. Garcia-Alvarez A., Egan B., de Klein S., Dima L., Maggi F.M., Isoniemi M., Ribas-Barba L., Raats M.M., Meissner E.M., Badea M., Bruno F., Salmenhaara M., Milà-Villaruel R., Knaze V., Hodgkins C., Marculescu A., Uusitalo L., Restani P., Serra-Majem L. Usage of Plant Food Supplements across Six European Countries: Findings from the PlantLIBRA Consumer Survey. *PLOS ONE*, 2014, vol. 9, iss. 3, art. no. e92265. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092265>

31. Mannino G., Di Stefano V., Lauria A., Pitonzo R., Gentile C. *Vaccinium macrocarpon* (Cranberry)-Based Dietary Supplements: Variation in Mass Uniformity, Proanthocyanidin Dosage and Anthocyanin Profile Demonstrates Quality Control Standard Needed. *Nutrients*, 2020, vol. 12, no. 4, art. no. 992. <https://doi.org/10.3390/nu12040992>

32. Petroczi A., Taylor G., Naughton D.P. Mission Impossible? Regulatory and Enforcement Issues to Ensure Safety of Dietary Supplements. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, vol. 49, iss. 2, pp. 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.11.014>

33. Tulio Jr. A.Z., Jablonski J.E., Jackson L.S., Chang C., Edirisinghe I., Burton-Freeman B. RETRACTED: Phenolic Composition, Antioxidant Properties, and Endothelial Cell Function of Red and White Cranberry Fruits. *Food Chemistry*, 2014, vol. 157, pp. 540–552. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.047>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 581.192(574.24):582.623.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-107-120

Элементный химический состав *Populus tremula* в условиях техногенных экосистем Кузбасса

Ю.В. Загурская¹✉, канд. биол. наук; ResearcherID: [M-3233-2014](https://orcid.org/0000-0001-8101-0945),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-0945>

Т.И. Сиромля², д-р биол. наук; ResearcherID: [W-9101-2019](https://orcid.org/0000-0002-0155-2283),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-2283>

¹Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения РАН (Институт экологии человека), просп. Ленинградский, д. 10, г. Кемерово, Россия, 650065; syjil@mail.ru✉

²Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН, просп. акад. Лаврентьева, д. 8/2, г. Новосибирск, Россия, 630090; siromla@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 29.12.23 / Одобрена после рецензирования 15.03.24 / Принята к печати 17.03.24

Аннотация. *Populus tremula* L. (осина) – один из широко распространенных видов древесных растений, который до сих пор недостаточно исследован как в экологическом, так и в биогеохимическом плане. Известно, что в надземных частях осины может в повышенных количествах накапливаться Cd. Это особенно важно в связи с интересом к комплексному использованию древесных ресурсов. Цель работы – сравнительное изучение содержания химических элементов в различных органах подроста *P. tremula* при техногенном воздействии на фитоценоз. Методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа (для As и Hg – атомно-абсорбционная спектроскопия) нами проанализировано содержание 30 химических элементов в надземных органах молодых растений *P. tremula* из техногенно нарушенных местообитаний Кузбасса (юг Западной Сибири), в т. ч. на зарастающих породных отвалах угольных карьеров. Между содержанием золы или отдельных химических элементов и типом нарушения экотопов зависимость не обнаружена. Суммарное количество химических элементов увеличивается от коры к листовой пластине, т. е. по мере продвижения к более физиологически активным органам. Самая низкая зольность характерна для коры, у стеблей она выше, при этом не было выявлено зависимости зольности от возраста, а у «чистых» и «запыленных» стеблей статистически значимо отличались концентрации Al, Ca, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si и Ti. Запыленные черешки, кроме указанных элементов, содержали больше Ba, Be, La, Pb, Sc и Zr, листовые пластины еще и V, Y, Yb. Между зольностью и содержанием перечисленных химических элементов установлена прямая сильная корреляционная связь – 0,64–0,87 для стеблей и 0,75–0,93 для черешков и листьев. Уровень Cd в листьях, черешках и некоторых образцах коры *P. tremula* превышает предельно допустимую концентрацию для растительного лекарственного сырья. Отсутствие взаимосвязи содержания этого элемента с запыленностью образцов свидетельствует о том, что высокие концентрации Cd в надземных органах обусловлены видовыми особенностями *P. tremula*, а именно высоким транслокационным потенциалом.

Ключевые слова: *Salicaceae*, осина обыкновенная, антропогенное воздействие, элементный химический состав, органоспецифичность, растительные ресурсы, тяжелые металлы, биогенные элементы, рекультивация отвалов угольных карьеров, Кемеровская область

© Загурская Ю.В., Сиромля Т.И., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания № 124041100075-7 по проекту «Разработка научных основ оценки состояния и восстановления флористического разнообразия *in situ* и *ex situ* в регионах с высокой степенью деградации экосистем в результате антропогенного и техногенного воздействий», 2024–2025 гг., FWEZ-2024-0022, и по проектам госзаданий ИПА СО РАН.

Для цитирования: Загурская Ю.В., Сиromля Т.И. Элементный химический состав *Populus tremula* в условиях техногенных экосистем Кузбасса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 107–120. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-107-120>

Original article

The Elemental Chemical Composition of *Populus tremula* in the Conditions of Technogenic Ecosystems of Kuzbass

Yulia V. Zagurskaya¹✉, Candidate of Biology; ResearcherID: [M-3233-2014](https://orcid.org/0000-0001-8101-0945),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-0945>

Tatiana I. Siromlya², Candidate of Biology; ResearcherID: [W-9101-2019](https://orcid.org/0000-0002-0155-2283),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-2283>

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of Human Ecology), prosp. Leningradskij, 10, Kemerovo, 650065, Russian Federation; syjil@mail.ru✉

²Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva, 8/2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; siromlya@issa-siberia.ru

Received on December 29, 2023 / Approved after reviewing on March 15, 2024 / Accepted on March 17, 2024

Abstract. *Populus tremula* L. (aspen) is one of the widespread species of woody plants, which has not yet been sufficiently studied in both ecological and biogeochemical terms. It is known that Cd can accumulate in elevated quantities in the above-ground parts of aspen. This is especially important in connection with the interest in the integrated use of wood resources. The aim of this work has been a comparative study of the content of chemical elements in various organs of *P. tremula* undergrowth under technogenic effects on the phytocenosis. Using the method of atomic emission spectrometric analysis (for As and Hg – atomic absorption spectroscopy), we have analyzed the content of 30 chemical elements in the aboveground organs of young *P. tremula* plants from technogenically disturbed habitats of Kuzbass (south of Western Siberia), including on overgrown rock dumps and coal pits. No relationship has been found between the content of ash or individual chemical elements and the type of ecotope disturbance. The total number of chemical elements increases from the bark to the leaf blade, i.e. as you move towards more physiologically active organs. The lowest ash content is typical for bark, it is higher for stems, while no dependence of ash content on age has been found, and the concentrations of Al, Ca, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si and Ti have been statistically significantly different in the “clean” and “dusty” stems. In addition to the above elements, “dusty” petioles have contained more Ba, Be, La, Pb, Sc and Zr, and the leaf blades have also contained V, Y and Yb. A direct strong correlation has been established between the ash content and the content of the listed chemical elements: 0.64–0.87 for stems and 0.75–0.93 for petioles and leaves. The Cd level in leaves, petioles and some bark samples of *P. trem-*

ula exceeds the maximum permissible concentration for herbal medicinal raw materials. The absence of a correlation between the content of this element and the dustiness of the samples indicates that high Cd concentrations in the aboveground organs are due to the species characteristics of *P.tremula*, namely its high translocation potential.

Keywords: *Salicaceae*, common aspen, anthropogenic impact, elemental chemical composition, organ-specificity, plant resources, heavy metals, biogenic elements, reclamation of coal pit dumps, the Kemerovo Region

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment no. 124041100075-7 on the project “Development of Scientific Foundations for Assessing the State and Restoration of Floral Diversity *in situ* and *ex situ* in Regions with a High Degree of Ecosystem Degradation as a Result of Anthropogenic and Technogenic Impacts”, 2024–2025, FWEZ-2024-0022 and projects of the state assignments of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Zagurskaya Yu.V., Siromlya T.I. The Elemental Chemical Composition of *Populus tremula* in the Conditions of Technogenic Ecosystems of Kuzbass. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 107–120. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-107-120>

Введение

Осина *Populus tremula* L. (Salicaceae) – лиственное древесное растение, произрастающее в прохладных умеренных и бореальных районах, оно газо- и засухоустойчиво, нетребовательно к почвенным условиям. Вид очень широко распространен в Евразии: входит в число лесообразующих и является одной из 5 доминантных древесных культур европейской части России [8, 13, 23, 35].

Часто именно осина выполняет роль содоминанта для многих хвойных пород и служит основным или благоприятным альтернативным субстратом для многих редких эпифитов. Как и большинство видов родов *Salix* L. и *Populus* L., осина может не только проникать в устойчивые лесные сообщества, особенно в пограничных зонах, но и массово распространяться на поврежденных территориях, способствуя восстановлению почвы и растительности и развитию продуктивных биоценозов [30, 38]. На начальном этапе распространения данный вид, как правило, выступает в качестве примеси к основным лесообразующим породам и характеризует усложнение фитоценоза (часто – переход на следующую сукцессионную стадию) [15].

Ранее в России ресурсы различных таксонов осины связывали исключительно с европейской частью и умеренным климатом, но со временем ареал этой культуры активно расширяется в северном направлении. Кроме того, выявлена тенденция к увеличению площадей осиновых насаждений (по официальным данным, до 24–25 млн га с запасом до 3715 млн м³) [24].

В настоящее время применение растений *P. tremula* L. как источника промышленной древесины незначительно по объему и малопопулярно в связи с экологическими и биологическими особенностями этого вида, однако активно изучаются способы дополнительной обработки такого сырья и альтернативные направления его хозяйственного использования [18, 24]. Интерес к комплексному вовлечению лесных ресурсов в производственные процессы за последние десятилетия резко возрастает, что подтверждается многочисленными публика-

циями и широкой географией объектов исследования [5]. Комплексный подход в данном случае заключается в применении всех частей растений, включая кору, листья и тонкие ветки, а также сучковые зоны древесины [2, 5, 21]. Идет поиск перспективных природных форм растений (устойчивость к болезням, качество древесины, декоративность) и способов их размножения, а также селекционная работа с целью озеленения населенных пунктов, внедрения новых культур в лесное хозяйство и их высадки для биологической рекультивации нарушенных территорий [4, 23, 31, 33, 36].

На данный момент в восстановлении нуждаются значительные площади почв, подвергшиеся сильному техногенному воздействию (вплоть до полного разрушения нативных экосистем) при карьерной разработке угольных месторождений [11, 12, 22]. Открытый способ добычи угля в Кузбассе становится все более распространенным в связи с высокой экономической эффективностью, относительной простотой и безопасностью. Сегодня карьерная разработка месторождений составляет более 70 % объема угледобычи [12, 22]. К сожалению, до недавнего времени работы по рекультивации карьеров зачастую не предусматривали обязательный биологический этап (мероприятия по восстановлению почв и растительности). Следствием этого является длительное возобновление продуктивных биогеоценозов, ограниченное целым рядом факторов: недостаточными эдафическими и гидрологическими ресурсами территорий, спектром видов в окружающих экотопах, их адаптивной способностью и т. п. Тем не менее, процессы естественного возобновления растительности происходят не только на землях, вышедших из сельскохозяйственного использования [6], но и на техногенно нарушенных территориях, прилегающих к угольным карьерам [16].

Особую опасность представляет то, что во вскрышных породах могут содержаться потенциально токсичные химические элементы (Pb, Hg, As, Cd и др.) [1], способные аккумулироваться в растениях или их частях. Ранее было установлено, что осина – единственный из доминантных древесных видов европейской части России – может в повышенных концентрациях накапливать в надземных органах Cd, экологически опасный химический элемент (ХЭ) [8].

Цель работы – сравнительное исследование содержания ХЭ в надземных органах растений *Populus tremula* при техногенном воздействии на фитоценоз.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили ценопуляции молодых деревьев *P. tremula* 10–15 лет, не достигших больших размеров и без признаков генеративных процессов (подрост), появившиеся в результате самовосстановления растительности на территории разреза «Кедровский» (г. Кемерово). Материал собирали 1–5 августа 2015 г. из 4 ценопопуляций с различными экологическими характеристиками: 1) территория с ненарушенным почвенным слоем без интенсивной транспортной нагрузки – контроль; 2) зарастающий породный отвал, возраст около 30 лет; 3) породный отвал возрастом около 30 лет, рекультивированный сосной, расположен на расстоянии около 50 м от насыпи отвала действующего карьера; 4) обочина технологической дороги на территории разреза с регулярным движением горнодобывающей техники и дизельного круп-

ногабаритного транспорта. Все растения, по результатам оценки жизненного состояния, здоровы.

С некоторых близко растущих деревьев (6–10 экз. в каждой ценопопуляции) отбирали по несколько веток длиной 25–30 см с разных сторон кроны на высоте 1,5–2,0 м. Листья отрывали от стеблей и разделяли на черешок и листовую пластину (зрелые, неповрежденные, среднего размера). Стебли побегов 1-го года отсортировывали от более ранних (развитие от 2 до 4 лет в зависимости от длины междоузлий). Кору брали с нескольких экземпляров, срезая кусочки по 1–2 см² со стволов и приствольных частей побегов с разных сторон дерева на высоте 1,5–2,0 м.

Таким образом, исследованы образцы листовых пластинок, черешков листа, стебли побегов 1-го года, 2–4-го годов (многолетние) и кора. Из образцов с индивидуальных растений в каждой популяции составляли объединенные пробы по типу материала, по возможности с учетом запыленности: запыленные и условно чистые. Из них отбирали по 3 средних образца, которые затем анализировали в 3 аналитических повторностях.

Элементный химический состав образцов изучали после сухого озоления методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа при помощи дугового аргонового 2-струйного плазмотрона (Россия), спектрометра PGS-2 (Германия), многоканального анализатора эмиссионных спектров (Россия). Концентрации As (ГОСТ Р 51766–2001) и Hg (ГОСТ Р 53183–2008) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). В качестве стандартов использовали образцы листа березы (ГСО 8923–2007), травосмеси (ГСО 8922–2007) и элодеи канадской (ГСО 8921–2007). Результаты определения ХЭ не выходили за рамки их аттестованных значений.

Экспериментальные данные статистически обрабатывали с помощью пакета программ Statistica 10. Для большинства исследованных ХЭ оказалось характерно анормальное (логарифмическое) распределение, поэтому были рассчитаны медианные значения (Med) и размах выборок (min–max). Дисперсионный анализ проводился по методу Краскела–Уоллиса, корреляционный – по методу Спирмена, критический уровень значимости во всех случаях принимался равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка полученных данных позволила установить, что между однотипными образцами из различных местообитаний статистически значимая разница отсутствует.

Результаты исследования элементного химического состава *P. tremula* представлены в таблице. Настолько подробная «детализация» была предпринята с целью наиболее точно выявить распределение ХЭ по органам растений, поскольку оно может значительно варьировать как в зависимости от анатомо-морфологических особенностей, так и из-за воздействия внешних факторов. Следует отметить, что нами были обнаружены статистически значимые отличия в элементном химическом составе листьев *P. tremula*, характеризующихся разным уровнем зольности [39], что, как правило, свидетельствует об аэрогенном поступлении ряда ХЭ с пылевыми частицами (в т. ч. в виде поверхностного загрязнения).

Содержание ХЭ в различных органах подроста *Populus tremula* (мг/кг воздушно-сухого вещества) и их общая зольность (%), Med (min–max)
 The content of chemical elements in various organs of *Populus tremula* undergrowth (mg/kg on air-dry basis) and their total ash content (%),
 Med (min–max)

Элемент	Кора	Стебли		Черешки	Листовые пластинки
		многолетние	1-летние		
Зола	3,5 (3,3–4,0)	4,8 (4,2–4,9) 5,5 (5,2–6,8)	4,5 (3,8–4,8) 5,1 (4,9–5,6)	7,0 (6,8–7,2) 9,6 (9,4–10,4)	7,0 (6,3–8,7) 9,4 (9,0–10,0)
Al	246 (170–264)	210 (150–280) 340 (320–350)	75 (70–105) 240 (180–300)	430 (290–515) 780 (645–890)	970 (600–1870) 3530 (3270–3600)
B	16 (9–20)	15 (14–19)	18 (15–22)	33 (26–38)	86 (40–170)
Ba	29 (14–36)	38 (26–65)	32 (27–43)	48 (45–57) 90 (86–94)	49 (29–63) 92 (86–98)
Be	0,02 (0,01–0,02)	0,02 (0,02–0,04)	0,02 (0,02–0,03)	0,03 (0,02–0,04) 0,07 (0,05–0,08)	0,05 (0,03–0,07) 0,09 (0,09–0,10)
Ca	8390 (4780–9170)	11 600 (9180–14 540) 17 260 (15 370–19 160)	10 460 (8970–11 220) 13 800 (13 650–15 110)	14 540 (13 900–15 130) 24 360 (22 150–28 600)	15 810 (11 730–17 900) 20 700 (18 220–22 050)
Cd	0,5 (0,3–1,2)	0,4 (0,2–0,5)	0,3 (0,2–0,4)	1,4 (0,7–2,3)	1,0 (0,7–1,9)
Co	0,12 (0,10–0,17)	0,11 (0,09–0,13)	0,11 (0,09–0,17)	0,26 (0,21–0,28)	1,0 (0,9–1,6)
Cr	0,25 (0,12–0,29)	0,27 (0,23–0,31) 0,54 (0,48–0,60)	0,23 (0,18–0,25) 0,42 (0,36–0,50)	0,43 (0,32–0,55) 0,91 (0,74–1,06)	1,0 (0,5–1,2) 1,8 (1,7–2,2)
Cu	8,6 (6,4–14,2)	4,9 (4,5–6,5)	7,1 (5,9–9,7)	4,1 (2,9–5,3)	6,8 (5,2–8,1)
Fe	79 (66–85)	68 (56–79) 140 (130–160)	44 (40–64) 148 (128–168)	108 (95–134) 185 (171–205)	370 (230–600) 810 (700–850)
Ga	0,05 (0–0,05)	0,05 (0,04–0,06) 0,08 (0,07–0,10)	0,04 (0,03–0,05) 0,08 (0,07–0,09)	0,08 (0,07–0,09) 0,14 (0,13–0,16)	0,16 (0,08–0,20) 0,35 (0,32–0,38)
K	7200 (6700–7840)	6080 (3060–9020)	7370 (4500–10 800)	12 660 (9140–16 750)	7370 (6050–10 600)
La	0,16 (0,14–0,17)	0,18 (0,14–0,36)	0,13 (0,11–0,30)	0,30 (0,28–0,35) 0,50 (0,45–0,67)	0,48 (0,28–0,64) 1,06 (0,92–1,12)
Mg	940 (470–1065)	1400 (970–2140)	1500 (1260–2100)	2550 (2230–3360)	3110 (1820–4210)

Mn	10 (9–14)	$\frac{16(14-18)}{32(31-36)}$	$\frac{12(11-18)}{30(21-44)}$	$\frac{33(26-38)}{142(130-164)}$	$\frac{60(47-100)}{190(178-215)}$
Mo	0,08 (0,06–0,10)	0,11 (0,08–0,16)	0,14 (0,06–0,17)	0,15 (0,13–0,17)	0,18 (0,11–0,40)
Na	26 (20–40)	$\frac{16(13-20)}{36(31-42)}$	$\frac{12(9-20)}{33(27-40)}$	$\frac{25(19-36)}{55(44-78)}$	$\frac{35(26-88)}{124(106-154)}$
Ni	0,6 (0,5–0,7)	0,7 (0,5–1,1)	1,8 (1,5–3,2)	1,4 (0,6–1,6)	3,6 (2,5–4,8)
P	470 (270–680)	640 (520–930)	1230 (820–1620)	950 (460–2590)	1450 (920–2390)
Pb	0,30 (0,24–0,43)	0,25 (0,15–0,42)	0,18 (0,10–0,36)	$\frac{0,26(0,24-0,28)}{0,45(0,36-0,54)}$	$\frac{0,49(0,33-0,65)}{0,75(0,70-0,89)}$
Sc	0,01 (0,01–0,03)	0,02 (0,01–0,04)	0,02 (0,01–0,05)	$\frac{0,02(0,01-0,03)}{0,06(0,05-0,08)}$	$\frac{0,12(0,03-0,14)}{0,27(0,24-0,30)}$
Si	390 (320–470)	$\frac{356(237-490)}{724(635-820)}$	$\frac{246(216-450)}{736(673-800)}$	$\frac{750(620-790)}{1420(1360-1510)}$	$\frac{4790(2570-5630)}{10\,500(9980-11\,000)}$
Sn	0,4 (0,1–0,6)	0,3 (0,2–0,9)	0,5 (0,3–1,0)	0,5 (0,2–0,8)	0,6 (0,4–1,2)
Sr	42 (16–47)	75 (40–104)	64 (43–93)	110 (62–153)	110 (38–166)
Ti	13 (7–16)	$\frac{8(6-10)}{16(14-20)}$	$\frac{6(4-8)}{19(13-25)}$	$\frac{12(11-16)}{30(25-33)}$	$\frac{36(21-52)}{120(115-136)}$
V	0,4 (0,2–0,9)	0,3 (0,3–0,5)	0,3 (0,2–0,5)	0,6 (0,4–0,9)	$\frac{0,9(0,5-1,5)}{2,1(2,0-2,2)}$
Y	0,1 (0,1–0,2)	0,11 (0,09–0,20)	0,08 (0,06–0,16)	0,22 (0,09–0,35)	$\frac{0,4(0,1-0,5)}{0,8(0,7-0,9)}$
Yb	0,01 (0,01–0,02)	0,01 (0,01–0,02)	0,01 (0,01–0,02)	0,02 (0,01–0,03)	$\frac{0,04(0,02-0,06)}{0,08(0,07-0,09)}$
Zn	83 (42–104)	73 (49–101)	87 (62–96)	160 (70–254)	215 (120–512)
Zr	0,7 (0,4–0,8)	0,7 (0,6–1,4)	0,7 (0,5–1,2)	1,8 (0,9–2,3)	$\frac{2,6(1,1-3,3)}{5,4(5,0-5,9)}$

Примечание. В числителе – показатели для «чистых» образцов, в знаменателе – для «запыленных», при наличии только одного показателя статистически значимая разница между ними отсутствует.

Среди всех изученных органов и частей осины самая низкая зольность и минимальная вариабельность данного показателя характерны для коры. Вероятно, в связи с этим разница между чистыми и запыленными образцами была статистически незначима.

Объемная доля коры деревьев значительна и варьирует от 7 до 25 % в зависимости от древесной породы, однако большинство технологий лесопереработки базируется на использовании неокоренной древесины, поэтому образуются большие объемы коры, которые зачастую не находят рационального применения [2]. Тем не менее, кора осины давно и разносторонне используется в народной медицине, а в настоящее время рассматривается возможность внедрения осиновой коры в таком качестве в официальную практику [7, 10, 17, 28], в первую очередь в ветеринарии [14]. Для создания технологии рациональной переработки коры необходимы более глубокие сведения о ее свойствах и химическом составе, которые, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор остаются недостаточными [7, 9, 17].

Зольность стеблей осины выше, чем зольность ее коры, однако содержание большинства исследованных ХЭ находится в примерно одинаковых интервалах. Са, Sr, Р и Ni обнаружены в коре в меньших количествах по сравнению со стеблями, а Си накапливается более интенсивно, чем во всех остальных органах. Отдельно необходимо обратить внимание на Cd – в части проб коры данный элемент присутствует в объеме более 1 мг/кг, что превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) для биологически активных добавок (СанПиН 2.3.2.1078–01) и лекарственного растительного сырья [3]. Способность осины к повышенному накоплению в надземных органах Cd уже отмечалась ранее [8]. Более подробно особенности элементного химического состава коры *P. tremula* рассмотрены в работе [9].

Определение общего содержания золы в стеблях дало следующие результаты. Зольность чистых и запыленных образцов статистически значимо отличалась как для 1-летних, так и для многолетних стеблей, однако зависимость зольности от возраста в данном случае выявлена не была. Статистически значимые отличия в элементном химическом составе чистых и запыленных стеблей были обнаружены для Al, Са, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si и Ti; коэффициенты корреляции между содержанием перечисленных элементов и зольностью изменялись от 0,64 до 0,87. Это хорошо соотносится с литературными данными, поскольку именно Al, Cr, Fe, Si, Ti рассматриваются в качестве индикаторов присутствия педогенных частиц в растениях [34], а в статье [37] отмечают, что на потенциальный атмосферный источник загрязнения надземных органов *P. purdomii* Rehder указывает повышенное содержание в них Cr.

Наибольшей зольностью характеризуются листья. Зольность черешков и листовых пластин статистически значимо не отличаются между собой, но эта разница наблюдается между чистыми и запыленными образцами. Мы уже отмечали повышенное содержание ХЭ в листьях с увеличенной запыленностью для *P. tremula*, [39] и ряда других видов [20]. Помимо Al, Са, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si и Ti, в запыленных черешках содержится больше Ba, Be, La, Pb, Sc и Zr, а в листовых пластинах еще и V, Y, Yb. Вероятно, статистически значимые различия для этих элементов не были выявлены для стеблей из-за низкой концентрации в них ХЭ – в листьях она значительно выше. Для зольности и содержания указанных ХЭ отмечена прямая сильная корреляционная связь (0,75–0,93). Несмотря на близкую зольность, элементный химический состав черешков и листовых

пластин имеет значительные отличия – в основном, в последних содержится большее количество ХЭ.

Проведено сравнение элементного химического состава листьев с так называемым Reference Plant [27]. В исследованных нами образцах несколько меньше К, Мо, Мп, Na, Pb, относительно близкие концентрации Ва, Cr, Cu, P, содержание преобладающей части остальных ХЭ в 2–10 раз выше. Отдельно стоит отметить Al, Be, Cd, Ti и Zr – их уровни выше на порядок и более. Однако вряд ли это является особенностью *P. tremula*, причина может быть связана с недостаточно точными средними значениями содержаний данных ХЭ. Так, показатели кларков по [19] в 30 раз выше для Al, в 100 раз – для Be, в 6 раз – для Ti и в 75 раз – для Zr. Впрочем, кларк Cd в 10 раз меньше – 0,005 мг/кг, и ранее мы уже неоднократно высказывали сомнения в обоснованности данного значения, поскольку за 10 лет исследований более 30 видов различных растений концентрации менее 0,1 мг/кг нам не встречались.

Содержание Cd превышает ПДК в большей части рассмотренных проб как черешков, так и листовых пластин. В других органах его количество явно ниже, хотя в отдельных образцах коры доходит до 1,2 мг/кг. Достаточно высокие уровни Cd приводятся в литературе для древесины с корой (1,2 мг/кг), при этом для самой древесины показатель более низкий [32]. Также для листьев *P. nigra* L. отмечают значительно повышенные по сравнению с стеблями и корнями концентрации Cd [26]. Однако в работе [37] наравне с подобными фактами, объясняемыми хорошим транслокационным потенциалом Cd, приводятся и противоположные – корневая компарментация Cd у трансгенных тополей; кроме того, в некоторых случаях в накоплении Cd разными органами растений выявлены лишь незначительные различия.

Концентрация Pb, напротив, намного ниже ПДК во всех исследованных органах и при этом находится практически в одном диапазоне – 0,10–0,65 мг/кг, статистически значимо отличаясь лишь в запыленных листьях (0,7–0,9 мг/кг). Низкая биодоступность Pb отмечалась и ранее [26] – так, например, *P. alba* и *P. nigra* могут связывать бóльшую часть Pb в вакуолях клеток корня, тем самым защищая физиологически уязвимые органы от токсичного воздействия металла. Однако есть и другие данные [37] – в опытах, сопровождающихся изменениями элементного химического состава почвы, в разных сериях содержание Pb могло быть выше как в корнях, так и в листьях.

Содержание As и Hg по результатам данного исследования оказалось ниже предела обнаружения методом ААС – 0,03 и 0,01 мг/кг соответственно.

Стоит отметить, что в упомянутой обзорной работе [37] проведен мета-анализ поглощения тяжелых металлов различными видами *Populus* – рассмотрены Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn, выбранные по их экологической значимости и доступности данных. Указано, что из более чем 15 000 публикаций, лишь в 29 содержались необходимые для сравнения данные, причем они были представлены для 11 разных видов, клонов и гибридов, а число изученных элементов – по 1–2 в 15 публикациях и лишь в 7 статьях – 5 и более элементов. Авторы приводят многочисленные примеры, подтверждающие, что закономерности накопления различных элементов в органах видов *Populus* крайне противоречивы.

Литературные данные об элементном химическом составе именно *P. tremula* крайне ограничены. В работе [25] приводятся сведения о содержании ХЭ в листьях *P. tremula*, произрастающей на территории Ханты-Мансийского авто-

номного округа – Югры (мкг/г): Al – 15, As – 0,05, B – 17, Ca – 2483, Cd – 0,1, Co – 1,9, Cr – 0,1, Cu – 1,2, Fe – 13, K – 3414, Mg – 1358, Mn – 126, Na – 1003, Ni – 2,8, P – 1784, Pb – 0,1, Si – 262, Sn – 0,13, Sr – 18, V – 0,04, Zn – 28. Сравнение с представленными в таблице концентрациями ХЭ в листовых пластинах показало, что довольно близки данные лишь для 4 элементов – Co, Mn, Ni, P. В листьях из названного региона в 6–30 раз выше содержание Na, а все остальные элементы содержатся в значительно меньших количествах – от 2–3 раз до 20–50 и более, хотя остается непонятным, чем может быть вызвана настолько резкая разница.

Опубликованные в работе чешских авторов [38] данные практически совпадают с полученными нами по Ca, K, P, но по Mg несколько выше (5500 мг/кг). *P. tremula* × *tremuloides* в Финляндии [29] содержит в ветвях и листьях (мг/кг) 22–47 и 170–410 Al, 3–14 и 4–35 Cd, 1,0–1,1 и 0,6–1,0 Cr, 8–11 и 9–11 Cu, 42–46 и 180–220 Fe, 1–3 и 4–16 Ni, 1200–2600 и 2400–4400 P, 3–5 и 8–46 Pb, 0,3–0,6 и 0,7–1,0 V, 140–340 и 640–2400 Zn. Количество большинства исследованных ХЭ хорошо соотносится с нашими данными в т. ч. и по характеру распределения – накопление в листьях выше, чем в ветвях. Чрезвычайно высокие концентрации Cd, Pb и Zn объясняются тем, что растения выращивались на загрязненной тяжелыми металлами почве. В статье [37] также показано, что тяжелые металлы накапливались в *Populus* spp., произрастающих на загрязненных почвах, в значительно больших концентрациях, чем у особей на незагрязненных почвах.

Заключение

Максимум большинства изученных химических элементов из всех органов осины сосредоточен в листьях, за исключением Cu (в коре) и K (в черешках), в черешках отмечаются чуть меньшие количества. Только для Cd, Cu, Fe, Na, Pb, Ti, V содержание в коре оказалось выше, чем в стеблях, для остальных 22 исследованных элементов – меньше или равно. Для многолетних стеблей по сравнению с 1-летними зафиксирован несколько больший объем Ba, Fe, Ti, Pb. Аналогичным образом изменяется и зольность исследованных органов: кора < многолетние стебли < 1-летние стебли < черешки < листовые пластины.

Разница в содержании многих изученных химических элементов в листьях *P. tremula* и среднемировых значений Reference Plant, а также кларковых значений объясняется недостаточно точно установленными средними показателями количества химических элементов, в т. ч. соотношением различных тканей. Литературные сведения по вопросу весьма немногочисленны и неоднородны, встречаются как близкие к полученным нами содержания элементов, так и гораздо более низкие и высокие концентрации.

Отмечено превышение предельно допустимой концентрации для лекарственного растительного сырья по содержанию Cd в листьях, черешках и отдельных пробах коры осины (до 200 % от предельно допустимой концентрации). Количество остальных химических элементов (для которых прописаны требования) находится в пределах данных нормативов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Артамонова В.С., Бортникова С.Б. Биогеохимическая характеристика корнеобитаемого слоя травянистых растений на рекультивированных участках техногенных отходов // Вестн. Пермск. ун-та. Сер.: Биология. 2022. Вып. 2. С. 155–163.

Artamonova V.S., Bortnikova S.B. Biogeochemical Characteristics of the Root Layer of Herbaceous Plants in Recultivated Areas of Man-Made Waste. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya* = Bulletin of Perm University. Biology, 2022, iss. 2, pp. 155–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-2-155-163>

2. Гарипов Н.Р. Сравнительный анализ состава и содержания некоторых экстрактивных компонентов древесины и коры осины (*Populus tremula* L.) // Лесохоз. информ.: Электрон. сетев. журн. 2016. № 1. С. 65–70.

Garipov N.R. Comparative Analysis of Structure and Maintenance of Some Extractive Components of Wood and Bark of the Aspen (*Populus tremula* L.). *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2016, no. 1, pp. 65–70. (In Russ.).

3. Государственная фармакопея Российской Федерации. Изд. 14. Т. 4. М.: Мин-во здрав. РФ, 2018. 1833 с.

State Pharmacopoeia of the Russian Federation. 14th ed. Vol. 4. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation, 2018. 1833 p. (In Russ.).

4. Гродецкая Т.А., Баранов О.Ю., Ржевский С.Г., Федюлова Т.П., Шабанова Е.А., Константинов А.В., Машикина О.С. Молекулярно-генетический анализ размноженных *in vitro* клонов *Populus alba* L. и *Populus tremula* L. с использованием микросателлитных маркеров // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 3(43). С. 16–30.

Grodetskaya T.A., Baranov O.Yu., Rzhhevskiy S.G., Fedulova T.P., Shabanova E.A., Konstantinov A.V., Mashkina O.S. Molecular-Genetic Analysis of Propagated *in vitro* clones of *Populus alba* L. and *Populus tremula* L. Using Microsatellite Markers. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 3(43), pp. 16–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/2>

5. Грязькин А.В., Чан Ч.Т., Ван Х.В., Прокофьев А.Н., Хоанг М.А. Комплексная оценка сырьевых ресурсов березняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 23–35.

Gryazkin A.V., Trung T.T., Van H.V., Prokof'yev A.N., Hoang M.A. Integrated Assessment of Raw Material Resources of Birch Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 1, pp. 23–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-23-35>

6. Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С. Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагrogenных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 65–76.

Danilov D.A., Yakovlev A.A., Suvorov S.A., Krylov I.A., Korchagov S.A., Khamitov R.S. Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>

7. Дейнеко И.П., Фаустова Н.М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия раст. сырья. 2015. № 1. С. 51–62.

Deineko I.P., Faustova N.M. Element and Group Chemical Composition of Aspen Bark and Wood. *Khimija Rastitel' nogo Syr' ja*, 2015, no. 1, pp. 51–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201501461>

8. Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25, № 2. С. 253–270.

Zheleznova O.S., Chernykh N.A., Tokratov S.A. Zinc and Cadmium in Tree Species of Forest Ecosystems: Patterns of Translocation, Accumulation and Barrier Mechanisms. *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel' nosti* = RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 253–270. (In Russ.).

<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270>

9. Загурская Ю.В., Сиромля Т.И. Элементный химический состав коры осины на отвалах угольных карьеров Кузбасса // Природно-ресурсный потенциал и экологическая реабилитация деградированных ландшафтов: материалы науч.-практ. конф. Грозный: Чеченск. гос. ун-тет им. А.А. Кадырова, 2023. С. 142–145.

Zagurskaya Y.V., Siromlya T.I. Elemental Chemical Composition of Aspen Bark from Kuzbass Coal Mining Dumps. *Prirodno-resursnyj potentsial i ekologicheskaya rehabilitatsiya degradirovannykh landshaftov*: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference. Kadyrov Chechen State Univeristy, 2023, pp. 142–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.36684/86-1-2023-142-145>

10. Кароматов И.Дж., Расулова Х.Н. Осина – перспективы использования в медицине (обзор литературы) // Биология и интегративная медицина. 2017. № 3. С. 157–162.

Karomatov I.D., Rasulova H.N. Aspen – the Prospects of Use in Medicine (The Review of Literature). *Biologiya i integrativnaya meditsina*, 2017, no. 3, pp. 157–162. (In Russ.).

11. Копытов А.И., Масаев Ю.А., Масаев В.Ю. Влияние технологии взрывных работ на состояние окружающей среды в Кузбассе // Уголь. 2020. № 5. С. 57–62.

Kopytov A.I., Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Impact of Blasting Technology on the Environment in Kuzbass. *Ugol' = Russian Coal Journal*, 2020, no. 5, pp. 57–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-5-57-62>

12. Копытов А.И., Шаклеин С.В. Направление совершенствования стратегии развития Угольной отрасли Кузбасса // Уголь. 2018. № 5. С. 80–86.

Kopytov A.I., Shaklein S.V. Trends of Kuzbass Coal Industry Improvement Strategy. *Ugol' = Russian Coal Journal*, 2018, no. 5, pp. 80–86. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-5-80-86>

13. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Гео, 2012. 707 с.

Koropachinskij I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of Asian Russia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2012. 707 p. (In Russ.).

14. Кузнецова С.А., Скворцова Г.П., Мороз А.А., Королькова И.В., Счисленко С.А., Левданский В.А., Кузнецов Б.Н., Чесноков Н.В. Получение ветеринарных препаратов из коры осины и изучение их лечебно-профилактических свойств при экспериментальном эшерихиозе животных // Журнал СФУ. Химия. 2018. Т. 11, № 4. С. 604–615.

Kuznetsova S.A., Skvortsova G.P., Moroz A.A., Korolkova I.V., Schislenko S.A., Levdansky V.A., Kuznetsov B.N., Chesnokov N.V. Obtaining Veterinary Preparations from Aspen Bark and the Study of Their Therapeutic and Prophylactic Properties in Experimental Escherichiosis of Animals. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 604–615. (In Russ.). <http://doi.org/10.17516/1998-2836-0103>

15. Леднев С.А., Шарпова А.В., Семенов И.Н., Королева Т.В. Растительные сукцессии на отвалах угольных шахт в лесостепи Тульской области // Изв. РАН. Сер.: Геогр. 2020. Т. 84, № 2. С. 239–245.

Lednev S.A., Sharapova A.V., Semenov I.N., Koroleva T.V. Plant Successions on Coal Mines' Waste Piles in Forest-Steppe of the Tula Oblast. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 239–245. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556620020089>

16. Манаков Ю.А. Особенности зарастания отвалов на разных стадиях восстановительной сукцессии в Кузбассе // Успехи современного естествознания. 2012. № 11. Ч. 1. С. 132–134.

Manakov J.A. The Characteristics of Revegetation on the Rock Dups at Different Stages of Regenerative Successions in Kuzbass. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Science*, 2012, no. 11, part 1, pp. 132–134. (In Russ.).

17. Мартынов А.М., Чупарина Е.В. Исследование фенольных соединений и элементного состава коры *Populus tremula* L. // Сиб. мед. журн. (Иркутск). 2015. Т. 133, № 2. С. 118–120.

Martynov A.M., Chuparina E.V. Examination of Phenol Compounds and Element Composition of Common Aspen Bark (*Populus tremula* L.). *Sibirskij medicinskij zhurnal (Irkutsk) = Baikal Medical Journal*, 2015, vol. 133, no 2, pp. 118–120. (In Russ.).

18. Никулина Н.С., Вострикова Г.Ю., Дмитренков А.И., Филимонова О.Н., Никулин С.С. Защитная обработка древесины смолой на основе фракции C_0 , модифицированной отходами полиметилметакрилата // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6(342). С. 138–143. Nikulina N.S., Vostrikova G.Yu., Dmitrenkov A.I., Filimonova O.N., Nikulin S.S. Protective Processing of Wood on the Basis of C_0 Fraction Modified by Polymethyl Methacrylate Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 6(342), pp. 138–143. (In Russ.).
19. Романкевич Е.А. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы) // Геохимия. 1988. № 2. С. 292–306. Romankevich E.A. Living Matter of the Earth (Biogeochemical Aspects of the Problem). *Geokhimiya* = Geochemistry International, 1988, no. 2, pp. 292–306. (In Russ.).
20. Сиromля Т.И. Химические элементы в растениях – фолиарный путь поступления // Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека: тр. XI Междунар. биогеохимич. школы. Тула: ТГПУ, 2019. Т. 2. С. 262–266. Siromlya T.I. Plant Chemical Elements – Foliar Uptake. *Biogeochemistry – the Scientific Basis for Sustainable Development and Protection of Human Health: Proceedings of the XI International Biogeochemical School*. Tula, Tula State Pedagogical University, 2019, vol. 2, pp. 262–266. (In Russ.).
21. Соболева С.В., Воронин В.М., Есякова О.А. Содержание биологически активных веществ водно-этанольных экстрактов из коры осины и изучение их рострегулирующей активности // Химия раст. сырья. 2020. № 1. С. 373–380. Soboleva S.V., Voronin V.M., Esyakova O.A. The Content of Biologically Active Substances Water-Alcohol Extracts of Aspen Bark. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 373–380. (In Russ.). <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020014442>
22. Уразбаев Х.К. Открытый способ добычи угля // Актуал. проблемы современности. 2021. № 1(31). С. 182–186. Urazbayev H.K. An Open Way of Extracting Coal. *Aktualnye problemy sovremennosti* = Actual Problems of Modern Times, 2021, no. 1(31), pp. 182–186. (In Russ.).
23. Царев А.П. Многообразие использования древесины тополей // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 48–64. Tsarev A.P. The Diversity of Use of Poplar Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 5, pp. 48–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.48>
24. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Лаур Н.В. Селекционные испытания факториальных гибридов *Populus tremula* L. в ювенильном возрасте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 9–20. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Laur N.V. Breeding Tests of Juvenile Factorial Hybrids of *Populus tremula* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 9–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-9-20>
25. Шевченко О.С., Нехоросhev С.В. Минеральный состав листьев осины обыкновенной, произрастающей на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием). Пермь: Пермск. нац. исслед. политехн. ун-т, 2021. Т. 2. С. 206–209. Shevchenko O.S., Nekhoroshev S.V. Mineral Composition of the Leaves of the Common Aspen Growing on the Territory of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation)*. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2021, vol. 2, pp. 206–209. (In Russ.).
26. Baldantoni D., Cicatelli A., Bellino A., Castiglione S. Different Behaviours in Phytoremediation Capacity of Two Heavy Metal Tolerant Poplar Clones in Relation to Iron and Other Trace Elements. *Journal of Environmental Management*, 2014, vol. 146, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.045>
27. Dunn C.E. Biogeochemistry in Mineral Exploration. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, 2007, vol. 9, pp. 1–460. [https://doi.org/10.1016/S1874-2734\(07\)09001-8](https://doi.org/10.1016/S1874-2734(07)09001-8)

28. Guleria S., Singh H., Sharma V., Bhardwaj N., Arya S.K., Puri S., Khatri M. Polyhydroxyalkanoates Production from Domestic Waste Feedstock: a Sustainable Approach towards Bio-Economy. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 340, art. no. 130661. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130661>
29. Hassinen V., Vallinkoski V.-M., Issakainen S., Tervahauta A., Kärenlampi S., Servomaa K. Correlation of Foliar *MT2b* Expression with Cd and Zn Concentrations in Hybrid Aspen (*Populus tremula* × *tremuloides*) Grown in Contaminated Soil. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, iss. 3, pp. 922–930. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.023>
30. Kivinen S., Koivisto E., Keski-Saari S., Poikolainen L., Tanhuanpää T., Kuzmin A., Viinikka A., Heikkinen R.K., Pykälä J., Virkkala R., Vihervaara P., Kumpula T. A Keystone Species, European Aspen (*Populus tremula* L.), in Boreal Forests: Ecological Role, Knowledge Needs and Mapping Using Remote Sensing. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 462, art. no. 118008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118008>
31. Kozlov M.V., Zverev V. Suitability of European Aspen (*Populus tremula*) for Rehabilitation of Severely Polluted Areas. *Russian Journal of Ecology*, 2022, vol. 53, no. 3, pp. 181–190. <https://doi.org/10.1134/S1067413622030067>
32. Pesonen J., Kuokkanen T., Kaipainen E., Koskela J., Jerkku I., Pappinen A., Villa A. Chemical and Physical Properties of Short Rotation Tree Species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, vol. 72, pp. 769–777. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0841-5>
33. Platonov A.D., Snegireva S.N., Drapalyuk M.V., Novikov A.I., Kantyeva E.V., Novikova T.P. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 11, art. no. 1758. <https://doi.org/10.3390/f13111758>
34. Reimann C., Koller F., Frengstad B., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P. Comparison of the Element Composition in Several Plant Species and Their Substrate from a 1 500 000-km² area in Northern Europe. *Science of the Total Environment*, 2001, vol. 278, iss. 1–3, pp. 87–112. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00890-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00890-1)
35. Rogers P.C., Pinno B.D., Šebesta J., Albrechtsen B.R., Li G., Ivanova N., Kusbach A., Kuuluvainen T., Landhäusser S.M., Liu H., Myking T., Pulkkinen P., Wen Z., Kulakowski D. A Global View of Aspen: Conservation Science for Widespread Keystone Systems. *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 21, art. no. e00828. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00828>
36. Thakur A.K., Kumar P., Parmar N., Shandil R.K., Aggarwal G., Gaur A., Srivastava D.K. Achievements and Prospects of Genetic Engineering in Poplar: a Review. *New Forests*, 2021, vol. 52, pp. 889–920. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09836-3>
37. Tózsér D., Horváth R., Simon E., Magura T. Heavy Metal Uptake by Plant Parts of *Populus* Species: a Meta-Analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 69416–69430. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27244-2>
38. Veselá H., Lhotáková Z., Albrechtová J., Frouz J. Seasonal Changes in Tree Foliage and Litterfall Composition at Reclaimed and Unreclaimed Post-Mining Sites. *Ecological Engineering*, 2021, vol. 173, art. no. 106424. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106424>
39. Zagurskaya Yu.V., Siromlya T.I., Kotsupiy O.V., Babaeva E.Yu., Ufimtsev V.I. Physiological and Biochemical Characteristics of *Populus tremula* Leaves in Anthropogenic Disturbed Habitats. *BIO Web of Conferences: IV(VI)th All-Russia Scientific-Practical Conference “Prospects of Development and Challenges of Modern Botany”*, 2018, vol. 11, art. no. 00050. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20181100050>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article

УДК 634.739

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-121-131

Adaptation Features of Kamchatka Bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) Plants Grown *in vitro*

Natal'ya R. Sungurova^{1✉}, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: H-1847-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Sergey S. Makarov², *Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Anton I. Chudetsky², *Candidate of Agriculture; ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

Yuliya S. Cheryatova², *Candidate of Biology, Assoc. Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2225>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.sungurova@narfu.ru[✉]

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; s.makarov@rgau-msha.ru, chudetski@rgau-msha.ru, u.cheryatova@rgau-msha.ru

Received on November 23, 2023 / Approved after reviewing on February 18, 2024 / Accepted on February 20, 2024

Abstract. Currently, the demand for berry products with high nutritional and medicinal value is increasing. To preserve biodiversity and industrial propagation, it is necessary to grow plants *in vitro* and create a gene bank. Kamchatka bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) is one of the valuable and rare forest berry plants, which requires the improvement of accelerated propagation technologies for further cultivation. The aim of the study has been to investigate the adaptation features of *in vitro* propagated *V. praestans* plants under *ex vitro* conditions and in open ground. The objects of the study have been *V. praestans* plants (2 hybrid forms and 3 selected forms from natural populations) obtained by the *in vitro* method. Morphometric parameters of the regenerated plants have been taken into account under *ex vitro* conditions when grown on various substrates (high-moor peat; peat + river sand 3:1; peat + vermiculite 3:1; peat + perlite 3:1; peat + zeolite 3:1) treated with aqueous solutions of growth stimulants (Zircon 0.5 ml/l; Epin-extra 0.5 ml/l). When adapting *ex vitro*, the highest survival rates (90 %), number of shoots (3.8 pcs. on average) and number of leaves (5.1 pcs. on average) of the *V. praestans* regenerated plants on the 28th day after transplantation have been revealed on a substrate made of a mixture of peat and zeolite (3:1) when treated with Epin-extra 0.5 ml/l. For the first time, the morphometric parameters and yield dynamics of *V. praestans* plants obtained by clonal propagation have been studied in open ground conditions in the natural and climatic conditions of Moscow, the Kostroma Region and the Khabarovsk Territory. The maximum shoot length in 2022–2023 was recorded in hybrid form 235261 (7.0–7.4 cm on average). The highest yield of 2–5-year-old *V. praestans* plants in open ground conditions has been noted in hybrid forms (362.75–383.0 g/m² on average) and has varied depending on the growing area.

Keywords: Kamchatka bilberry, *Vaccinium praestans*, adaptation, *ex vitro*, survival rate, introduction, morphometric parameters, yield

Acknowledgements: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the agreement on

the provision of a grant in the form of subsidies from the Federal budget for state support for the creation and development of a world-class scientific centre “Agrotechnologies of the Future”.

For citation: Sungurova N.R., Makarov S.S., Chudetsky A.I., Cheryatova Yu.S. Adaptation Features of Kamchatka Bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) Plants Grown *in vitro*. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 121–131.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-121-131>

Научная статья

Особенности адаптации растений красники (*Vaccinium praestans* Lamb.), выращенных *in vitro*

Н.Р. Сунгурова[✉], д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

С.С. Макаров², д-р с.-х. наук; *ResearcherID*: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

А.И. Чудецкий², канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0001-5614-2225),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2225>

Ю.С. Черятова², канд. биол. наук, доц.; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2225>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.sungurova@narfu.ru[✉]

²Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; s.makarov@rgau-msha.ru, chudetski@rgau-msha.ru, u.cheryatova@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 23.11.23 / Одобрена после рецензирования 18.02.24 / Принята к печати 20.02.24

Аннотация. В настоящее время возрастает спрос на ягодную продукцию с высокой пищевой и лекарственной ценностью. Для сохранения биоразнообразия и промышленного размножения необходимо выращивание растений в культуре *in vitro* и создание генетического банка. Красника (*Vaccinium praestans* Lamb.) – одно из ценных и редких лесных ягодных растений, для его дальнейшего культивирования требуется совершенствование технологий ускоренного размножения. Цель исследования – изучение особенностей адаптации полученных *in vitro* растений *V. praestans* в условиях *ex vitro* и в открытом грунте. Объекты исследования – растения *V. praestans* (2 гибридные формы и 3 отборные формы из природных популяций), выращенные методом *in vitro*. Учитывали морфометрические показатели растений-регенерантов в условиях *ex vitro* при культивировании на различных субстратах (торф верхового типа; торф + речной песок 3:1; торф + вермикулит 3:1; торф + перлит 3:1; торф + цеолит 3:1) с обработкой водными растворами стимуляторов роста (Циркон 0,5 мл/л; Эпин-экстра 0,5 мл/л). При адаптации *V. praestans ex vitro* наибольшие приживаемость (90 %), число побегов (в среднем 3,8 шт.) и листьев (в среднем 5,1 шт.) на 28-е сутки после пересадки выявлены у растений-регенерантов на субстрате из смеси торфа с цеолитом (3:1) при обработке препаратом Эпин-экстра 0,5 мл/л. Впервые в условиях открытого грунта в природно-климатических условиях г. Москвы, Костромской области и Хабаровского края изучали морфометрические показатели и динамику урожайности растений *V. praestans*, полученных методом клональ-

ного размножения. Максимальная длина побега в 2022–2023 гг. отмечена у гибридной формы 235261 (в среднем 7,0–7,4 см). Наибольшая урожайность 2–5-летних растений *V. praestans* в открытом грунте зафиксирована у гибридных форм (в среднем 362,75–383,0 г/м²) и различается в зависимости от района выращивания.

Ключевые слова: красника, *Vaccinium praestans*, адаптация, *ex vitro*, приживаемость, интродукция, морфометрические показатели, урожайность

Благодарности: Работа выполнена при содействии Минобрнауки России в рамках соглашения о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

Для цитирования: Sungurova N.R., Makarov S.S., Chudetsky A.I., Cheryatova Yu.S. Adaptation Features of Kamchatka Bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) Plants Grown *in vitro* // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 121–131.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-121-131>

Introduction

The genus *Vaccinium* L. (family Ericaceae) contains more than 4 thousand species, of which the most valuable are representatives of the subfamily *Vaccinioideae*, widespread in Europe, Southeast and Central Africa, Asia, North and Central America. Berry crops of the Ericaceae family are among the best dietary sources of biologically active compounds, which are of great interest to nutritionists and food technologists [7, 9]. The main biologically active substances identified in *Vaccinium spp.* include anthocyanins (cyanidin, malvidin, and delphinidin), flavonoids (quercetin, isoquercetin, and astragalins), phenolic acids (gallic, P-coumaric, cinnamic, syringic, ferulic and caffeic acids), and iridoids [2, 17]. Numerous scientific studies of *Vaccinium spp.* fruits confirm their high content of biologically active substances with pronounced antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory properties, helping in the fight against diabetes, obesity, cancer, atherosclerosis, rheumatoid arthritis, neurodegenerative and cardiovascular diseases, etc. In addition, *Vaccinium spp.* plants, especially those with a high content of polyphenols such as anthocyanins, are believed to be able to inhibit and initiate apoptosis in cancer cells. Scientists have described the inhibition of tumor growth, angiogenesis and metastasis when using extracts of *Vaccinium spp.* fruits [1, 3, 8, 10, 19].

Currently, there is a growing demand throughout the world for products of wild berry plants with high nutritional and medicinal value, including Kamchatka bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.), which has become widespread mainly only in the regions of its natural growth [11, 24]. The nutritional and functional properties of Kamchatka bilberry described in literature justify the growing interest in this berry crop. *V. praestans* fruits are a rich source of micronutrients and phytochemical compounds beneficial to health, such as organic acids, sugars, vitamins, fiber, and phenolic compounds [12, 18, 20–22].

Taking into account the limited range and reduction of natural populations of *V. praestans* due to the increasing anthropogenic load and unregulated exploitation of berry lands, as well as the unavailability of plant material outside the Russian Far East, the most optimal and effective method of reproduction of this species today is clonal micropropagation [5, 15, 16]. The creation of an *in vitro* gene bank will contribute to the preservation of the gene pool of economically valuable forms of Kam-

chatka bilberry and the possibility of their further breeding and industrial cultivation. At the same time, additional research is needed on the adaptation of regenerated plants in non-sterile *ex vitro* conditions – one of the most difficult stages of micro-plant development.

The aim of this study has been to investigate the adaptation features of *in vitro* propagated *V. praestans* plants under *ex vitro* conditions and in open ground.

Research Objects and Methods

The objects of the study have been the most productive forms of *V. praestans* selected in places of their natural growth – Sakhalin (the Korsakovsky District of the Sakhalin Region), Iturup (the Kurilsky District of the Sakhalin Region), Khabarovsk (the Khabarovsk District of the Khabarovsk Territory), as well as the promising hybrid forms created on their basis – 129634 and 235261 – candidates for varieties (see Figure).



The hybrid forms of *V. praestans* in the variety testing sites:
a – 129634; *b* – 235261

Studies on clonal plant micropropagation have been carried out according to generally accepted methods [13]. At the stage of adaptation to non-sterile *ex vitro* conditions, regenerated plants have been transplanted from the first 10 days of March to the third 10 days of May into substrates made of high-moor peat ($\text{pH}_{\text{KCl}} - 2.8 \dots 3.5$), which has been pre-steamed (sterilized) at a temperature of $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$, including a mixture with river sand (in a ratio of 3:1), vermiculite (3:1), perlite (3:1) and fine-grained zeolite (3:1). At that, the river sand has been pre-washed and calcined at a temperature of $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 2 hours. The plants have been adapted under illumination of 8,000 lux, air temperature of $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a relative air humidity of 80–90%. In addition, the plants have been sprayed with aqueous solutions of growth stimulants Zircon (Nest-M, Russia) at a concentration of 0.5 ml/l and Epin-extra (Nest-M, Russia) at a concentration of 0.5 ml/l; spraying with water has been used as control. After 14 and 28 days after transplantation, plant survival rate has been considered, as well as the number of shoots and the number of leaves per plant.

After 90 days of adaptation, the planting material has been transplanted to variety testing sites in various natural and climatic conditions: in the central part of the European part of Russia – the Kostroma District of the Kostroma Region (LLC “Krem”), Moscow (the Arboretum named after R.I. Schroeder of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy); in the Far East of Russia – the Lazo District of the Khabarovsk Territory (Agricultural Consumer Processing Supply and Marketing Cooperative “Berry Symphony”). The plants

have been planted according to a 1.5×0.3 m pattern in prepared trenches 1.5 m wide and 0.5 m deep, filled with high-moor peat. The morphometric parameters of plants have been taken into account, such as shoot length (cm), lamina dimensions (cm), inflorescence length (mm), flower diameter (mm), fruit diameter (mm) and weight (g). The yield has been determined by the weight of berries per unit area (g/m²) [23].

Statistical processing of experimental data has been carried out using generally accepted methods [6] and Microsoft Office Excel 2019 software.

Results and Discussion

As a result of the conducted experimental studies, it has been established that when adapting to non-sterile *ex vitro* conditions, the regenerated *V. praestans* r plants obtained by the method of clonal micropropagation have had the highest survival rate (90 %) when grown on a substrate made of a mixture of peat and zeolite (3:1) with simultaneous treatment with Epin-extra growth stimulant 0.5 ml/l. The survival rate has been lower on peat substrates, peat-sand mixtures 3:1, peat-vermiculite mixtures 3:1, also with Epin-extra treatment 0.5 ml/l (75, 70 and 68 %, respectively). The lowest plant survival rate has been observed on a substrate made of a mixture of peat and perlite 3:1 (45–60 %). At the same time, no statistically significant differences have been found in the number of plant shoots depending on the substrate and preparation treatment, although the values have been maximal when treated with Epin-extra. There have also been no significant differences in the number of leaves, however, on the 28th day of adaptation, the highest values have been observed in the substrate variant made of a mixture of peat and zeolite 3:1, and the highest values have been observed when treated with Epin-extra 0.5 ml/l and Zircon 0.5 ml/l (5.1 and 4.7 pcs. on average, respectively) (Table 1).

Table 1

The survival rate and morphometric parameters of *V. praestans* plants during adaptation to non-sterile *ex vitro* conditions depending on the adaptation timing and treatment with growth-stimulating preparations

Substrate	Treatment option	Survival rate, %	Number of shoots, pcs.	Number of leaves, pcs.
<i>On the 14th day</i>				
High-moor peat	Control (water)	60	2.6±0.36	3.2±0.35
	Zircon 0.5 ml/l	69	2.4±0.28	3.0±0.26
	Epin-extra 0.5 ml/l	75	3.0±0.11	3.1±0.19
Peat + river sand 3:1	Control (water)	52	2.5±0.40	3.6±0.27
	Zircon 0.5 ml/l	66	2.6±0.32	2.9±0.31
	Epin-extra 0.5 ml/l	70	2.8±0.19	3.0±0.25
Peat + vermiculite 3:1	Control (water)	57	3.0±0.12	3.3±0.32
	Zircon 0.5 ml/l	48	2.6±0.36	3.5±0.19
	Epin-extra 0.5 ml/l	68	2.2±0.30	3.8±0.11
Peat + perlite 3:1	Control (water)	45	2.3±0.29	3.1±0.06
	Zircon 0.5 ml/l	50	2.2±0.21	3.3±0.11
	Epin-extra 0.5 ml/l	60	2.1±0.23	3.4±0.18
Peat + zeolite 3:1	Control (water)	50	2.0±0.25	3.2±0.11
	Zircon 0.5 ml/l	61	2.6±0.31	3.7±0.13
	Epin-extra 0.5 ml/l	90	2.8±0.17	3.0±0.18

End of Table 1

Substrate	Treatment option	Survival rate, %	Number of shoots, pcs.	Number of leaves, pcs.
<i>On the 28th day</i>				
High-moor peat	Control (water)	60	2.9±0.31	3.8±0.38
	Zircon 0.5 ml/l	69	3.0±0.33	4.0±0.21
	Epin-extra 0.5 ml/l	75	3.1±0.18	3.8±0.26
Peat + river sand 3:1	Control (water)	52	2.7±0.41	3.9±0.25
	Zircon 0.5 ml/l	66	2.9±0.32	3.3±0.34
	Epin-extra 0.5 ml/l	70	3.2±0.17	3.5±0.26
Peat + vermiculite 3:1	Control (water)	57	3.0±0.10	3.5±0.34
	Zircon 0.5 ml/l	48	2.6±0.36	4.0±0.15
	Epin-extra 0.5 ml/l	68	2.0±0.16	3.9±0.10
Peat + perlite 3:1	Control (water)	45	2.5±0.27	3.4±0.10
	Zircon 0.5 ml/l	50	2.9±0.30	3.7±0.17
	Epin-extra 0.5 ml/l	60	2.8±0.28	3.8±0.16
Peat + zeolite 3:1	Control (water)	50	2.2±0.23	3.4±0.10
	Zircon 0.5 ml/l	61	2.9±0.34	4.7±0.26
	Epin-extra 0.5 ml/l	90	3.8±0.44	5.1±0.53

V. praestans plants adapted to non-sterile *ex vitro* conditions and fully ready for transplantation have been planted in experimental open ground plots with high-moor peat in various growing areas. The morphometric parameters of the plants of the studied Kamchatka bilberry forms are presented in Table 2.

Table 2

The average morphometric parameters of introduced *V. praestans* plants in various growing areas

Parameter	Testing site					
	Moscow		The Kostroma Region		The Khabarovsk Territory	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023
<i>Hybrid form 129634</i>						
Shoot length, cm	6.6±0.47	6.9±0.42	6.5±0.42	6.4±0.44	6.6±0.42	6.8±0.48
Lamina length, cm	6.2±0.44	6.2±0.49	5.9±0.41	6.0±0.43	6.4±0.50	6.5±0.52
Lamina width, cm	3.5±0.31	3.2±0.29	2.9±0.30	3.0±0.32	3.4±0.36	3.4±0.36
Inflorescence length, mm	14.9±1.23	15.2±1.23	14.6±1.14	14.8±1.19	15.5±1.15	16.0±1.23
Flower diameter, mm	6.4±0.59	6.5±0.56	6.5±0.44	6.2±0.49	6.7±0.61	7.0±0.64
Fruit diameter, mm	11.1±1.08	11.2±1.04	11.8±1.06	12.1±1.11	11.5±0.89	11.8±0.98
Fruit weight, g	1.6±0.16	1.7±0.14	1.6±0.13	1.6±0.15	1.8±0.15	1.9±0.18
<i>Hybrid form 235261</i>						
Shoot length, cm	7.1±0.58	7.2±0.62	7.0±0.62	7.1±0.65	7.2±0.74	7.4±0.71
Lamina length, cm	3.8±0.31	4.1±0.38	3.8±0.32	4.0±0.32	4.3±0.38	4.5±0.41
Lamina width, cm	2.5±0.26	2.6±0.29	2.4±0.25	2.5±0.28	2.7±0.35	2.8±0.30
Inflorescence length, mm	18.4±0.85	18.2±0.89	17.7±0.82	17.6±0.79	19.0±0.92	19.5±0.98
Flower diameter, mm	9.0±0.40	9.2±0.43	9.0±0.25	8.9±0.22	9.4±0.22	9.7±0.27

End of Table 2

Parameter	Testing site					
	Moscow		The Kostroma Region		The Khabarovsk Territory	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023
Fruit diameter, mm	13.2±1.06	13.5±1.09	14.0±1.03	14.1±1.06	14.2±1.10	14.5±1.12
Fruit weight, g	1.7±0.18	1.6±0.16	1.6±0.19	1.6±0.17	1.7±0.22	1.8±0.20
<i>The Sakhalin form</i>						
Shoot length, cm	6.4±0.44	6.5±0.40	6.1±0.32	6.0±0.36	6.5±0.50	6.9±0.52
Lamina length, cm	5.7±0.35	6.0±0.39	5.5±0.30	5.7±0.35	5.9±0.44	6.0±0.48
Lamina width, cm	3.3±0.24	3.4±0.26	2.5±0.23	2.6±0.25	3.2±0.31	3.0±0.32
Inflorescence length, mm	14.2±1.07	14.4±1.10	14.5±0.99	14.8±1.03	15.4±1.16	15.6±1.12
Flower diameter, mm	6.3±0.50	6.4±0.54	5.9±0.40	6.0±0.43	6.8±0.60	6.6±0.58
Fruit diameter, mm	9.6±0.90	10.0±0.96	11.2±0.95	11.6±0.98	10.4±0.94	10.5±0.98
Fruit weight, g	1.5±0.10	1.6±0.12	1.6±0.14	1.5±0.11	1.6±0.18	1.7±0.12
<i>The Iturup form</i>						
Shoot length, cm	5.8±0.54	6.0±0.58	6.1±0.65	6.5±0.60	6.7±0.62	7.0±0.68
Lamina length, cm	3.7±0.32	3.8±0.34	3.7±0.34	3.8±0.36	4.1±0.45	4.2±0.40
Lamina width, cm	2.4±0.25	2.5±0.27	2.6±0.27	2.4±0.26	2.4±0.37	2.6±0.34
Inflorescence length, mm	14.5±1.04	14.8±1.09	16.2±0.60	16.5±0.62	17.5±0.84	18.1±0.80
Flower diameter, mm	7.3±0.52	7.5±0.59	8.2±0.40	8.4±0.42	9.1±0.26	9.4±0.29
Fruit diameter, mm	11.2±0.98	10.9±0.92	12.8±1.06	13.0±1.02	13.8±1.00	14.1±1.05
Fruit weight, g	1.6±0.13	1.5±0.15	1.7±0.15	1.7±0.18	1.7±0.15	1.7±0.14
<i>The Khabarovsk form</i>						
Shoot length, cm	5.7±0.34	5.8±0.37	6.0±0.35	6.0±0.39	6.3±0.47	6.6±0.45
Lamina length, cm	6.1±0.42	6.0±0.45	5.0±0.44	5.2±0.45	6.0±0.48	6.3±0.50
Lamina width, cm	2.8±0.24	3.0±0.25	2.8±0.32	2.7±0.29	3.0±0.30	3.2±0.32
Inflorescence length, mm	14.4±1.07	14.8±1.13	13.8±1.02	13.6±1.06	14.6±1.11	15.0±1.15
Flower diameter, mm	6.2±0.50	6.4±0.54	6.2±0.45	6.4±0.41	6.2±0.55	6.3±0.69
Fruit diameter, mm	10.9±1.06	10.6±1.06	11.2±1.14	11.4±1.17	11.2±0.92	11.1±0.94
Fruit weight, g	1.6±0.17	1.6±0.15	1.6±0.22	1.6±0.18	1.7±0.19	1.7±0.16

Unfortunately, to date only a few published results of studies on the cultivation of *V. preastans in vitro* and their adaptation *ex vitro* are known. According to the study by G. Stanienė et al. [26], the survival rate of regenerated *V. preastans* plants under *ex vitro* conditions on a sandy substrate has been 33.3–100 % depending on the form, whereas in our study the maximum survival rates (88–91 %) have been noted when plants have been transplanted in May onto high-moor peat, peat + river sand 3:1 and peat + zeolite 3:1. The positive experience of using the growth-regulating preparation Zircon at the stage of adaptation of *V. preastans* regenerants in terms of increasing plant survival and morphometric parameters is consistent with the results of our other studies on its use in the adaptation of *in vitro*-obtained *V. preastans* plants of natural forms from the Sakhalin Region and lingonberry (*V. vitis-idaea*) to *ex vitro* conditions on peat substrates [4]. The results obtained can be used to improve

the elements of the technological cycle of accelerated cultivation of *V. praestans* using the clonal micropropagation method.

For all propagated *V. praestans* hybrid plants, an assessment has been carried out for distinctiveness, homogeneity and stability in comparison with the parent forms based on morphological characteristics [14].

The Kamchatka bilberry plants of all the studied forms at the variety testing sites have been completely preserved during the observation period. In the 3rd and 4th year of cultivation in the open ground, *V. praestans* plants had the following average morphometric indicators: shoot length – 5.7–7.4 cm; lamina dimensions – 3.7–6.5×2.5–3.5 cm; inflorescence length – 14.2–19.5 mm; flower diameter – 6.2–9.7 mm; fruit diameter – 9.6–14.5 mm; fruit weight – 1.5–1.9 g. No statistically significant differences in the studied morphometric parameters have been found depending on the growing area, although the maximum values have been observed mainly in hybrid forms. Meanwhile, the plants of the studied forms are characterized by a pronounced anthocyanin coloration of the shoots of the current year, weak or moderately pronounced anthocyanin coloration of the leaves, pink or slightly pink coloration of the flowers, and red or dark red coloration of the fruits.

The yield accounting over the course of 4 years has shown that, on average, the highest yields have been achieved by hybrid forms of Kamchatka bilberry in all areas of the study: form 129634 – 364.25–383.0 g/m², form 235261 – 362.75–379.25 g/m² (Table 3). The Khabarovsk form growing in the Khabarovsk Territory has had a yield close to that of hybrid forms on average over 4 years (354.25 g/m²). Otherwise, the yield indicators of natural forms have been lower.

Table 3

The average yield of *in vitro* grown *V. praestans* plants in various growing areas

Form	Yield, g/m ²				
	by year				Average for 4 year
	2020	2021	2022	2023	
<i>The Kostroma Region</i>					
Hybrid 129634	182±16.5	380±36.2	402±38.0	550±53.2	378.50
Hybrid 235261	202±19.2	382±35.5	362±35.6	505±49.2	362.75
Sakhalin	165±15.1	352±33.2	350±33.1	452±43.8	329.75
Iturup	134±12.6	341±32.8	325±30.1	438±41.5	309.50
Khabarovsk	141±13.8	332±32.1	316±29.7	426±40.6	303.75
<i>Moscow</i>					
Hybrid 129634	185±17.2	370±36.0	382±36.8	520±50.6	364.25
Hybrid 235261	180±16.2	390±37.8	373±35.9	512±50.1	363.75
Sakhalin	152±14.6	330±30.4	321±30.8	454±43.0	314.25
Iturup	145±14.2	320±29.8	309±29.0	445±42.6	304.75
Khabarovsk	150±14.8	310±29.4	302±28.4	433±41.8	298.75
<i>The Khabarovsk Territory</i>					
Hybrid 129634	192±15.9	388±36.4	411±39.0	541±51.8	383.00
Hybrid 235261	210±20.1	405±38.6	380±35.8	522±49.6	379.25
Sakhalin	142±13.9	355±33.4	364±35.9	452±43.5	328.25
Iturup	144±14.1	346±32.4	352±33.5	464±43.4	326.50
Khabarovsk	183±16.6	372±36.7	370±35.2	492±48.0	354.25

In general, there has been an increase in yield with increasing plant age. Thus, on variety testing sites in the open ground, this indicator has been: for hybrid form

129634 in the 1st year of cultivation – on average 182–192 g/m², in the 2nd year – 2.1 times higher, in the 3rd year – 2.1–2.2 times higher, in the 4th year – 2.8–3.1 times higher, compared to the 1st year; for hybrid form 235261 in the 1st year of cultivation – on average 180–210 g/m², in the 2nd year – 1.9–2.2 times higher, in the 3rd year – 1.8–2.1 times higher, in the 4th year – 2.5–2.8 times higher; for the Sakhalin form in the 1st year of cultivation – 142–165 g/m², in the 2nd year – 2.2–2.5 times higher, in the 3rd year – 2.1–2.6 times higher, in the 4th year – 2.8–3.2 times higher; for the Iturup form in the 1st year of cultivation – 134–145 g/m², in the 2nd year – 2.3–2.6 times higher; in the 3rd year – 2.1–2.5 times higher, in the 4th year – 3.1–3.3 times higher; for the Khabarovsk form in the 1st year of cultivation – 141–183 g/m², in the 2nd year – 2.1–2.4 times higher, in the 3rd year – 2.0–2.1 times higher, in the 4th year – 2.7–3.0 times higher. At this, hybrid form 235261 has shown a slight decrease in yield (on average by 17–25 g/m²) in the 3rd year of cultivation, compared to the 2nd year. A similar trend has been observed in the Iturup and Khabarovsk forms in the conditions of the Kostroma Region and Moscow, as well as in the Sakhalin form in the conditions of Moscow. Most likely, this is due to the influence of early spring frosts in 2022, which have contributed to the freezing of flower buds. In other years of observation, no damage has been noted.

The data obtained on the yield of natural forms of *V. praestans* in crop conditions in the studied regions are quite consistent with the data obtained in the early 2000s by scientists from the All-Russian Horticultural Center for Breeding, Agro-technology and Nursery (Moscow, Russia), where the yield of plants in crop conditions in the Moscow Region in different years has been equal to: for the Kunashir form (the Kurilsky District, the Sakhalin Region, Russia) from 297.0 to 355.9 g/m², for the Sakhalin form (the Yuzhno-Sakhalinsky District, the Sakhalin Region, Russia) – from 362.5 to 502.8 g/m² [25]. At this, the yield in crop conditions has turned out to be approximately 2–4 times higher than in natural conditions in years with high yields, where it averages up to 90 g/m² [12]. This indicates the prospects of crop cultivation of this species, especially high-yielding hybrid forms, as a valuable food, medicinal and also ornamental plant, in the conditions of the European part of Russia and the Far East.

Conclusions

Thus, the highest survival rate of regenerated *V. praestans* during adaptation to non-sterile *ex vitro* conditions has been revealed when using a substrate made of a mixture of peat and zeolite (3:1) and simultaneous treatment with Epin-extra growth stimulant 0.5 ml/l (90 %). The yield of Kamchatka bilberry plants obtained by clonal micropropagation has depended on the origin of the form and the growing area, and has generally increased with increasing plant age from 2 to 5 years. The results obtained allow us to recommend the use of a mixture of peat and zeolite 3:1 and Epin-extra growth stimulant as an element of improving the technology of adaptation of *in vitro* propagated *V. praestans* plants when grown in the conditions of the European part and the Far East of Russia.

REFERENCES

1. Albert N.W., Iorizzo M., Mengist M.F., Montanari S., Zalapa J., Maule A., Edger P.P., Yocca A.E., Platts A.E., Pucker B., Espley R.V. *Vaccinium* as a Comparative System for

Understanding of Complex Flavonoid Accumulation Profiles and Regulation in Fruit. *Plant Physiology*, 2023, vol. 192, iss. 3, pp. 1696–1710. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad250>

2. Alsharairi N.A. Experimental Studies on the Therapeutic Potential of *Vaccinium* Berries in Breast Cancer – A Review. *Plants*, 2024, vol. 13, no. 2, art. no. 153. <https://doi.org/10.3390/plants13020153>

3. Chehri A., Yarani R., Yousefi Z., Shakouri S.K., Ostadrahimi A., Mobasseri M., Araj-Khodaei M. Phytochemical and Pharmacological Anti-Diabetic Properties of Bilberries (*Vaccinium myrtillus*), Recommendations for Future Studies. *Primary Care Diabetes*, 2022, vol. 16, iss. 1, p. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.pcd.2021.12.017>

4. Chudetsky A.I., Rodin S.A., Zarubina L.V., Kuznetsova I.B. Adaptation of Varietal Planting Material of Lingonberry to Non-Sterile Conditions *ex vitro* for Growing on Non-Forest Lands. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2021, no. 4, pp. 106–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.4.08>

5. Chudetsky A.I., Rodin S.A., Zarubina L.V., Kuznetsova I.B., Tyak G.V. Clonal Micropropagation and Peculiarities of Adaptation to *ex vitro* Conditions of Forest Berry Plants of the Genus *Vaccinium*. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology, 2022, vol. 52, iss. 3, pp. 570–581. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2386>

6. Dospekhov B.A. *Field Experiment Methodology (with the Basics of Statistical Processing of Research Results)*: Textbook. Moscow, Al'yans, 2011. 350 p. (In Russ.).

7. Dunford N.T. Blueberries and Health. *Functional Food Science*, 2022, vol. 2(1), pp. 1–15. <https://doi.org/10.31989/ffs.v2i1.875>

Golovinskaia O., Wang C.K. Review of Functional and Pharmacological Activities of Berries. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 13, art. no. 3904. <https://doi.org/10.3390/molecules26133904>

8. Kopystecka A., Koziół I., Radońska D., Bielawski K., Bielawska A., Wujec M. *Vaccinium uliginosum* and *Vaccinium myrtillus* – Two Species – One Used as a Functional Food. *Nutrients*, 2023, vol. 15, no. 19, art. no. 4119. <https://doi.org/10.3390/nu15194119>

9. Kowalska K. Lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) Fruit as a Source of Bioactive Compounds with Health-Promoting Effects – A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, vol. 22, no. 10, art. no. 5126. <https://doi.org/10.3390/ijms22105126>

10. Krasikova V.I. *Biology and Rational Use of Kamchatka Bilberry (Vaccinium praestans Lamb.) on Sakhalin*. Vladivostok, Far East Scientific Centre of the USSR Academy of Sciences Publ., 1987. 108 p. (In Russ.).

11. Kryshnyaya S.V., Krasikova V.I. Chemical Composition of Fruits and Leaves of *Vaccinium praestans*. *Terrestrial Ecosystems of Sakhalin Island: Current State, Natural and Anthropogenic Changes, Protection and Rational Use of Natural Resources*. Yuzhno-Sakhalinsk, 1999, pp. 121–128. (In Russ.).

12. Makarov S.S., Antonov A.M., Kulikova E.I., Chudetsky A.I., Solovyov A.V. *Biotechnology in Horticulture. Growing Fruit and Rare Berry Plants in in vitro Culture. Laboratory Practical Training: Manual*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2023. 128 p. (In Russ.).

13. Makarov S.S., Chudeckiy A.I., Cheryatova Yu.S., Kuznetsova I.B. Kamchatka Bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.): Testing Methodology Development for Distinctiveness, Homogeneity and Stability. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University, 2024, no. 5, pp. 42–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-5-42-51>

14. Makarov S.S., Rodin S.A., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I., Tsaregradskaya S.Yu. Effect of Light on Rhizogenesis of Forest Berry Plants during Clonal Micropropagation. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology, 2021, vol. 51, iss. 3, pp. 520–528. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-520-528>

15. Makarov S.S., Upadyshev M.T., Kuznetsova I.B., Zaushintsena A.V., Kulikova E.I., Surina E.A. The Use of Lighting of Various Spectral Ranges for Clonal Micropropa-

gation of Forest Berry Plants. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 82–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-82-93>

16. Mirghani M.E.S., Daoud J.I., Elnour A.A.M. Wild Species of *Vaccinium* Composition, Nutritional Value and Utilization. *Wild Fruits: Composition, Nutritional Value and Products*. Springer, Cham, 2019, pp. 523–537. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31885-7_39

17. Plaksen N.V., Stepanov S.V., Ustinova L.V. Hepatoprotective Effect of *Vaccinium praestans* Syrup. *Tikhookeanskij meditsinskij zhurnal* = Pacific Medical Journal, 2014, no. 2, pp. 59–61. (In Russ.).

18. Prieto Martínez A., Coutiño Diaz M., Anaya Romero L., Ali Redha A., Zare R., Ventura Hernandez S., Prokopidis K., Clifford T. Effects of *Vaccinium* Berries (Blueberries, Cranberries and Bilberries) on Oxidative Stress, Inflammation, Exercise Performance, and Recovery – a Systematic Review. *Food & Function*, 2024, iss. 15, pp. 444–459. <https://doi.org/10.1039/d3fo04435a>

19. Salikova A.A., Ponomarchuk S.G., Plaksen N.V., Ustinova L.V., Stepanov S.V., Zheludkova N.N. Amino Acid Composition of Fruits Representing the Far Eastern Flora. *Dal'nevostochnyj meditsinskij zhurnal* = Far Eastern Medical Journal, 2023, no. 2, pp. 69–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.35177/1994-5191-2023-2-12>

20. Salikova A.A., Ponomarchuk S.G., Plaksen N.V. Study of the Chemical Composition of Fruits of Far Eastern Plant Species of the Heather Family (*Ericaceae*). *Tikhookeanskij meditsinskij zhurnal* = Pacific Medical Journal, 2021, no. 3, pp. 40–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2021-3-40-44>

21. Salikova A.A., Ustinova L.V., Plaksen N.V., Stepanov S.V. Influence of Weather Conditions on the Accumulation of Antioxidants in the Fruits of *Vaccinium praestans*. *Problemy regional'noj ekologii* = Regional Environmental Issues, 2019, no. 5, pp. 6–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-17006>

22. Sedov E.N., Ogoltsova T.P. (eds.). *Program and Methodology for Studying Varieties of Fruit, Berry and Nut Crops*. Oryol, All-Russian Research Institute of Fruit Crops Breeding Publ., 1999. 606 p. (In Russ.).

23. Smirnov I.Yu. Kamchatka Bilberry. *Nauka i zhizn'*, 1999, no. 10, pp. 49–52. (In Russ.).

24. Smirnov I.Yu. Productivity of Lingonberry under Cultivation Conditions. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia, 2003, vol. 10, pp. 352–357. (In Russ.).

25. Stanienė G., Stanys V., Kawecki Z. Peculiarities of Propagation *in vitro* of *Vaccinium vitis-idaea* L. and *V. praestans* Lamb. *Biologija*, 2002, vol. 48, no. 1, pp. 84–86.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 630*24:004.94

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-132-144

Инженерная модель ножевого катка для осветления лесных культур

Л.Д. Бухтояров[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

С.В. Малюков, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-2656-2016](https://orcid.org/0000-0003-2098-154X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>

М.Н. Лысыч, канд. техн. наук; ResearcherID: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; vglta-mlx@yandex.ru,
malyukovsergey@yandex.ru, miklynea@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.24 / Одобрена после рецензирования 18.01.25 / Принята к печати 23.01.25

Аннотация. Для выполнения осветления лесных культур необходимо применять механизированные средства, такие как ножевые катки. Обзор научной литературы показал, что отсутствие отечественных ножевых катков – значительная проблема при искусственном лесовосстановлении. Цель данного исследования заключается в обосновании технологических параметров ножевых катков с учетом их положения относительно поверхности почвы, а также уровня жесткости предохранительных пружин. Для разработки параметров новых типов орудий требуется использование современных программных средств, позволяющих учитывать все действующие на конструкцию факторы. С помощью систем автоматизированного проектирования создана 3-мерная твердотельная модель ножевого катка, которая стала объектом изучения. Обзор методов моделирования показал, что наиболее широко сегодня применяются подходы, базирующиеся на численных расчетах. Для осуществления расчетов применялся комплекс «Универсальный механизм 9.1», предназначенный для моделирования динамических и кинематических процессов в механических системах. С помощью названного программного комплекса была создана виртуальная модель ножевого катка, учитывающая взаимодействие звеньев машины и силы трения катка при контакте с грунтом. Проведен вычислительный эксперимент по установлению кинематических и динамических характеристик катка при разных уровнях жесткости предохранительных пружин и изменении высоты установки навески относительно поверхности почвы. Определены такие параметры, как траектория движения навески, тяговое усилие трактора и силы, возникающие в процессе взаимодействия катка с грунтом. На основе разработанных параметров был изготовлен опытный образец ножевого катка, который прошел лабораторные испытания в почвенном канале. В ходе экспериментов с использованием тензометрического оборудования измерены тяговые усилия, необходимые для работы орудия. Полученные данные подтвердили

точность предлагаемой имитационной модели, ее эффективность для дальнейшего проектирования и применения на практике.

Ключевые слова: ножевой каток, кинематика, динамика, имитационное моделирование, UMLab, САПР

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

Для цитирования: Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н. Инженерная модель ножевого катка для осветления лесных культур // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 132–144. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-132-144>

Original article

An Engineering Model of a Knife Roller for Thinning Forest Crops

Leonid D. Bukhtoyarov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

Sergey V. Malyukov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-2656-2016](https://orcid.org/0000-0003-2098-154X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>

Mikhail N. Lysych, Candidate of Engineering; ResearcherID: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; vglt-a-mlx@yandex.ru[✉], malyukovsergey@yandex.ru, miklynea@yandex.ru

Received on November 27, 2024 / Approved after reviewing on January 18, 2025 / Accepted on January 23, 2025

Abstract. To carry out the thinning of forest crops, it is necessary to use mechanized means, such as knife rollers. The review of scientific literature has shown that the lack of domestic knife rollers is a significant problem in artificial reforestation. The aim of this study has been to substantiate the technological parameters of knife rollers, considering their position relative to the soil surface, as well as the level of rigidity of the safety springs. To develop the parameters of new types of tools, it is necessary to use modern software that allows taking into account all the factors affecting the design. Using computer-aided design systems, a 3-dimensional solid model of a knife roller has been created, which has become the object of study. A review of modeling methods has shown that the most widely used approaches today are those based on numerical calculations. To perform the calculations, the Universal Mechanism 9.1 complex has been used, designed for modeling dynamic and kinematic processes in mechanical systems. Using the named software package, a virtual model of a knife roller has been created, taking into account the interaction of the machine links and the friction force of the roller upon contact with the ground. A computational experiment has been conducted to establish the kinematic and dynamic characteristics of the roller at different levels of rigidity of the safety springs and a change in the height of the hitch installation relative to the soil surface. Parameters such as the trajectory of the hitch movement, the tractor traction force, and the forces arising during the interaction of the roller with the soil have been determined. Based on the developed parameters, a prototype of a knife roller has been manufactured, which has passed laboratory tests in a soil channel. In the course of experiments using strain gauge equipment, the traction forces required for the operation of the tool have been measured.

The data obtained have confirmed the accuracy of the proposed simulation model and its efficiency for further design and practical application.

Keywords: knife roller, kinematics, dynamics, simulation modeling, Umlab, CAD

Acknowledgements: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation no. 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

For citation: Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N. An Engineering Model of a Knife Roller for Thinning Forest Crops. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 132–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-132-144>

Введение

Учитывая значительные темпы сокращения лесных площадей необходимо проводить искусственное лесовосстановление. Одним из этапов лесовосстановления является осветление лесных культур. Ручная вырубка заглушающих основные культуры насаждений обладает низкой производительностью, поэтому предпочтительно использовать механизированные орудия, в т. ч. ножевые катки, для разработки которых требуется обосновать их кинематические и динамические параметры [1].

Задача, рассмотренная в данной статье, заключается в том, чтобы предложить имитационную модель орудия – ножевого катка с предохранительными пружинами, предназначенного для проведения осветлений лесных культур. Для реализации этой задачи использованы методы имитационного моделирования.

Исследованиями опытного образца плуга и ножевого ротора как в почвенном канале, так и в полевых условиях занимались Ucgul Mustafa et al. [16–19]. Ими было установлено, что дискретно-элементное моделирование (DEM) имеет потенциал для прогнозирования сил обработки и движения почвы орудием. Получены тяговые усилия, вертикальная сила и движение почвы в поперечном направлении и в продольных плоскостях. Теоретическое и экспериментальное изучение ножевого катка выполнено Musabbir Abdullah et al., Ye S et al. [15, 20]. Обоснованы конструктивные параметры лезвий на катках для эффективного резания соломы с учетом веса катка. Тяговые характеристики тракторов по модели прогнозирования Brixius путем снятия показаний тензодатчиками с навески орудия описаны в работах Kim Wan-Soo et al., Kim Yeon-Soo et al. [11–13], по данным как экспериментов, так и теоретических изысканий. Установлено, что нагрузка на заднюю ось и расход топлива больше всего зависят от комбинации глубины обработки отвальными плугами и выбора передачи. Вопросам взаимодействия рабочих органов с гранулированной почвенной средой посвящено исследование V. Bivainis et al. [8]. В работах Hui Ma et al. изучена модель ротора [14]. Используя Umlab, Е.Е. Клубничкин рассмотрел взаимодействия колеса с почвой [5]. В.И. Посметьев с помощью компьютерного моделирования исследовал лесовоз [6]. В.Е. Клубничкин имитационно смоделировал рулевое управление погрузочно-транспортной машины [4]. В работах И.М. Бартенева, Е.Г. Хитрова, И.В. Григорьева [1, 3, 7] рассмотрены современные системы машин, технологии лесовосстановления и методы их расчета.

В наших исследованиях ранее мы использовали Matlab Simulink, Solidworks Motion, SimInTech, Umlab [2, 9–11]. За счет применения данного программного обеспечения возможно быстро разработать модель и провести

вычислительный эксперимент, поэтому в представляемом исследовании также решено было использовать Umlab (Универсальный механизм 9.1). На основании обзора сформулированы предпосылки для постановки задачи исследования и выбора методов его проведения, которые подробно рассмотрены далее.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ножевой каток. Сначала мы создали его 3D-модель в системе автоматизированного проектирования, далее исключили избыточные степени свободы и экспортировали модель в Umlab. С помощью Umlab добавили контактные взаимодействия звеньев и параметры исследуемых пружин, после чего провели вычислительные эксперименты.

На высоте от почвы $l_{H_{почв}} = 0,75$ м расположим пластину крепления навески к трактору в виде параллелепипеда 2 со сторонами размером $0,1 \times 0,2 \times 0,2$ м, весом 31,2 кг, находящегося на расстоянии $-0,5$ м по оси OX от базовой системы координат. Зададим ей возможность поступательно перемещаться по оси OX со скоростью $V_{pod} = -0,5$ м/с. Для измерения тягового усилия по 3 осям расположим рядом с пластиной навески еще один параллелепипед 3 таких же размера и массы, как 2. Кинематическую пару A между звеньями 2 и 3 представим как обобщенный шарнир, обладающий поступательными степенями свободы по осям OX , OY , OZ , на каждой из которых зададим фиктивную силу трения равную $14e10$ Н. Измерение силы трения в кинематической паре звеньев 2 и 3 позволит оценить затраты тягового усилия трактора на движение. Начальная система координат всех импортируемых из CAD программы звеньев совпадает с начальной системой координат имитационной модели. Добавим сдвиги по осям OX , OY , OZ и расположим звенья друг относительно друга так, как это показано на рис. 1. Цвет оси OX примем красным, оси OY зеленым, оси OZ синим, аналогичную палитру используем для графиков, показывающих результаты исследования.

Навеска – 3-точечная, для расчета кинематической схемы механизма в соответствии с теорией машин и механизмов необходимо исключить избыточные связи, поэтому оставим только верхний палец 4. Навеска при работе трактора находится в плавающем режиме и движется поступательно относительно грунта (кинематическая пара H). Для реализации перемещения пальца навески 4 относительно звена 3 (места крепления навески к трактору) между этими звеньями применим поступательную кинематическую пару B вдоль оси OZ (люфтом звена 4 относительно звена 3 вдоль OX , OY пренебрежем).

Для ограничения хода навески по вертикали примем упорные пластины 5, предотвращающие перемещение при возникновении 3D-контакта между звеньями 4 и 5. Рама навески 6 жестко закреплена на пальце 4 (вращением в пальце пренебрегаем). К раме навески 6 жестко присоединен фланец продольной балки 7, расположенный по центру навески. Продольная балка 9 зафиксирована шарниром C относительно фланца 7. На фланце 7 и балке 9 установлены проушины 8, 11, на шарнирах которых D установлены 2 пружины сжатия 10. Для обеспечения угла поворота α катка вокруг оси OZ используем шарнир E , который позволяет вращать раму катка 13 в прорезях фланца 12. Для обеспечения установки угла поворота катка вокруг его оси OX применим шарнир F , он позволит вращать раму катка 13 в проушинах 15.

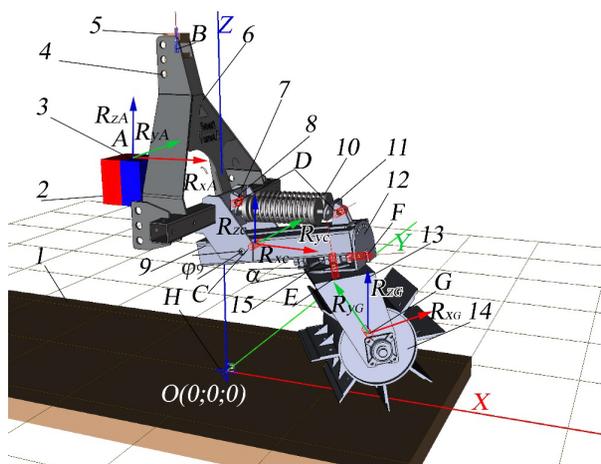


Рис. 1. Компоновочно-кинематическая схема ножевого катка

Fig. 1. The layout and kinematic diagram of a knife roller

Воздействие массы орудия на опору навески 2 зависит от нахождения навески в верхнем или нижнем участке ее плавающего хода, ограничиваемом стопорами 5, а также от сил на пружинах. Массу орудия рассчитаем по формуле:

$$m_{rsum} = \sum_{i=3}^{15} m_i,$$

где m_{3-15} – масса крепления навески; пальцев навески; стопоров; навески; фланца навески; проушин фланца; балки; пружин; верхней проушины балки; фланца катка; рамы катка; катка; нижних проушин балки соответственно ($m_3 = 31,2$ кг; $m_4 = 4$ кг; $m_5 = 1,5$ кг; $m_6 = 38,5$ кг; $m_7 = 11,6$ кг; $m_8 = 1,2$ кг; $m_9 = 19,5$ кг; $m_{10} = 8$ кг; $m_{11} = 1,5$ кг; $m_{12} = 7$ кг; $m_{13} = 25$ кг; $m_{14} = 89$ кг; $m_{15} = 1,5$ кг).

Таким образом, когда каток не касается опоры, орудие максимально свешивается вниз и опирается на навеску (на верхний стопор) всей своей массой. Если каток опирается на грунт или другую поверхность, у орудия возникает 2 точки опоры – нижний упор 5 и сам каток 14. При значительной силе на пружинах они могут переводить навеску к верхнему стопору, после чего добавлять свою силу, передавая ее к навеске трактора и трактору, вплоть до вывешивания его задних колес, поэтому крайне важно правильно подобрать предохранительные пружины 10, которые позволяли бы удерживать каток, но не оказывали бы избыточное давление на грунт.

Сопротивление на ножевом катке складывается из 3 компонентов: силы трения скольжения вдоль оси OX , боковой силы трения по оси OY , силы от сопротивления почвы на ножевом катке вдоль оси OZ . Примем допущение, что в шарнире G действует фиктивный момент трения $M_{trk} = 1000$ Н·м, фактически запретиw вращения катка. В этом случае при снятии показаний в имитационном эксперименте мы увидим затраты момента от действия сил трения между грунтом и катком с учетом масс орудия и сил на пружинах, возникающие в этом шарнире.

Реакция в месте крепления навески к трактору между звеньями 2 и 3 R_z , компенсирующая вес орудия (без учета действия пружин), равна:

$$R_z = \sum_{i=3}^{15} m_i g.$$

Силу трения, возникающую между грунтом и катком, рассчитаем по формуле:

$$F_{trG} = F_{XtrG} + F_{YtrG} = \sqrt{(f_{tr} R_{zG} \cos(\alpha))^2 + (f_{tr} R_{zG} \sin(\alpha))^2},$$

где F_{trG} – результирующая сила трения, Н; F_{XtrG}, F_{YtrG} – проекция силы трения на оси OX и OY соответственно, Н; f_{tr} – коэффициент трения; α – угол поворота катка относительно оси OX, \dots° .

Для расчета коэффициента трения используем формулу [3]:

$$f_{tr} = f + (f_0 - f)e^{-\left(\frac{V_s}{v_{str}}\right)^\delta} + v V_s,$$

где f, f_0 – коэффициент трения в режиме скольжения и сцепления соответственно; v_{str} – скорость Штрибека, определяющая интервал скорости проскальзывания, м/с; v – коэффициент вязкого трения.

Внедрение ножей в почву значительно увеличивает коэффициенты трения, поэтому сделаем допущение, что $f = 0,8, f_0 = 0,9$.

Момент от действия сил трения между грунтом и катком с учетом масс орудия и сил на пружинах рассчитаем по формуле:

$$M_{tr} = F_{trG} R_{kat},$$

где R_{kat} – радиус катка, м.

Выполним имитационное моделирование работы ножевого катка в UMLab. Входные параметры модели следующие. Параметры скольжения: коэффициент трения $f = 0,8$; коэффициент трения $f_0 = 0,9$; скорости $v_s = 0,5$ м/с, $v_{str} = 0,5$ м/с; коэффициент кривой $\delta = 1$; коэффициент вязкого трения $v = 0,3$. Параметры нормального контакта: коэффициенты жесткости $C_k = 1e6$, демпфирования $D_k = 1e4$. Параметры качения: коэффициенты трения $K_{roll} = 0$ м, $K_{spin} = 0$ м (имеют размерность длины). Радиус катка $R_{kat} = 0,16$ м, нормаль $(0; 1; 0)$, точка на плоскости $X_p = 0$ м, $Y_p = 0$ м, $Z_p = 0$ м, внешняя нормаль точки $(0; 0; 1)$. Массы звеньев, вычисленные на основании геометрии звеньев и плотности стали, были приведены выше. Параметры предохранительных пружин сжатия сведены в таблицу.

Параметры предохранительных пружин сжатия
The parameters of safety compression springs

Параметр	Значения для пружин		
	№ 1	№ 2	№ 3
Диаметр наружный, D_1 , мм	100	100	100
Диаметр проволоки, D , мм	12	14	15
Жесткость пружины, c , Н/м	18661	39510	53926
Свободная длина, L_0 , мм	400	400	400
Рабочий ход пружины, L_{1-2} , мм	110	110	110
Число рабочих витков	16	15	15
Усилие предварительной деформации, F_1 , Н	933	1976	2669
Рабочая максимальная нагрузка, F_2 , Н	3658	6954	8089

Силу на пружине рассчитаем по формуле:

$$F_{pr} = F_1 - c\Delta x_{pr},$$

где Δx_{pr} – изменение длины пружины, м.

Параметры ядра расчета имитационного моделирования установим по умолчанию. Выполним лабораторный эксперимент. Для фиксирования сил тяги катка использовалась тензометрическая навеска, позволяющая проводить исследования в 3 плоскостях по X, Y, Z . Применена тензометрическая лаборатория ZetLab, включающая тензостанцию ZET 058 и набор тензодатчиков сил растяжения и сжатия UU-500 кгс, данные с которых поступали в специализированное программное обеспечение ZETLAB TENZO.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведем имитационный эксперимент I. Выключим пружины (установим предварительное усилие деформации $F_1 = 0$, жесткость пружины, $c = 0$, физически удалим сами пружины массой m_{10}). Момент сопротивления вращения катка от почвы $M_{тк} = 1000$, $f_{т} = 0,8$, $f = 0,9$. Для достижения равновесия системы в опыте I и последующих расположим орудие так, чтобы до нижнего упора навески оставалось 6 см.

Выполним имитационный эксперимент II. Повторим те же условия, что и в эксперименте I, но отключим взаимодействие с почвой (обнулим жесткость контакта колесо–почва $C_k = 0$ и демпфирование $D_k = 0$). Уберем ограничитель, который препятствует опусканию балки 9 на угол меньше 0° . В этом случае каток опустится вниз, как если бы он висел в воздухе, и его рама придет в колебательное движение (как у маятника). В шарнир C добавим момент трения $M_{тс} = 120$ Нм, чтобы быстрее погасить движение «маятника».

При работе на вырубках возможны режимы движения, когда начинают действовать пружины сжатия. При наезде на препятствие каток будет подниматься, увеличивая угол φ_9 и сжимая пружины. Аналогичный режим работы возникнет при опускании навески, когда она коснется верхнего стопора 5, передавая давление от трактора на каток. В этом случае излишняя жесткость пружин может привести к значительным нагрузкам в шарнирах, вывешиванию задних колес трактора и разрушению узлов сочленения.

Для моделирования работы пружин сжатия проведем имитационные эксперименты III, IV, V с одинаковыми входными параметрами, но для 3 разных пружин (см. таблицу). Для имитации режима, при котором пружины сжатия начнут работать, уменьшим высоту навески над уровнем почвы с $H_{почвI-II} = 0,75$ м до $H_{почвIII-V} = 0,45$ м.

Вертикальное перемещение шарнира C и изменения угла наклона балки φ_9 , полученные по результатам имитационных экспериментов I–V, покажем на рис. 2.

Для имитационного эксперимента I орудие опускается вниз $Z_C = 0,54$ м, опирается на упор 5 у навески и катком 14 – на грунт, в результате чего балка 9 из горизонтального положения отклоняется на угол $\varphi_9 = 5,2^\circ$ (против часовой стрелки относительно шарнира C).

Для имитационного эксперимента II орудие также опускается вниз $Z_C = 0,54$ м, опирается на упор 5 у навески, но поскольку опора на грунт отсут-

стует, то рама с катком приходит в колебательное движение как «маятник» относительно шарнира C . За счет Г-образной рамы угол балки φ_9 будет колебаться вблизи -55° , после чего вследствие трения установится на этом угле. Угол равен -55° , а не -90° (вертикально вниз), т. к. центр тяжести Г-образной балки находится внутри, а не на самой балке 9.

Для имитационного эксперимента III орудие начнет опускаться вниз, но после упора катком 14 на грунт за счет действия сил на пружинах 10 придет в плавающее положение (не опирается на упоры 5), затем установится на уровне $Z_C = 0,28$ м, угол балки $\varphi_9 = 47^\circ$.

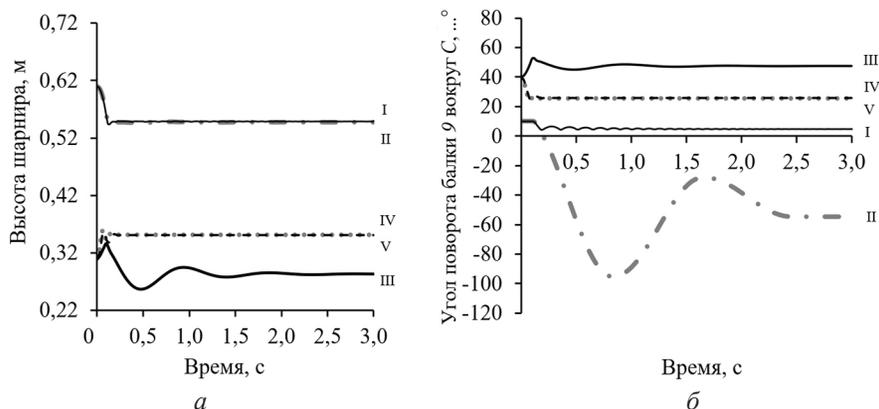


Рис. 2. Траектория движения балки 9 для имитационных экспериментов I–V:

a – перемещение шарнира C вдоль оси OZ ; b – угол φ_9

Fig. 2. The trajectory of beam 9 for simulation experiments I–V:

a – movement of the hinge C along the OZ axis; b – angle φ_9

Для имитационных экспериментов IV–V орудие начнет опускаться вниз, но после упора катком 14 на грунт за счет значительных сил от действия на пружинах 10 поднимется до верхнего упора 5 с дальнейшим установлением на уровне $Z_C = 0,35$ м, угол балки $\varphi_9 = 25^\circ$.

Результирующие силы в шарнирах A , C , G для имитационных экспериментов I–II (пружины отсутствуют) покажем на рис. 3.

Для имитационного эксперимента I орудие опускается вниз, опирается на упор 5 у навески и катком 14 – на грунт, быстро coming к установившемуся режиму работы. Результирующие силы (кН) в шарнирах включают 2 составляющие: силы от массы по оси OZ и от трения катка о почву по оси OX – после удара об упор они принимают следующие значения:

$$F_{A1} = \sqrt{F_{ZA1}^2 + F_{XA1}^2} = \sqrt{1,807^2 + (-0,539)^2} = 1,830;$$

$$F_{C1} = \sqrt{F_{ZC1}^2 + F_{XC1}^2} = \sqrt{0,825^2 + (-0,539)^2} = 0,978;$$

$$F_{G1} = \sqrt{F_{ZG1}^2 + F_{XG1}^2} = \sqrt{0,273^2 + (-0,538)^2} = 0,603.$$

Для имитационного эксперимента II пружины и грунт на орудие не действуют (контакт с почвой выключен, а значит, трения по оси OX нет), однако из-за колебательного движения рамы в первые 2 с присутствует сила по оси

OX , которая меняет знак при движении «маятника», но после остановки колебаний катка на раме вокруг шарнира C становится равной 0. Таким образом, с ударом об упор и прекращением колебательного движения силы в шарнирах включают только одну составляющую – по оси OZ и принимают значения $F_{AII} = 2,332$ кН; $F_{CII} = 1,418$ кН; $F_{GII} = 0,891$ кН. Поделив полученные показатели на силу тяжести, можно убедиться, что имитационная модель работает верно (массы отличаются от заданных на входе не более чем на 1,5 %). Масса всего орудия по модели $m_{sum} = F_{AII}/g = 237,9$ кг; $F_{CII}/g = 144,6$ кг (сумма масс звеньев 9, 11–14); масса катка $m_{14} = F_{GII}/g = 90,9$ кг.

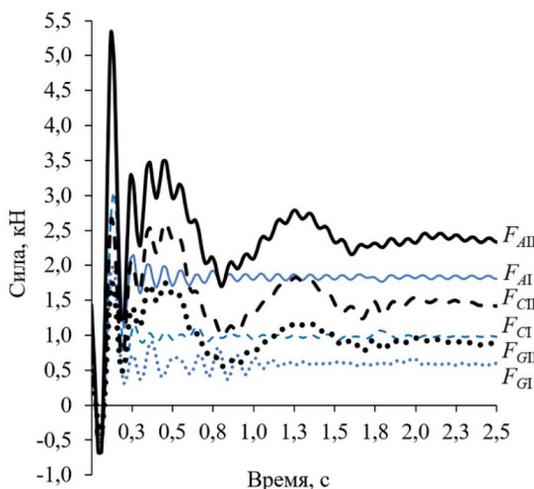


Рис. 3. Результирующие силы в шарнирах A, C, G для имитационных экспериментов I–II

Fig. 3. The resulting forces in joints A, C, G for simulation experiments I–II

Так как при опоре на грунт часть нагрузки от орудия начинает воздействовать на него, то и силы в шарнирах для опыта I меньше в сравнении с опытом II, когда вся масса орудия висит в воздухе, опираясь только на навеску.

Для имитационных экспериментов IV–V орудие начнет опускаться вниз, но после упора катком 14 на грунт за счет значительных сил от действия на пружинах 10 поднимется до верхнего упора 5 и установится на уровне $Z_c = 0,35$ м, угол балки $\varphi_9 = 25^\circ$.

Силы в шарнирах A, C, G для 3 пружин в их сжатом состоянии за счет опускания навески на уровень $Z_c = 0,35$ м и поворота балки 9 на угол $\varphi_9 = 25^\circ$ (имитационные эксперименты III–V) показаны на рис. 4. Угол поворота катка относительно направления движения $\alpha = 0^\circ$, и трактор движется прямо, поэтому составляющая вектора сил по оси OY отсутствует.

У шарнира A в случае установки пружины № 1 (III) силы наименьшие из всех 3 опытов: $F_{AIII} = 1,843$ кН; $F_{AZIII} = 0,306$ кН; $F_{AXIII} = -1,817$ кН. Для пружины № 2 (IV) силы увеличиваются и достигают: $F_{AIV} = 2,551$ кН; $F_{AZIV} = -0,469$ кН; $F_{AXIV} = -2,507$ кН. Для пружины № 3 (V) показатели максимальны: $F_{AV} = 3,366$ кН; $F_{AZV} = -1,922$ кН, $F_{AXV} = -3,147$ кН. При установке наименее слабой пружины № 1 давление от сил тяжести на грунт больше, чем от силы сжатия пружин, и составляющая F_{AZIII} положительна, однако, недостаточна, чтобы поднять навеску до верхнего упора 5, поэтому орудие находится в плавающем положении. При установке более жесткой пружины № 2 происходит подъем навески до упора 5, и оставшейся силой сжатия пружины дополнительно догружают каток. Аналогичная ситуация у наиболее жесткой пружины № 3, для которой силы наибольшие. Отметим, что силы F_{AX} препятствуют движению

трактора, поэтому имеют знак минус, а вертикальные составляющие F_{AZ} для пружин № 2 и 3 дают на верхний упор 5, поэтому ответная реакция направлена вниз и тоже имеет знак минус, когда давления на упор нет F_{AZ} (III) приобретает положительное значение.

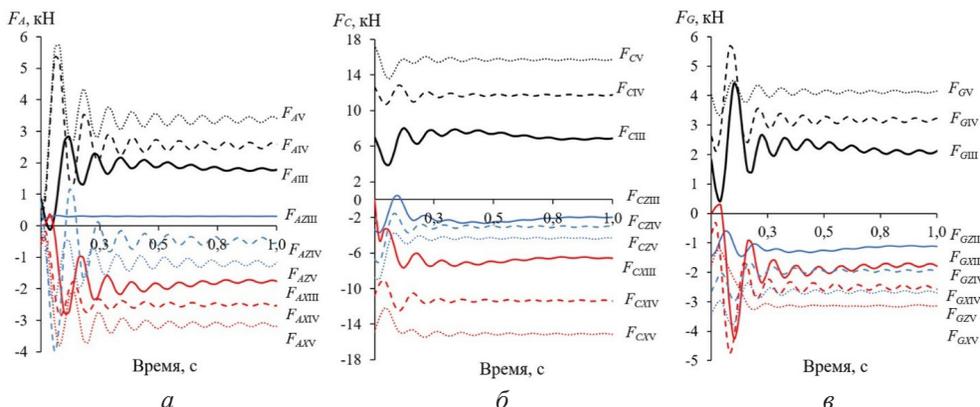


Рис. 4. Силы в шарнирах для имитационных экспериментов III–V:

а – шарнир А; б – шарнир С; в – шарнир G

Fig. 4. The forces in the joints for simulation experiments III–V:

а – joint А; б – joint С; в – joint G

Действующие у шарнира G силы могут быть использованы для расчета процесса резания ветвей, дерна и почвы непосредственно ножами катка. Причины уровня сил аналогичны шарниру А, с той лишь разницей, что пружины всегда оказывают дополнительное давление на каток, а значит F_{AZ} отрицательна для всех 3 опытов (III–V). Силы при устранившемся движении следующие: для пружины № 1 (III) $F_{GIII} = 2,161$ кН; $F_{GZIII} = -1,169$ кН; $F_{GZXIII} = -1,817$ кН; для пружины № 2 (IV) $F_{GIV} = 3,174$ кН; $F_{GZIV} = -1,946$ кН; $F_{GZXIV} = -2,507$ кН; для пружины № 3 (V) $F_{GV} = 4,126$ кН; $F_{GZV} = -2,668$ кН; $F_{GZV} = -3,147$ кН.

Действующие у шарнира С силы достигают значительных величин, т. к. находятся в месте «излома» рамы и могут приводить к повышенному износу и выходу орудия из строя. Причины уровня сил аналогичны шарниру G, разница заключается в том, что пружины располагаются в непосредственной близости от шарнира С и распределение масс орудия способствует возникновению наибольших реакций в шарнире. Сила для пружин при устранившемся движении: для пружины № 1 (III) $F_{CIII} = 7,054$ кН; $F_{CZIII} = -2,146$ кН; $F_{CZXIII} = -6,817$ кН; для пружины № 2 (IV) $F_{CIV} = 11,761$ кН; $F_{CZIV} = -3,058$ кН; $F_{CZXIV} = -11,356$ кН; для пружины № 3 (V) $F_{CV} = 15,731$ кН; $F_{CZV} = -4,337$ кН; $F_{CZV} = -15,121$ кН.

Общий вид лабораторной установки и результаты измерений сил в шарнире А показаны на рис. 5. Предусмотрим 2 пружины № 1, опустим навеску так, чтобы высота шарнира С над грунтом $Z_C = 0,35$ м, а угол наклона балки $\varphi_9 = 25^\circ$ при внедрении ножей катка в почву. Аналогичные параметры зададим в имитационном эксперименте VI.

Результирующая сила для установившегося режима работы у имитационного эксперимента $F_{AVI} = 2,094$ кН, а для данных, полученных с тензонавески при лабораторных опытах, $F_{Aexp} = 1,7$ кН, разница теоретических и экспериментальных исследований составила 23 %. Это связано с тем, что во время эксперимента сложно контролировать, чтобы навески и пружины не были так сильно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бартенеv И.М., Драпалюк М.В. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С.117–133.

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. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>

2. Бухтояров Л.Д., Малуков С.В., Лысыч М.Н. Имитационная модель для анализа кинематики лесопосадочного аппарата с двумя роторами // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2023. № 243. С. 197–209.

Bukhtoyarov L.D., Maluykov S.V., Lysych M.N. Simulation Model for the Analysis of the Kinematics of a Forest Planter with Two Rotors. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2023, no. 243, pp. 197–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.197-209>

3. Каляшов В.А., До Туан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1–47.

Kalyashov V., Do Tuan An', Hitrov E., Grigoreva O., Gur'ev A., Novgorodov D. Modern Systems of Machinery and Technologies for Timber Harvesting and Reforestation in Mountain Forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>

4. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Горбунов А.Ю., Дручинин Д.Ю. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 217–226.

Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Gorbunov A.Yu., Druchinin D.Yu. Development of the Forwarder Articulation Joint. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 217–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18>

5. Клубничкин Е.Е. Моделирование мобильности колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 1(140). С. 84–96.

Klubnichkin E.E. Modeling the Mobility of Wheeled Vehicles Equipped with Traction Devices. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2023, no. 1(140), pp. 84–96. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84

6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 85–99.

Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 85–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

7. Хитров Е.Г., Должиков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 126–134.

Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 126–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

8. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K., Mioldazys R., Juodišius G. Theoretical and Experimental Verification of Organic Granular Fertilizer Spreading. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 6, art. no. 1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061135>

9. Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the Movement of Hedge Cutter Links in the Simulink Application of the Matlab Package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, art. no. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>

10. Bukhtoyarov L., Kunickaya O., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating Optimum Parameters and Efficiency of Rotary Brush Cutters. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 788–797. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>

11. Kim W.-S., Kim Y.-J., Baek S.-Y., Baek S.-M., Kim Y.-S., Choi Y., Kim Y.-K., Choi I.-S. Traction Performance Evaluation of a 78-kW-Class Agricultural Tractor Using Cone Index Map in a Korean Paddy Field. *Journal of Terramechanics*, 2020, vol. 91, pp. 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.08.005>

12. Kim Y.-S., Kim W.-S., Baek S.-Y., Baek S.-M., Kim Y.-J., Lee S.-D., Kim Y.-J. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 9, art. no. 2450. <https://doi.org/10.3390/s20092450>

13. Kim Y.-S., Kim T.-J., Kim Y.-J., Lee S.-D., Park S.-U., Kim W.-S. Development of a Real-Time Tillage Depth Measurement System for Agricultural Tractors: Application to the Effect Analysis of Tillage Depth on Draft Force during Plow Tillage. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 3, art. no. 912. <https://doi.org/10.3390/s20030912>

14. Ma H., Lu Y., Wu Z., Tai X., Li H., Wen B. A New Dynamic Model of Rotor–Blade Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 357, pp. 168–194. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.036>

15. Musabbir A.A., Rahman A.M., Anjum N., Ali M. Performance Evaluation of New Rotary Blades and Roller Cutter of Versatile Multi-Crop Planter on Residue Management. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2022, vol. 38, iss. 5, pp. 211–221. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2022/38.5.211.221>

16. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. 3D DEM Tillage Simulation: Validation of a Hysteretic Spring (Plastic) Contact Model for a Sweep Tool Operating in a Cohesionless Soil. *Soil and Tillage Research*, 2014, vol. 144, pp. 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.003>

17. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete Element Modelling of Tillage Forces and Soil Movement of a One-Third Scale Mouldboard Plough. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 155, pp. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.002>

18. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete Element Modelling of Top Soil Burial Using a Full Scale Mouldboard Plough under Field Conditions. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 160, pp. 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.008>

19. Ucgul M., Saunders C., Li P., Lee S.-H., Desbiolles J. Analyzing the Mixing Performance of a Rotary Spader Using Digital Image Processing and Discrete Element Modelling (DEM). *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 151, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.028>

20. Ye S., Wang X., Zhang C., Zhang J., Wang J., Zheng D. Design and Experiments of a Roll-Knife Pickup for a Buckwheat Pickup Harvester. *Agronomy*, 2024, vol. 14, no. 9, art. no. 1944. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091944>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 662.76

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-145-154

Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов

А.П. Терехин[✉], науч. сотр.; ResearcherID: [JMR-0649-2023](https://orcid.org/0009-0005-1737-1881),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1737-1881>

П.А. Марьяндышев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

И.И. Голованова, аспирант; ResearcherID: [LRC-4582-2024](https://orcid.org/0009-0009-0231-2503),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0231-2503>

А.А. Громов, аспирант; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; terehin.a@edu.narfu.ru[✉], p.marjyandishev@narfu.ru, imukhrewa@gmail.com, gromov.a@edu.narfu.ru

Поступила в редакцию 11.11.24 / Одобрена после рецензирования 06.02.25 / Принята к печати 07.02.25

Аннотация. В Архангельской области находятся крупные залежи торфа. По данным балансового учета, насчитывается 626 месторождений, площадь каждого из которых превышает 10 га. При этом для Архангельской области существует проблема эффективной энергетической утилизации вторичных энергетических ресурсов, таких как древесные отходы и кора, образующихся на предприятиях лесопромышленного комплекса. На синхронном термоанализаторе в среде аргона и воздуха в диапазоне температур 30–700 °С выполнен термический анализ пеллет из смеси торфа (80 %) и кородревесных отходов целлюлозно-бумажного производства (20 %). Торф был собран в Мезенском районе Архангельской области, образцы кородревесных отходов – на тракте подачи коры в котлоагрегаты с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М, установленные на ТЭС-3 АО «Архангельский ЦБК». Пеллеты получены в пресс-грануляторе. С помощью спектрометра исследован элементный состав пеллет. Основными золо- и шлакообразующими элементами в образцах являются кремний, алюминий, кальций и железо. Термический анализ пеллет проведен на синхронном термоанализаторе в среде аргона и воздуха с расходом 20 см³/мин. Для наблюдений за сушкой и термическими преобразованиями пеллет использовались кривые убыли массы и скорости этого процесса в исследуемых образцах топливных гранул. Показано, что выход летучих веществ происходил при температурах от 170 до 430 °С. Полученные пеллеты являются высококалорийным и низкосольным биотопливом. Результаты исследования можно применять для теоретического обоснования производства топлива с высокими теплотой сгорания и механической прочностью с целью увеличения роли местной биомассы в энергетике Архангельской области.

Ключевые слова: торфяное топливо, кородревесные отходы, пеллеты, гранулятор, термический анализ, термограммы, рентгенофлуоресцентный анализ, лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Для цитирования: Терехин А.П., Марьяндышев П.А., Голованова И.И., Громов А.А. Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 145–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-145-154>

Original article

Thermal Decomposition of Pellets from a Mixture of Peat and Bark Waste

Aleksey P. Terekhin[✉], Research Scientist; ResearcherID: [JMR-0649-2023](https://orcid.org/0009-0005-1737-1881),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1737-1881>

Pavel A. Maryandyshv, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

Irina I. Golovanova, Postgraduate Student; ResearcherID: [LRC-4582-2024](https://orcid.org/0009-0009-0231-2503),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0231-2503>

Anton A. Gromov, Postgraduate Student; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; terehin.a@edu.narf.ru[✉], p.marjandyshv@narfu.ru, imukhrewa@gmail.com, gromov.a@edu.narf.ru

Received on November 11, 2024 / Approved after reviewing on February 6, 2025 / Accepted on February 7, 2025

Abstract. There are large peat deposits in the Arkhangelsk Region. According to the balance sheet data, there are 626 deposits, each of which has an area exceeding 10 ha. At the same time, the Arkhangelsk Region faces the problem of efficient energy utilization of secondary energy resources, such as wood waste and bark, generated at timber industry enterprises. Thermal analysis of pellets from a mixture of peat (80 %) and bark waste from pulp and paper production (20 %) has been performed on a synchronous thermal analyzer in an argon and air environment in the temperature range of 30–700 °C. Peat has been collected in the Mezensky District of the Arkhangelsk Region, and samples of bark waste have been collected from the bark feed line to the E-75-3.9-440 DFT and KM75-40M fluidized bed boiler units installed at TPP-3 of Arkhangelsk Pulp and Paper Mill. The pellets have been obtained in a pellet-press. The elemental composition of pellets has been studied using a spectrometer. The main ash- and slag-forming elements in the samples are silicon, aluminum, calcium and iron. The thermal analysis of pellets has been carried out on a synchronous thermal analyzer in an argon and air medium with a flow rate of 20 cm³/min. To observe the drying and thermal transformations of pellets, the curves of the decrease in mass and speed of this process in the studied samples of fuel pellets have been used. It has been shown that the release of volatile substances has occurred at temperatures from 170 to 430 °C. The resulting pellets are high-calorie and low-ash biofuel. The results of the research can be applied for theoretical substantiation of the production of fuels with high combustion heat and mechanical strength in order to increase the role of local biomass in the energy sector of the Arkhangelsk Region.

Keywords: peat fuel, bark waste, pellets, granulator, thermal analysis, thermograms, X-ray fluorescence analysis, lignin, cellulose, hemicellulose

Acknowledgements: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSRU-2024-0007.

For citation: Terekhin A.P., Maryandyshev P.A., Golovanova I.I., Gromov A.A. Thermal Decomposition of Pellets from a Mixture of Peat and Bark Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 145–154. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-145-154>

Введение

Среди ключевых задач энергетической стратегии России на период до 2035 г. можно отметить переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональному природопользованию, достижение энергетической эффективности и безопасности, диверсификацию используемых видов топлива и энергии. Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) играет ведущую роль в экономическом развитии и обеспечении национальной безопасности Российской Федерации. Кроме того, согласно энергетической стратегии страны на период до 2035 г., ТЭК существенно влияет на состояние окружающей среды. Доктрина энергетической безопасности России, утвержденная указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г., ставит задачу улучшения инфраструктуры и объектов ТЭК Арктической зоны Российской Федерации и увеличения доли в энергетике местных энергетических ресурсов и возобновляемых источников энергии. Стратегия экологической безопасности РФ также утверждает о важности эффективного применения природных ресурсов и повышении уровня утилизации отходов производства и потребления, при этом отмечая как одну из главных проблем сокращение запасов природных ископаемых ресурсов, таких как газ, уголь и нефть.

В число наиболее перспективных способов решения обозначенных проблем входит увеличение доли возобновляемого биотоплива в общем энергобалансе. Стратегия сокращения доли традиционных видов ископаемых топлив и повышения доли возобновляемых источников топлива уже интегрирована и адаптирована в планы по борьбе с изменением климата и обеспечению энергетической безопасности во всем мире [1–3, 5, 6, 9, 10].

Биоэнергетика может стать основным вектором развития децентрализованной и возобновляемой энергетики в России, поскольку на территории страны сосредоточено примерно 25 % мировых запасов древесины и около 45 % мировых запасов торфа [4].

Торф – горючее ископаемое, возникающее из растительных остатков. Ежегодно в России образуется 260–280 млн т торфа, но применяется только 1,1–1,2 %. Ресурсы торфа в нашей стране превышают запасы нефти и газа, уступая только каменному углю. Отходы биомассы, такие как древесные остатки и сельскохозяйственные отходы могут быть эффективно использованы совместно с торфом для создания новых энергетических биотехнологий [4].

Для Арктической зоны Российской Федерации существует проблема эффективного расходования вторичных энергоресурсов, поэтому следует искать методы переработки древесных отходов и коры, образующихся в процессе производства.

Технология гранулирования становится все более востребованной в сфере применения биомассы в качестве источника энергии. С помощью гранулирования биомассы достигается увеличение ее энергетической эффективности. Важнейшим преимуществом топливных гранул является высокая и постоянная насыпная плотность, обуславливающая относительную легкость транспортировки этого сыпучего продукта на большие расстояния. Благодаря правильной

форме, небольшому размеру и однородной консистенции продукта гранулы можно пересыпать через специальные рукава, что позволяет автоматизировать погрузку и разгрузку данного вида топлива, его сжигание. Химические характеристики готовых гранул зависят от исходного сырья.

Технология создания пеллет включает множество параметров [8, 16]. Авторы [7] изучали физико-механические характеристики топливных пеллет из древесины лиственных пород и пришли к выводу, что обработка измельченного древесного сырья (лиственных пород древесины) насыщенным паром позволяет получать пеллеты требуемого качества, при этом их механическая прочность сравнима с достигаемой при использовании древесины хвойных пород. Н.А. Сычева и соавторы [12] исследовали влияние режима гранулирования (температуры и давления) на прочностные свойства топливных пеллет из древесины сосны, ольхи черной, ольхи серой и березы и заключили, что увеличение температуры и давления прессования повышает прочность пеллет более чем в 3 раза.

Цель исследования – комплексный термический анализ пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов с достоверной оценкой термогравиметрических данных и кинетических характеристик процессов, ответственных за термомеханическое превращение пеллет, изучение их элементного состава.

Объекты и методы исследования

Торфяная масса была собрана в Мезенском районе Архангельской области, получаемый здесь в промышленных масштабах торф используется как топливо для местной котельной. Образцы кородревесных отходов лиственных пород получены на тракте подачи коры в котлоагрегаты с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М на ТЭС-3 АО «Архангельский ЦБК». Отбор, формирование и подготовка проб торфа и кородревесных отходов выполнялись в соответствии с ГОСТ 33563–2015, ГОСТ Р 54187–2010, ГОСТ 33255–2015, ГОСТ 33104–2014.

Гранулирование смеси 2 биотоплив проводилось в пресс-грануляторе Amandus Kahl (рис. 1). С целью увеличения механической прочности пеллет осуществлялось добавление кородревесных отходов к торфяной массе. Для снижения зольности получаемых пеллет выбрана доля древесных отходов 20 %.

При выполнении экспериментов топливная смесь из торфа и кородревесных отходов подавалась в приемный бункер с перемешивающим устройством и далее шнеком направлялась в прессовальную камеру, где распределялась на матрице. Вращающиеся валки предварительно сжимали смесь и проталкивали через прессовальные каналы матрицы.

Для выполнения теплотехнических исследований и элементного анализа образцы были подвергнуты размолу в шаровой барабанной мельнице РМ 200 Retzsch, просеяны на ситовом анализаторе Retzsch AS 200 Control до гранулометрического состава от 63 до 125 мкм (ГОСТ Р 53335–2018, 55660–2013, 52917–2008, 55661–2013).

Теплотехнические характеристики кородревесных отходов следующие: зольность – 1,16 % а. с. м.; минимальная теплота сгорания – 18,486 МДж/кг, выход летучих веществ – 81,86 % а. с. м. Торфа: зольность – 2,46 % а. с. м.; минимальная теплота сгорания – 21,780 МДж/кг и выход летучих веществ – 78,43 % а. с. м. Характеристики полученных пеллет представлены в таблице.

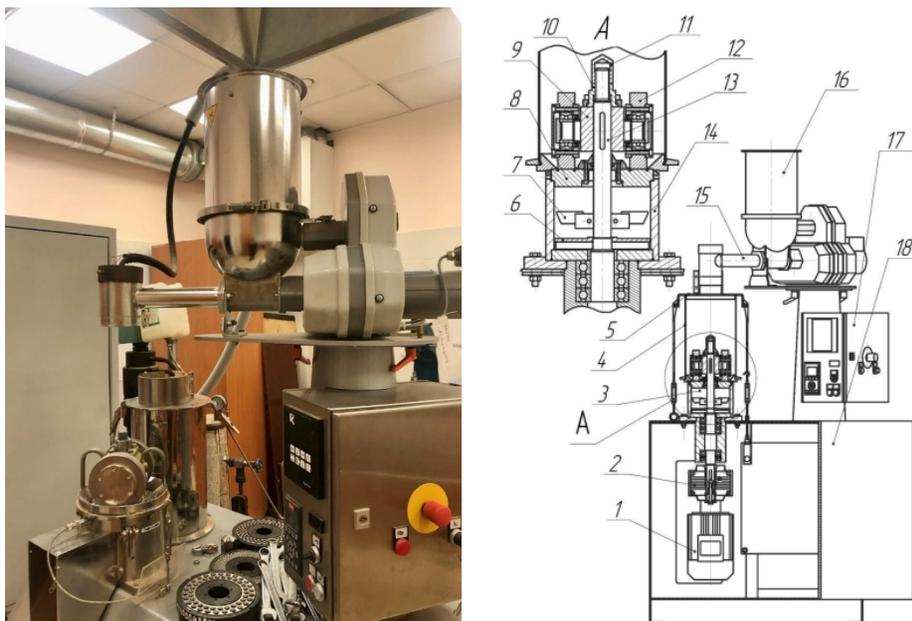


Рис. 1. Пресс-гранулятор Amandus Kahl 14-175

1 – асинхронный двигатель мощностью 3 кВт; 2 – редуктор с понижающей передачей; 3 – прессовальная камера; 4 – кожух; 5 – противопылевой колпак с рассекателем; 6 – вращающееся дно; 7 – ножи; 8 – каналы матрицы; 9 – бегунковая головка; 10 – регулировочная гайка; 11 – контргайка; 12 – бегунки; 13 – главный вал; 14 – корпус; 15 – дозирующее устройство; 16 – приемный бункер с перемешивающим устройством и шнеком; 17 – распределительный шкаф; 18 – корпус гранулятора

Fig. 1. The Amandus Kahl 14-175 pellet-press

1 – 3 kW asynchronous motor; 2 – reduction gearbox; 3 – bale chamber; 4 – casing; 5 – dust cover with a divider; 6 – rotating bottom; 7 – knives; 8 – matrix channels; 9 – slider head; 10 – adjusting nut; 11 – lock-nut; 12 – sliders; 13 – main shaft; 14 – housing; 15 – dispenser; 16 – receiving hopper with a mixing device and a screw; 17 – distribution cabinet; 18 – pelletizer housing

Характеристики пеллет из торфа и кордревесных отходов

The characteristics of peat and bark waste pellets

Параметр	ГОСТ 33103.2–2017	Значение
Диаметр/длина (мм)	10	10 / 25
Влажность на рабочую массу (%)	0,50	4,79
Зольность (% а. с. м.)	2,00	1,79
Механическая прочность (%)	95,0	96,2
Содержание мелочи (%)	3,0	2,2
Насыпная плотность (кг/м ³)	650	660
Минимальная теплота сгорания на рабочую массу (МДж/кг)	–	19,81
Содержание азота (% а. с. м.)	2,00	1,59
Содержание серы (% а. с. м.)	0,200	0,179
Содержание хлора (% а. с. м.)	0,01	0
Выход летучих веществ (%)	–	78,42

Элементный анализ был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000.

Термический анализ выполнен на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter Netzsch в диапазоне температур 30–700 °С со скоростью 10 °С/мин в среде аргона и воздуха с расходом 20 см³/мин. Для исследования процессов сушки и термического разложения использовались кривые, характеризующие изменение массы (ТГ – термогравиметрия) и скорости этого процесса (ДТГ – дифференциальная термогравиметрия).

Результаты исследования и их обсуждение

На грануляторе был подобран режим, при котором получились пеллеты (рис. 2), соответствующие стандарту ГОСТ 33103.2–2017 – цилиндрической формы, длиной 25 мм, с обломленными концами.



Рис. 2. Полученные гранулы из торфа и кордревесных отходов

Fig. 2. The resulting pellets from peat and bark waste

Элементный состав (%) пеллет следующий:

Кремний.....	1,440
Алюминий.....	0,540
Железо.....	0,155
Кальций.....	0,440
Магний.....	0,320
Сера.....	0,179
Калий.....	0,069
Фосфор.....	0,092
Титан.....	0,018
Марганец.....	0,011
Медь.....	0,004
Мышьяк.....	0,006
Хром.....	0,002
Стронций.....	0,002
Бром.....	0,005
Цинк.....	0,009
Рубидий.....	0,001
Кислород.....	38,200
Углерод.....	49,900
Азот.....	1,590
Водород.....	6,980

Кремний, алюминий, кальций и железо являются преобладающими элементами в золе пеллет. Повышенное содержание в пеллетах алюминия и взаимодействие материала с кремнием в процессе горения биотоплива повышают шлаковую и эрозионную способности образующихся очаговых остатков и их налипание на поверхности нагрева. Содержание щелочных элементов (калий, натрий) в полученных гранулах низкое – 0,07 %. Это означает, что при их сжигании снизится вероятность налипания легкоплавких соединений калия на поверхности нагрева, в топках с кипящим слоем топливо с небольшим содержанием калия позволит избежать явлений агломерации кипящего слоя. Наличие в составе пеллет соединений серы говорит о необходимости исключения низкотемпературной коррозии хвостовых поверхностей нагрева при сжигании этих пеллет в промышленных энергоустановках [11, 19].

На рис. 3–4 показаны термограммы в виде кривых ТГ и ДТГ для различных пеллет из торфа и кородревесных отходов в средах воздуха и аргона.

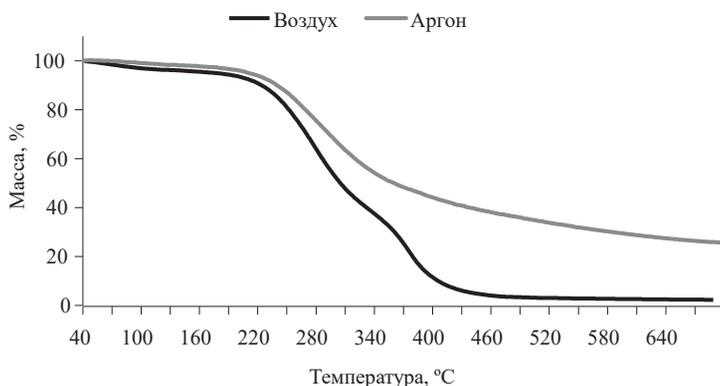


Рис. 3. Термограммы изменения массы пеллет из торфа и кородревесных отходов при скорости нагрева 20 °C/мин в диапазоне температур 40–700 °C в средах воздуха и аргона

Fig. 3. The thermograms of changes in the mass of pellets from peat and bark waste at a heating rate of 20 °C/min in the temperature range of 40–700 °C in air and argon mediums

Как показано на рис. 3, 1-я стадия потери массы протекает в диапазоне низких температур от 40 до 170 °C и приводит к незначительному уменьшению массы (на 4,9 % в воздухе и на 2,2 % в аргоне) в обоих опытах. Это связано с испарением воды и выделением легких летучих веществ из образцов. В интервале температур от 170 до 430 °C у образцов уходит наибольшая часть массы, что соответствует разложению гемицеллюлозы [13, 15, 18].

Стадия пиролиза характеризуется невысокой и очень медленной потерей массы, что связано с разложением целлюлозы. В случае с биотопливом масса на стадии пиролиза уменьшается из-за окислительной дегградации, т. е. летучие вещества выделяются и сгорают [13].

Скорость потери массы в воздухе достигла максимума при температуре 281 °C, при этом также наблюдался пик скорости изменения массы при 378 °C. Скорость уменьшения массы в аргоне становилась максимальной при 283 °C, при этом не наблюдался 2-й пик скорости изменения массы, как в 1-м опыте. При такой температуре целлюлоза разлагалась, в то время как лигнин продолжал разрушаться [17].

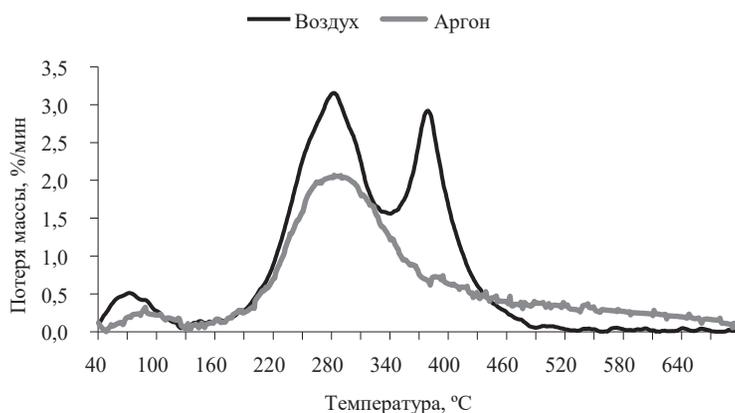


Рис. 4. Термограммы скорости потери массы пеллет из торфа и кородревесных отходов при скорости нагрева 20 °С/мин в диапазоне температур 40–700 °С в средах воздуха и аргона

Fig. 4. The thermograms of the mass loss rate of pellets from peat and bark waste at a heating rate of 20 °C/min in the temperature range of 40–700 °C in air and argon mediums

Разложение лигнина продолжалось с низкой скоростью при температуре выше 420 °С. Лигнин, как правило, является наиболее трудноразрушаемым компонентом по сравнению с целлюлозой и гемицеллюлозой. Хотя разложение этой составляющей может начаться уже при 160 °С, оно происходит медленно, а температура при этом достигает 900 °С. Причина потери массы при температуре от 420 °С – сгорание коксового остатка [14, 20].

Заключение

Получены топливные пеллеты из смеси торфа (80 %) и кородревесных отходов (20 %) с теплотой сгорания 19,81 МДж/кг, выходом летучих веществ 78,42 % и зольностью 1,79 %. Добавление кородревесных отходов к торфу позволило снизить зольность пеллет и увеличить их механическую прочность.

Термические исследования пеллет показали, что выход летучих веществ совпадает с диапазоном температур от 170 до 430 °С, что соответствует стадии разложения гемицеллюлозы. Процесс пиролиза пеллет в воздушной среде характеризуется 2 пиками при температурах 281 и 378 °С. Сгорание коксового остатка осуществляется при температуре от 420 °С.

Основными золо- и шлакообразующими элементами полученных пеллет являются кремний, алюминий, кальций и железо. Содержание серы, мышьяка и цинка в пеллетах составило 0,179, 0,006, и 0,009 % соответственно. Не обнаружены кадмий, ртуть, свинец и никель.

Преимуществами созданного топлива перед традиционными гранулами из древесных отходов являются более высокая теплота сгорания и меньшее содержание щелочных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беликова С.С., Беликов А.В. Восток и Запад: глобальные вызовы на пути достижения углеродной нейтральности // Управление. 2022. Т. 10, № 2. С. 5–13.

Belikova S.S., Belikov A.V. East and West: Global Challenges to Achieving Carbon Neutrality. *Upravlenie = Management (Russia)*, 2022, vol. 10, no. 2, pp. 5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.26425/2309-3633-2022-10-2-5-13>

2. Бобылев С.Н., Барабошкина А.В., Джу Сюан. Приоритеты низкоуглеродного развития для Китая // Государственное управление. Электрон. вестн. 2020. № 82. С. 114–139.

Bobylev S.N., Baraboshkina A.V., Zhu Xuan. Priorities of Low-Carbon Development for China. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik = Public Administration. E-journal*, 2020, no. 82, pp. 114–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/20701381-2020-10095>

3. Бояркина А.В. Экологическое направление во внешнеполитической стратегии КНР // Вестн. РУДН. Сер.: Международные отношения. 2021. Т. 21, № 2. С. 325–337.

Boyarkina A.V. Ecological Dimension in China's Foreign Policy Strategy. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Mezhdunarodnye otnosheniya = Vestnik RUDN. International Relations*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 325–337. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-0660-2021-21-2-325-337>

4. Бушув В., Зайченко В., Чернявский А., Шевченко А. Энергетический переход: перспективы использования биомассы // Энергетическая политика. 2024. № 2(193). С. 68–83.

Bushuev V., Zaichenko V., Chernyavsky A., Shevchenko A. Energy Transition: Development Prospects. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2024, no. 2(193), pp. 68–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.46920/2409-5516-2024-2193-68>

5. Веселова Д.Н. Климатическая политика Российской Федерации: законодательные и институциональные аспекты // ДискурсПи. 2021. Т. 18, № 3. С. 96–111.

Veselova D.N. Climate Policy of the Russian Federation: Legislative and Institutional Aspects. *DiskursPi = Discourse P*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 96–111. (In Russ.). https://doi.org/10.17506/18179568_2021_18_3_96

6. Галимзянова А.К. Климатическая дипломатия Китая и Германии // Восточный альманах: сб. науч. ст. Вып. V. М.: Квант Медиа, 2021. С. 14–29.

Galimzyanova A.K. Climate Diplomacy of China and Germany. *Vostochnyj al'manakh: Collection of Scientific Articles*, iss. V. Moscow, Kvant Media Ltd., 2021, pp. 14–29. (In Russ.).

7. Дубоделова Е.В., Сычева Н.А., Хмызов И.А., Снопкова Т.А., Соловьева Т.В. Особенности технологии топливных пеллет из древесины лиственных пород // Тр. БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2012. № 4. С. 166–168.

Dubodelova E.V., Sycheva N.A., Khmyzov I.A., Snopkova T.A., Solov'eva T.V. Features of the Technology of Fuel Pellets from Hardwood. *Trudy BGTU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya = Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 2012, no. 4, pp. 166–168. (In Russ.).

8. Зотова Е.В., Сафонов А.О., Платонов А.Д. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет // Лесотехн. журн. 2014. № 1(13). С. 127–132.

Zotova E.V., Safonov A.O., Platonov A.D. Analytical Study of the Parameters Determining the Technology of Wood Pellet Production. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2014, no. 1(13), pp. 127–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/3355>

9. Кавешников Н.Ю. Стратегия ЕС в области климата и энергетики // Современная Европа. 2015. № 1(61). С. 93–103.

Kaveshnikov N.Y. European Union's Climate and Energy Strategy. *Sovremennaya Evropa = Contemporary Europe*, 2015, no. 1(61), pp. 93–103. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.15211/soveurope1201593103>

10. Ковалев Ю.Ю., Поршинева О.С. Страны БРИКС в международной климатической политике // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. 2021. Т. 21, № 1. С. 64–78.

Kovalev Yu.Yu., Porshneva O.S. BRICS Countries in International Climate Policy. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Mezhdunarodnye otnosheniya* = Vestnik RUDN. International Relations, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 64–78. (In Russ.).

<https://doi.org/10.22363/2313-0660-2021-21-1-64-78>

11. Рябов Г.А., Литун Д.С. Агломерация при сжигании и газификации топлив в кипящем слое // Теплоэнергетика. 2019. № 9. С. 42–59.

Ryabov G.A., Litun D.S. Agglomeration during Combustion and Gasification of Fuels in a Fluidized Bed. *Теплоэнергетика*, 2019, no. 9, pp. 42–59. (In Russ.).

<https://doi.org/10.1134/S0040363621010173>

12. Сычева Н.А., Хмызов И.А., Соловьева Т.В. Влияние режима гранулирования и состава топливных пеллет на их прочностные свойства // Лесн. вестн. / Forestry bulletin. 2016. № 20(3). С. 72–79.

Sychova N.A., Hmyzov I.A., Soloueva T.V. The Influence of Granulation and Pellets Composition on Their Strength Properties. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 72–79. (In Russ.).

13. Aniza R., Chen W.-H., Kwon E.E., Bach Q.-V., Hoang A.T. Lignocellulosic Bio-fuel Properties and Reactivity Analyzed by Thermogravimetric Analysis (TGA) toward Zero Carbon Scheme: A Critical Review. *Energy Conversion and Management: X*, 2024, vol. 22, art. no. 100538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538>

14. Balogun A.O., Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Adegoke S.O., Alayat A.M., McDonald A.G. Physico-Chemical Characterization, Thermal Decomposition and Kinetic Modeling of *Digitaria sanguinalis* under Nitrogen and Air Environments. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, vol. 26, art. no. 101138. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101138>

15. Escalante J., Chen W.-H., Tabatabaei M., Hoang A.T., Kwon E.E., Andrew Lin K.-Y., Saravanakumar A. Pyrolysis of Lignocellulosic, Algal, Plastic, and Other Biomass Wastes for Biofuel Production and Circular Bioeconomy: A Review of Thermogravimetric Analysis (TGA) Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 169, art. no. 112914. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112914>

16. Gilvari H., de Jong W., Schott D.L. Quality Parameters Relevant for Densification of Bio-Materials: Measuring Methods and Affecting Factors – A Review. *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 120, pp. 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.013>

17. Kamba P.L.W., Vitoussia T., Bissoue A.N., Nguimbous E.N., Dieudjio D.N., Bot B.V., Njeugna E. Physical and Energetic Characteristics of Pellets Produced from Movingu Sawdust, Corn Spathes, and Coconut Shells. *Energy Reports*, 2024, vol. 11, pp. 1291–1301. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.006>

18. Pradhan P., Mohan O., Kurian V., Kumar A. Production and Quality Analysis of Biofuel Pellets from Canadian Forest and Agricultural Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 2025, vol. 194, art. no. 107697. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107697>

19. Uzoagba C.E.J., Okoroigwe E., Kadivar M., Anye V.C., Bello A., Ezealigo U., Ngasoh F.O., Pereira H., Onwualu P.A. Characterization of Wood, Leaves, Barks, and Pod Wastes from *Prosopis africana* Biomass for Biofuel Production. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, iss. 3, pp. 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.007>

20. Yaqoob A.A., Sekeri S.H., Othman M.B.H., Ibrahim M.N.M., Feizi Z.H. Thermal Degradation and Kinetics Stability Studies of Oil Palm (*Elaeis Guineensis*) Biomass-Derived Lignin Nanoparticle and its Application as an Emulsifying Agent. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, vol. 14, iss. 6, art. no. 103182. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103182>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-155-168

Повышение эффективности использования побочных продуктов фанерного производства

В.К. Любов, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; vk.lubov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.05.24 / Одобрена после рецензирования 07.08.24 / Принята к печати 11.08.24

Аннотация. Для применения отходов фанерного производства в целях получения энергии, обеспечивающей работу НАО «СВЕЗА Усть-Ижора», была смонтирована мини-теплоэлектроцентраль с 2 котлами Е-40-2.25-305ОР и турбиной. Предусмотрена 2-ступенчатая золоочистка продуктов сгорания. Первая ступень характеризуется удалением и возвратом крупных фракций на вибрационную решетку. На второй ступени продукты проходят через рукавные фильтры. Энергообследование котлоагрегатов выявило, что комплекс газоочистки является причиной их частых остановок и пусков, дополнительных теплопотерь и сокращения жизненного цикла оборудования. В связи с этим вместо рукавных фильтров установлен комплекс пыле- и золоулавливания (КПЗУ-10×6×2). Однако при этом степень улавливания твердых частиц комплексом составила не более 80 %, наблюдалось налипание золы на рабочее колесо дымососа, что вызывало дисбаланс и уменьшение жизненного цикла дымососа и необходимость остановки котла не реже чем 1 раз в неделю. Целью данной статьи стало установление причин повышенных выбросов твердых частиц и оксида углерода, ограниченного периода работы котлоагрегата между чистками, а также отсутствия возможности оперативного вывоза золы и шлака на полигон. Комплексный анализ работы котлоагрегата проводился на основе эксплуатационных и экологических показателей работы котла, теплотехнических, гранулометрических характеристик проб сжигаемого биотоплива и образующихся очаговых остатков, а также их элементного состава и термогравиметрических характеристик для дробленки фанеры. Модернизация газоочистного комплекса обеспечила функционирование котлоагрегата с номинальной паропроизводительностью и уменьшила количество его остановок между чистками в 7–21 раз. Однако использование котла с более высокой производительностью обусловило рост полидисперсности летучей золы и содержания в ней горючих веществ, что стало одной из причин ее тления в сборном контейнере. Периодические включения вибрационной решетки привели к значительной нестабильности экологических показателей. Исследование загрязняющей способности золы обрезков фанеры обнаружило, что они являются самым сильным загрязняющим компонентом сжигаемой смеси. Изучение термических процессов в дробленке фанеры в воздушной и инертной средах показало заметное влияние наличия клея на основе фенолоформальдегидной смолы.

Ключевые слова: фанерное производство, отходы фанерного производства, газоочистная установка, котел, биотопливо, вредные вещества, коэффициент полезного действия, очаговые остатки

Благодарности: Автор выражает благодарность ЦКП НО «Арктика» за возможность использования при проведении исследования рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800, анализатора Euro EA-3000 и синхронного термоанализатора STA 449 F3 Jupiter.

Для цитирования: Любов В.К. Повышение эффективности использования побочных продуктов фанерного производства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 155–168. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-155-168>

Original article

Improving the Efficiency of Using Plywood Production By-Products

Victor K. Lyubov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; vk.lubov@mail.ru

Received on May 26, 2024 / Approved after reviewing on August 07, 2024 / Accepted on August 11, 2024

Abstract. To use plywood production waste to generate energy ensuring the operation of the non-public limited liability company “SVEZA Ust-Izhora” a mini-heat-and-power plant with 2 E-40-2.25-305OP boilers and a turbine has been installed. A 2-stage ash clearing of combustion products has been provided. The 1st stage ensures the removal and return of coarse fractions to the vibrating grid. At the 2nd stage, the products pass through bag filters. An energy inspection of the boiler units has revealed that the gas cleaning system is the cause of their frequent shutdowns and starts, additional heat losses and a reduction in the equipment life cycle. In this regard, instead of bag filters, a dust and ash collection complex (KPZU-10×6×2) has been installed. However, the degree of solid particle capture by the complex has been no more than 80 %, ash has been observed sticking to the impeller of the smoke exhauster, which has caused an imbalance and a reduction in the life cycle of the smoke exhauster and the need to stop the boiler at least once a week. The aim of this article has been to establish the reasons for the increased emissions of solid particles and carbon monoxide, the limited period of operation of the boiler unit between cleanings, as well as the lack of the possibility of prompt removal of ash and slag to the landfill. A comprehensive analysis of the boiler unit operation has been carried out on the basis of the operational and environmental performance indicators of the boiler, thermal engineering and granulometric characteristics of samples of the combusted biofuel and the resulting focal residues, as well as their elemental composition and thermogravimetric characteristics for plywood chips. The modernization of the gas cleaning complex has ensured the functioning of the boiler with a nominal steam capacity and has reduced the number of its stops between cleanings by 7–21 times. However, the use of a boiler with a higher capacity has led to an increase in the polydispersity of fly ash and the content of combustible substances in it, which has become one of the reasons for its smoldering in the collection container. Periodic switching on of the vibrating grid has resulted in significant instability of environmental indicators. A study of the polluting potential of plywood scrap ash has found it to be the most powerful polluting component in the combusted mixture. The study of thermal processes in plywood chips in air and inert environments has shown a noticeable influence of the presence of glue based on phenol-formaldehyde resin.

Keywords: plywood production, plywood production waste, gas cleaning unit, boiler, biofuel, harmful substances, efficiency, combustion residue

Acknowledgements: The author expresses gratitude to the Center for Collective Use of Scientific Equipment “Arktika” for the opportunity to use the XRF-1800 X-ray fluorescence spectrometer, the Euro EA-3000 analyzer and the STA 449 F3 Jupiter synchronous thermal analyzer during the study.

For citation: Lyubov V.K. Improving the Efficiency of Using Plywood Production By-Products. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 155–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-155-168>

Введение

Производство фанеры характеризуется невысоким выходом основной продукции из древесного сырья. Так, объемный выход лиственной фанеры составляет 46–55 % (без включения в баланс коры). Значительная часть перерабатываемого сырья превращается в побочные продукты, которые можно полезно использовать в других отраслях промышленности [1–8, 13–17, 20–23]. Энергетическое применение образующихся побочных продуктов является одним из важнейших направлений снижения себестоимости готовой продукции и повышения эффективности фанерного производства. Кроме этого, оно позволяет устранить образование, а в ряде случаев и ликвидировать, свалки и отвалы, а также сохранить плодородные почвы.

Наиболее распространенным способом энергетического использования отходов фанерного производства является их сжигание с целью получения тепловой и электрической энергии, необходимой в технологическом цикле производства [2, 5–7, 9–11, 15–17, 23–26]. В 2020 г. в НАО «СВЕЗА Усть-Ижора» была построена и запущена мини-теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) с 2 котлоагрегатами Е-40-2.25-305ОР (рис. 1) и турбиной. Для очистки продуктов сгорания от взвешенных частиц каждый котел оборудован 2-ступенчатой системой золоочистки [9]. Первой ступенью является мультициклон, обеспечивающий отделение частиц уноса из дымовых газов с их последующим аэродинамическим вводом на вибрационную решетку. Вторая ступень – рукавные фильтры. В ходе эксплуатации мини-ТЭЦ неоднократно наблюдались воспламенения в ступенях системы золоулавливания.

Энергетическое обследование мини-ТЭЦ позволило сделать вывод [9], что установленная система газоочистки является неудачной. Она лимитирует эксплуатацию котла между чистками рукавных фильтров, сокращая ее продолжительность до 8–24 ч ввиду ограничений по тяге. Работа котлов в нестационарных режимах приводит к появлению дополнительных энергопотерь, которые необходимо учитывать при определении коэффициента полезного действия (КПД) и удельных расходов топлива, а также значительно уменьшает жизненный цикл котлов. Данные обстоятельства сделали необходимой модернизацию системы золоочистки.

Цель данной работы – выявление причин повышенных выбросов твердых частиц и оксида углерода, ограниченного периода работы котла между остановками для его чистки, а также отсутствия возможности оперативного вывоза очаговых остатков на полигон.

Объекты и методы исследования

На стационарном котлоагрегате № 1 в 2021 г. была модифицирована система золоулавливания. При этом вместо рукавных фильтров установлен комплекс пыле- и золоулавливания (КПЗУ-10×6×2) производительностью 120 тыс. м³/ч, разработанный ООО «Томскгазоочистка». Данный комплекс представляет собой групповой золоуловитель из параллельно установленных пылеуловителей КПЗУ-10 (12 шт.), с диаметром корпуса 1500 мм, производительностью по газу 10 тыс. м³/ч каждый, объединенных в группу по 6 шт. в 2 яруса и разнесенных по высоте. Номинальное аэродинамическое сопротивление комплекса составляет 2,5 кПа. В состав каждого золоуловителя входят циклон, регулировочный шибер, раскручиватель, пылепровод, пылевой бункер, шлюзовой затвор и вибратор. Комплекс позволяет непрерывно улавливать тонкодисперсные материалы с учетом изменяющейся производительности котлоагрегата. Уловленные частицы с помощью шнековых конвейеров (2 шт.), к каждому из которых подключено по 6 пылевых бункеров, направляются в контейнер сбора пыли, оборудованный реверсивным шнеком для равномерного распределения золы-уноса по сечению контейнера.

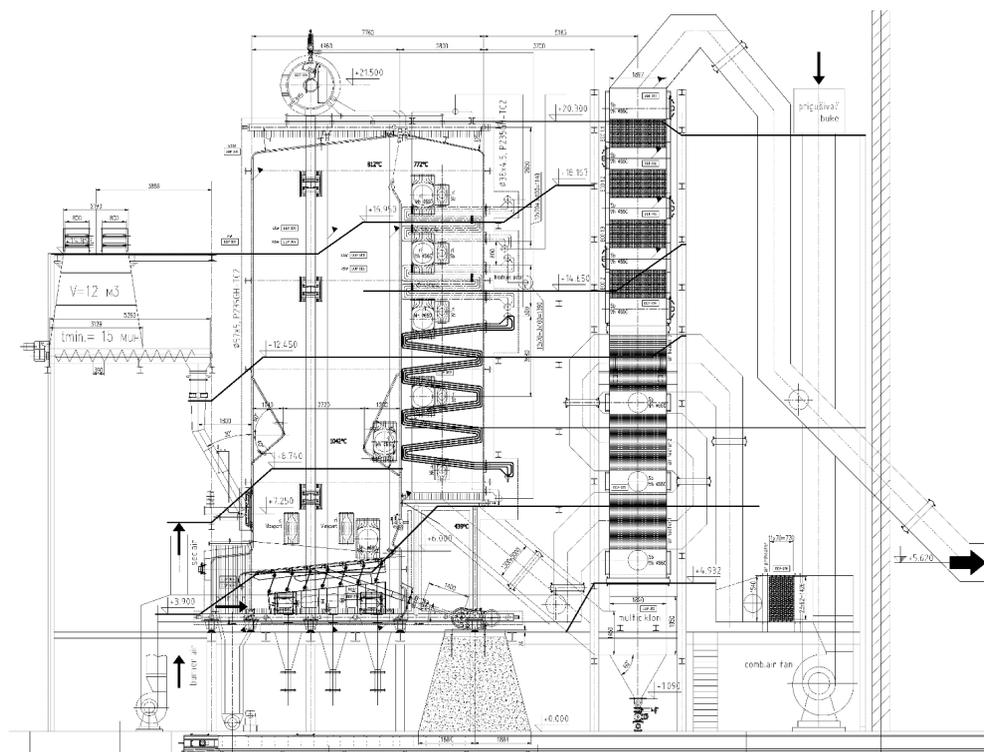


Рис. 1. Принципиальная схема котлоагрегата E-40-2.25-305OP

Fig. 1. The schematic diagram of the E-40-2.25-305OP boiler unit

Очищенный в циклоне газ поступает в раскручиватель, после чего собирается в общий газоход и с помощью дымососа направляется в трубу и далее в атмосферу. Для нормальной работы комплекса и обеспечения оптимальных условий сепарации твердых частиц реализована возможность плавного регулирования скорости запыленных газов на входе в циклоны с помощью шиберов.

В техническом задании на проектирование и изготовление комплекса пыле- и золоулавливания была принята концентрация твердых частиц на входе не более 10 г/м^3 . При этом разработчиками проекта взята завышенная эффективность очистки ($98,0\text{--}99,9\%$) для КПЗУ- $10\times 6\times 2$, что позволило бы достичь концентрации твердых частиц лучше целевого значения – 305 мг/м^3 . Учитывая, что инерционные пылеуловители не могут обеспечить такую степень очистки, в эксплуатационных условиях не удалось добиться стабильных концентраций твердых частиц ниже целевого показателя (рис. 2).

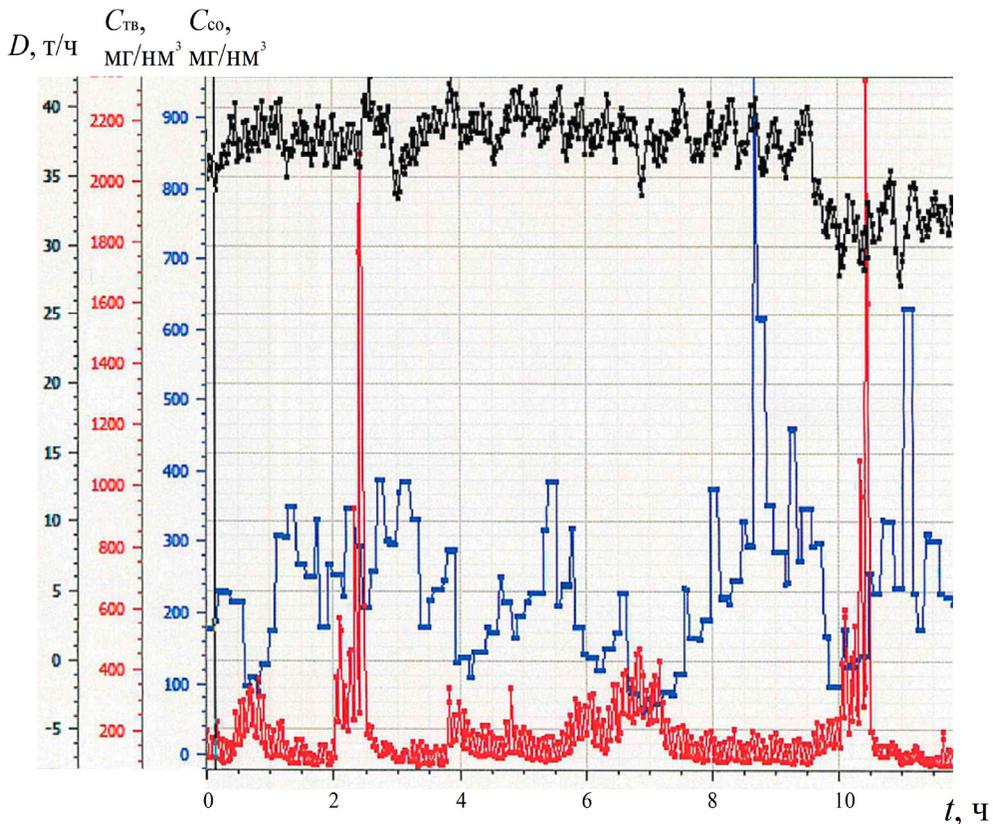


Рис. 2. Изменение паропроизводительности (D) и концентраций твердых частиц ($C_{\text{ТВ}}$) и оксида углерода ($C_{\text{СО}}$) для периода времени (t) работы котла. Черная линия – выход перегретого пара из котла в коллектор; красная и синяя – концентрации твердых частиц и монооксида углерода в дымовых газах соответственно

Fig. 2. The change in steam capacity (D) and concentrations of solid particles ($C_{\text{ТВ}}$) and carbon monoxide ($C_{\text{СО}}$) for the time period (t) of boiler operation. Black line – superheated steam output from the boiler into the collector; red – concentration of solid particles in glue gases; blue – concentration of carbon monoxide in flue gases

Необходимо отметить, что колебания концентрации твердых частиц в диапазоне $100\text{--}600 \text{ мг/м}^3$ вызваны работой вибрационной решетки и пульсациями, которые она создает в газовом тракте котлоагрегата [9].

Включение в работу системы паровой сажеобдувки влечет за собой резкий рост содержания твердых частиц в дымовых газах и, как следствие, увеличение концентрации твердых частиц в уходящих газах до $>2000 \text{ мг/м}^3$.

Исходя из эксплуатационных данных фактическая степень улавливания твердых частиц составляет не более 80% . При этом наблюдается налипание

золы на рабочее колесо дымососа (со скоростью 2–8 мм в неделю), что вызывает дисбаланс в работе и уменьшение жизненного цикла дымососа. Налипание золовых частиц на лопатки рабочего колеса дымососа обуславливает необходимость остановки котлоагрегата не менее чем 1 раз в неделю, что негативно сказывается на технико-экономических показателях инвестиционного проекта.

Для проведения комплексного анализа работы котлоагрегата после модернизации системы газоочистки использовались эксплуатационные и экологические характеристики работы котла, полученные с помощью системы мониторинга АСУ ТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами), а также результаты исследования проб сжигаемого биотоплива и образующихся очаговых остатков. Теплотехнические свойства топливной смеси определялись по ГОСТ Р 54186–2010, ГОСТ Р 54211–2010, ГОСТ Р 54185–2010 и ГОСТ Р 54191–2010, удельная теплота сгорания – с помощью калориметра ИКА С 2000 basic Version 2 в соответствии с ISO 1928. Элементный состав биотопливной смеси и образующейся золы – рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-8000 и анализатора Euro EA-3000. Гранулометрический состав биотоплива и очаговых остатков устанавливались на анализаторах AS 400 и AS 200 Control по ГОСТ Р 54188–2010, ГОСТ Р 54189–2010. Использованы также молотковая мельница «Борей» для измельчения обрезков фанеры и аналитический ситовой анализатор Retzsch AS 200 Control для просеивания порошкообразного материала. Процессы, протекающие при нагреве биотоплива в инертной и окислительной средах, исследованы на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter. Обработка полученных данных проводилась с использованием программно-методического комплекса [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование гранулометрических характеристик летучей золы с лопаток рабочего колеса дымососа, выполненное в соответствии с требованиями [19], показало, что она имеет полидисперсный состав (коэффициент полидисперсности, $n = 1,756$; коэффициент, характеризующий крупность состава, $b = 4,452 \cdot 10^{-5}$) (рис. 3). В ней доминируют частицы размером $63 \leq x < 250$ мкм (92,58 %). Можно сделать вывод, что именно частицы указанного размера обладают наиболее высокой адгезионной способностью. Содержание горючих веществ в золе с лопаток рабочего колеса дымососа $C_{\text{гн}}^{\text{г}} = 28,14$ %.

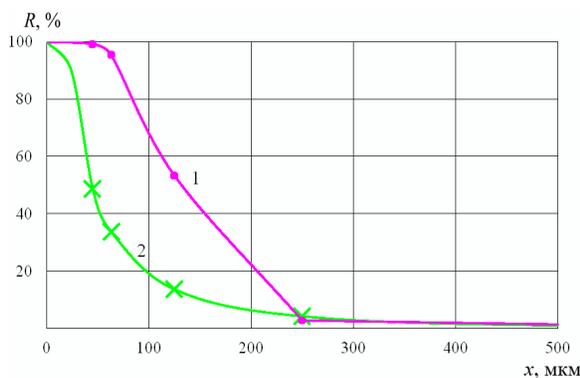


Рис. 3. Интегральные зерновые характеристики золы: 1 – с рабочих лопаток дымососа; 2 – уловленной комплексом КПЗУ-10×6×2

Fig. 3. The integral grain characteristics of ash: 1 – from the working blades of the smoke exhauster; 2 – captured by the KPZU-10×6×2 complex

Исследование летучей золы, уловленной комплексом КПЗУ-10×6×2, показало, что она имеет очень полидисперсный и тонкофракционный ($n = 0,608$; $b = 9,028 \cdot 10^{-2}$) гранулометрический состав (рис. 3). При этом в ней доминируют частицы размером менее 45 мкм (51,22 %).

Изучение распределения горючих веществ по фракциям в летучей золе, удержанной пылеулавливающим комплексом, выявило более высокое содержание горючих веществ для частиц размером менее 45 мкм и более 1000 мкм (рис. 4, а). Однако с учетом массового содержания различных фракций превалирующее влияние на механический недожог следует приписать горючим веществам в частицах менее 45 мкм (рис. 4, б; $C_{\text{ун}}^r F_i$ – произведение пофракционного содержания горючих веществ в летучей золе и фракционного остатка). Горючих веществ в золе из контейнера сбора, уловленных золы и пыли было $C_{\text{ун}}^r = 29,73$ %.

В процессе эксплуатации пыле- и золоулавливающего комплекса обнаружено тление оставшихся горючих веществ в контейнере сбора уловленной золы и пыли, что создает высокий риск пожара и исключает возможность оперативного вывоза содержимого контейнера на полигон размещения отходов. Возможной причиной данного процесса является высокий уровень нагрузок на котлоагрегат (табл. 1), что увеличило скорости продуктов сгорания, уменьшило время пребывания горючих веществ в топке, повысило крупность уноса и суммарную массу уносимых частиц. Все перечисленное привело к росту количества горючих веществ в летучей золе.

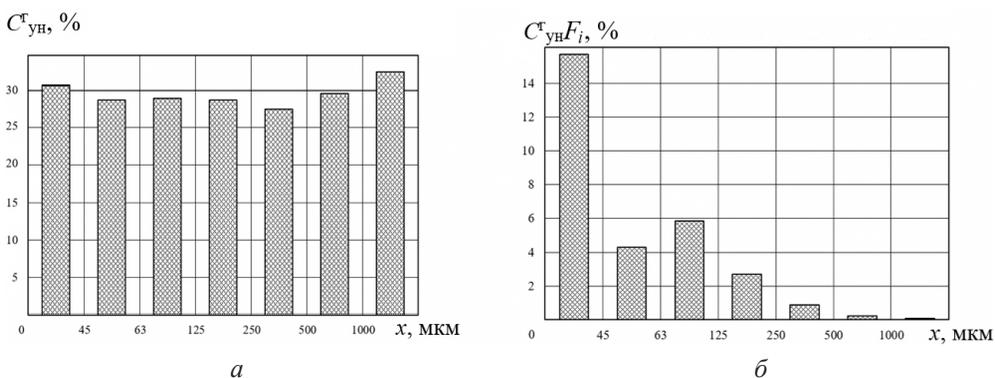


Рис. 4. Содержание горючих веществ в летучей золе, уловленной КПЗУ-10×6×2:
а – пофракционное; б – с учетом массовых долей различных фракций

Fig. 4. The content of combustible substances in the fly ash captured by the KPZU-10×6×2:
а – fractional; б – taking into account the mass fractions of various fractions

Первоначальными очагами горения являются частицы биотоплива в золе и шлаке, удаляемые с вибрационной решетке, которые, попадая в сборный контейнер, воспламеняются и вызывают последующее тление частиц уноса, находящихся поблизости [9]. Получается, что содержание горючих веществ в золе, отобранной из контейнера сбора, приведенное выше, может быть заниженным ввиду процесса тления.

Гарантированная концентрация оксида углерода в уходящих газах – 500 мг/м³. Существенная нестабильность экологических показателей и разрежения в верхней части топке вызваны работой вибрационной решетки. Ее включение вызывает встряхивание топливных частиц, сопровождающееся значительным увеличением реакционной поверхности биотоплива и объема

выделяющихся горючих веществ. Тягодутьевые установки не успевают «откликнуться» на данную ситуацию, результатом является резкое снижение разрежения в верхней части топки и рост концентраций оксида углерода в продуктах сгорания. В итоге концентрация угарного газа может превышать пороговое значение, даже при паропроизводительности котлоагрегата в 2,5 раза больше минимально допустимой (12 т/ч). Временной период колебаний концентраций вредных ингредиентов соответствует периоду включения вибрационной решетки.

Таблица 1

Основные параметры работы стационарного котлоагрегата № 1 Е-40-2.25-305ОР
The main operating parameters of the station boiler unit no. 1 Е-40-2.25-305ОР

Показатель	Опыт	
	1	2
Паропроизводительность, т/ч	39,90	36,70
Рабочее давление перегретого пара, МПа	2,07	2,15
Температура перегретого пара, °С	307,5	305,8
Температура питательной воды, °С	127,4	128,5
Влажность топлива, %	32,50	32,50
Зольность топлива, %	0,82	0,82
Минимальная теплота сгорания, МДж/кг	11,91	11,91
Температура воздуха после воздухоподогревателя, °С	224,5	225,0
Давление воздуха после воздухоподогревателя, кПа	7,70	7,20
Температура газов до/после 2-й ступени пароперегревателя, °С	699,0/529,0	647,0/508,0
Температура газов после 1-й ступени пароперегревателя, °С	460,0	448,0
Температура газов до/после воздухоподогревателя, °С	311,5/200,5	308,5/198,0
Сопротивление КПЗУ-10×6×2, кПа	1,82	1,46
Коэффициент избытка воздуха перед КПЗУ-10×6×2	1,17	1,37
Потери тепла:		
с уходящими газами, %	6,53	7,36
с химическим недожогом, %	0,12	0,17
с механическим недожогом, %	0,90	0,90
в окружающую среду, %	1,07	1,17
с физической теплотой шлака, %	0,03	0,03
Коэффициент полезного действия котла брутто, %	91,35	90,37
Полный расход топливной смеси, т/ч	9,209	8,526
Эмиссия СО, мг/МДж	184,8	209,8
Эмиссия взвешенных частиц, мг/МДж	70,86	55,95

Для установления загрязняющей способности золы, образующейся при сжигании обрезков фанеры, был исследован элементный состав дробленки фанеры и золы, получающейся при сгорании первой (табл. 2). Показано, что дробленка фанеры является самым сильным загрязняющим компонентом сжигаемой топливной смеси [9]. Так, содержание СаО в ее золе в 5 раз превышает пороговое значение [18], а окислов щелочных металлов $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 17,95\%$,

дающих плотные отложения на поверхностях нагрева, – почти в 5,8 раза. Исключение данной составляющей из топливной смеси позволит значительно снизить интенсивность загрязнения поверхностей нагрева котлоагрегата и увеличить временной интервал запуска системы сажеобдувки, что обеспечит ощутимое уменьшение залповых выбросов твердых частиц в атмосферный воздух.

Таблица 2

Основные элементы состава дробленки фанеры и ее золы, %
The main elements of the composition of plywood chips and its ash, %

Элемент	Дробленка	Зола	Элемент	Дробленка	Зола
CaO	0,777	65,000	ZnO	0,003	0,026
Fe ₂ O ₃	0,025	1,020	CuO	0,001	0,043
SO ₃	0,042	0,261	MnO	0,009	0,710
SiO ₂	0,046	4,980	Cr ₂ O ₃	0,002	0,034
P ₂ O ₅	0,021	0,643	Cl	0,077	0,556
NiO	0,001	0,012	Na ₂ O	0,521	15,900
K ₂ O	0,071	2,050	O	44,800	0,939
Al ₂ O ₃	0,015	0,735	N	1,510	0,189
MgO	0,035	2,880	C	46,50	3,36
SrO	0,002	0,134	H	5,550	0,471

Изучение гранулометрического состава дробленки обрезков фанеры показало, что она имеет полидисперсный ($n = 1,655$), крупнодисперсный состав ($b = 3,113 \cdot 10^{-8}$). При этом доминируют частицы размером $x \geq 30$ мкм (49,20 %). Такой состав полностью соответствует требованиям для котлов со слоевым сжиганием топлива.

В Архангельской области дробленка фанеры успешно сжигается в водотрубных котлах при ее добавке к топливной щепе. Данный побочный продукт фанерного производства имеет достаточно высокие энергетические показатели на рабочую массу (влажность – 5,00 %; зольность – 1,49 %; низшая удельная теплота сгорания – 17,71 МДж/кг и выход летучих веществ на горючую массу – 77,00 %).

Промышленно-эксплуатационные испытания котельных установок различного конструктивного исполнения и тепловой мощности показали, что наиболее трудно используемым отходом фанерного производства является дробленка фанеры, ввиду содержания в ней клея на основе фенолоформальдегидных смол. Поэтому при подготовке обрезков фанеры к исследованиям их измельчали в молотковой мельнице и затем просеивали на аналитическом ситовом анализаторе. При проведении опытов на совмещенном термоанализаторе использовали фракцию с размером частиц от 125 до 500 мкм. Термический анализ образцов дробленки фанеры проводили в среде азота с расходом газа 50 мл/мин и в воздушной среде. Пробы нагревали со скоростью 10 °С/мин до 700 °С в среде азота и до 975 °С в воздушной среде. Данные опыты позволили получить термограммы, одна из них приведена на рис. 5. Анализ процессов проводили с использованием кривых изменения массы (ТГ), скорости этого процесса (ДТГ) и тепловых эффектов в образцах (ДТА). Температуры для различных стадий термического разложения фанеры перечислены в табл. 3.

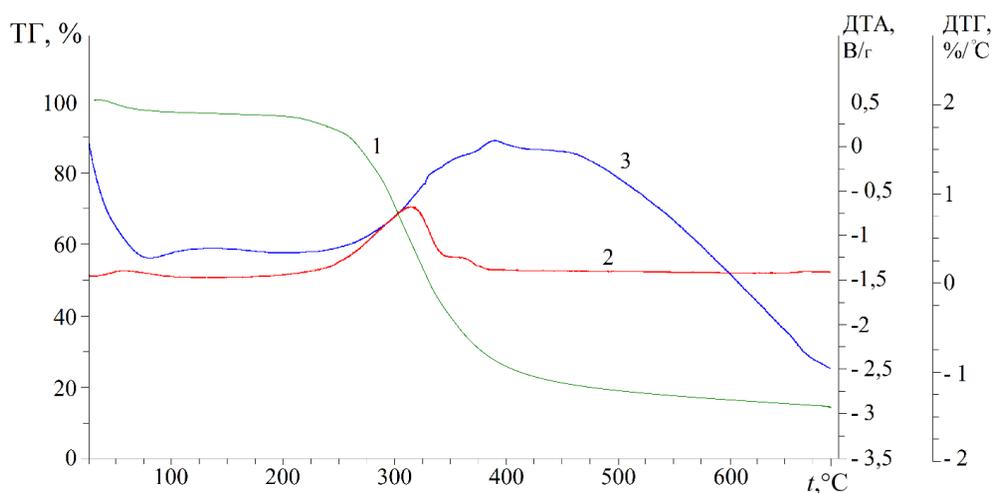


Рис. 5. Термограммы процесса термического разложения в среде азота дробленки фанеры при скорости нагрева 10 °С/мин: 1 – ТГ; 2 – ДТГ; 3 – ДТА

Fig. 5. The thermograms of the thermal decomposition process in a nitrogen environment of plywood chips at a heating rate of 10 °C/min: 1 – TG; 2 – DTG; 3 – DTA

Таблица 3

Результаты термогравиметрического анализа процесса термического разложения дробленки фанеры

The results of thermogravimetric analysis of the process of thermal decomposition of plywood chips

Стадия	Среда	Температурный диапазон, °С
Сушка	Инертная	30–110
Выход летучих веществ		190–270*–500 (315)**
Сушка	Воздушная	30–110
Выход и горение летучих веществ		175–210*–350 (277)***
Горение кокса		370–550 (413)****

*Температура начала интенсивного выхода летучих веществ. **, ***, ****Температура, соответствующая максимальной скорости выхода летучих веществ, их выхода и горения, выгорания коксового остатка соответственно.

Экспериментальные данные позволили сделать следующие выводы:

сушка дробленки фанеры в инертной и воздушной средах протекает аналогично сушке других видов биотоплива [12];

температура начала интенсивного выхода летучих веществ близка значениям для древесины березы, ели и сосны;

температура, соответствующая максимальной скорости выхода летучих веществ в среде азота, для дробленки меньше, чем для других видов биотоплива [12];

термическое разложение сильно растянуто во времени и продолжается даже по достижении температуры процесса 470 °С, при этом после 370 °С скорость убыли массы значительно уменьшается и с 380 °С зависимость потери массы имеет линейный характер;

терморазложение дробленки фанеры во всем исследованном диапазоне температур характеризуется как эндотермический процесс;

в среде воздуха интенсивный выход летучих веществ при максимальной скорости их выделения начинается значительно раньше при существенно более низких температурах;

наибольшая скорость выгорания коксового остатка для дробленки фанеры достигается при более низких температурах, чем для древесины березы, ели и сосны.

Данные существенные отличия, очевидно, связаны с наличием в исследуемом материале клея на основе фенолоформальдегидной смолы, который применяется в фанерном производстве.

Заключение

Модернизация 2-й ступени газоочистки обеспечила возможность работы котла с более высокой производительностью и увеличила период его эксплуатации между чистками в 7–21 раз – до модернизации он составлял 8–24 ч, а после – 168 ч.

Работа котлоагрегата с более высоким уровнем нагрузок повысила скорости движения продуктов сгорания и уменьшила время пребывания горючих веществ в топочной камере, что обусловило рост полидисперсности летучей золы и содержания в ней горючих веществ. Увеличение уровня горючих веществ в летучей золе стало одной из причин ее тления в сборном контейнере. Данное обстоятельство создает высокий риск пожара и исключает возможность оперативного вывоза содержимого контейнера на полигон размещения отходов.

Слое-факельная технология сжигания побочных продуктов фанерного производства, реализованная с помощью мембранной вибрационной решетки, является источником вибрации элементов основного и вспомогательного оборудования котла, что уменьшает их жизненный цикл и увеличивает энергозатраты.

Водоохлаждаемая вибрационная решетка выступает в качестве источника пульсаций в топочной камере и последующих элементах газового тракта котла. Следствием является нестабильность экологических показателей, уровня разрежения в топочной камере и невозможность достижения гарантированной концентрации монооксида углерода (500 мг/м^3) и золовых частиц (305 мг/м^3).

Данные эксплуатации мини-теплоэлектроцентрали свидетельствуют, что степень улавливания твердых частиц составляет не более 80 %. Наблюдается налипание золы на лопатки рабочего колеса дымососа, вызывающее дисбаланс и повышенную вибрацию. Это уменьшает жизненный цикл подшипников и дымососа в целом, а также обуславливает необходимость остановки котлоагрегата не реже чем 1 раз в неделю. Результаты исследования фракционного состава летучей золы с лопаток дымососа показали, что в ней доминируют частицы размером $63 \leq x < 250 \text{ мкм}$, обладающие наиболее высокой адгезионной способностью.

Анализ загрязняющей способности золы, образующейся при сжигании дробленки фанеры, выявил, что она является самым сильным загрязняющим

компонентом сжигаемой топливной смеси: содержание CaO и окислов $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ в золе значительно превышает предельные значения.

Изучение термических процессов для дробленки фанеры в инертной и воздушной средах в температурном диапазоне 25–975 °С позволило отметить, что наличие в исследуемом материале клея на основе фенолоформальдегидной смолы оказывает здесь существенное влияние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бирюков В.Г. Технология клееных материалов и древесных плит. М., 2012. 292 с. Biryukov V.G. *Technology of Glued Materials and Wood Boards*. Moscow, 2012. 292 p. (In Russ.).
2. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 495 с. Bobovich B.B., Devyatkin V.V. *Recycling of Production and Consumption Waste*. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2000. 495 p. (In Russ.).
3. Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Основы комплексной переработки сырья. СПб.: СПб ГЛТУ, 2016. 56 с. Varankina G.S., Chubinskij A.N. *Fundamentals of Complex Processing of Raw Materials*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Technical University, 2016. 56 p. (In Russ.).
4. Волынский В.Н. Технология клееных древесных материалов. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. Т. 1. 340 с. Volynskij V.N. *Technology of Glued Wood Materials*. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022, vol. 1. 340 p. (In Russ.).
5. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденев В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 224 с. Golovkov S.I., Koperin I.F., Najdenov V.I. *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost', Publ., 1987. 224 p. (In Russ.).
6. Дубинина Н.Н., Орлов А.А., Корчук Ю.А., Лях Н.И. Энергетическое использование древесных отходов лесопильного производства // Актуальн. проблемы лесн. комплекса. 2016. № 45. С. 17–21. Dubinina N.N., Orlov A.A., Korchuk Yu.A., Lyakh N.I. *Energy Use of Sawmill Waste. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2016, no. 45, pp. 17–21. (In Russ.).
7. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 408 с. Zhuchkov P.A. *Thermal Processes in Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 408 p. (In Russ.).
8. Колесникова А.А., Будаев В.А. Технологические расчеты в производстве фанеры: учебное пособие по курсовому проектированию. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2010. 108 с. Kolesnikova A.A., Budaev V.A. *Technological Calculations in Plywood Production: Tutorial on Course Design*. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2010. 108 p. (In Russ.).
9. Любов В.К., Данилов В.Е. Экологическая и энергетическая эффективность сжигания отходов фанерного производства // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 5. С. 8–14. Lyubov V.K., Danilov V.E. *Environmental and Energy Efficiency of Plywood Production Waste Burning. Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 8–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-8-14>
10. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с. Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2017. 533 p. (In Russ.).

11. Любов В.К., Попов А.Н., Ивуть А.Е., Кондаков С.О., Седлецкий Н.И. Повышение эффективности энергетического использования отходов фанерного производства // Вестник ЧГУ. Сер.: Техн. науки. 2016. № 4. С. 28–32.

Lyubov V.K., Popov A.N., Ivut' A.E., Kondakov S.O., Sedletskij N.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Plywood Production Waste. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = Cherepovets State University Bulletin. Series: Technology, 2016, no. 4, pp. 28–32. (In Russ.).

12. Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185.

Lyubov V.K., Tsypnyatov I.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 172–185. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>

13. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса как фактор устойчивого природопользования // Инженер. вестн. Дона. 2015. № 2, ч. 2. Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (дата обращения: 21.04.25).

Mokhired A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Inzhenernyj vestnik Dona* = Engineering Journal of Don, 2015, no. 2, part 2. (In Russ.).

14. Преснякова Е.А. Утилизация отходов древесного производства // Вестн. магистратуры. 2014. Т. 1, № 11(38). С. 15–18.

Presnyakova E.A. Disposal of Wood Production Waste. *Vestnik magistratury*, 2014, vol. 1, no. 11(38), pp. 15–18. (In Russ.).

15. Разиньков Е.М., Ищенко Т.Л. Повышение эффективности фанерного производства // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 140–146.

Razinkov E.M., Ishchenko T.L. Enhancing the Efficiency of Plywood Production. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 140–146. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5c9201701e8f75.87209710

16. Сафонов Г.В., Стеценко А.В., Дорина А.Л., Авалиани С.Л., Сафонова Ю.А., Беседовская Д.С. Стратегия низкоуглеродного развития России: Возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии. М.: ТЕИС, 2016. 48 с.

Safonov G.V., Stetsenko A.V., Dorina A.L., Avaliani S.L., Safonova Yu.A., Besedovskaya D.S. *Low-Carbon Development Strategy for Russia: Opportunities and Benefits of Replacing Fossil Fuels with "Green" Energy Sources*. Moscow, TEIS Publ., 2016. 48 p. (In Russ.).

17. Семенов Ю.П., Хиллинг Б., Парикка М., Штерн Т., Сейсенбаева Г. Лесная биоэнергетика. М.: МГУЛ, 2008. 348 с.

Semenov Yu.P., Hilling B., Parikka M., Shtern T., Sejsenbaeva G. *Forest Bioenergetics*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2008. 348 p. (In Russ.).

18. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / РАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с.

Thermal Calculation of Boilers (Standard Method). St. Petersburg, ОАО Unified Energy System of Russia, All-Russian Thermal Engineering Institute, I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment, 1998. 257 p. (In Russ.).

19. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.

Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. *Thermal Engineering Tests of Boiler Installations*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p. (In Russ.).

20. Федотов А.А. Технология и оборудование производства пиломатериалов, фанеры, строганого шпона и древесно-стружечных плит. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022, 140 с.

Fedotov A.A. *Technology and Equipment for the Production of Sawn Timber, Plywood, Planed Veneer and Chipboard*. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 140 p. (In Russ.).

21. Юрьев Ю.Л. Древесный уголь. Екатеринбург: Сократ, 2007. 184 с.

Yur'ev Yu.L. *Charcoal*. Ekaterinburg, Sokrat Publ., 2007. 184 p. (In Russ.).

22. García R., Pizarro C., Álvarez A., Lavín A.G., Bueno J.L. Study of Biomass Combustion Wastes. *Fuel*, 2015, vol. 148, pp. 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.079>

23. Moura P., Henriques J., Alexandre J., Oliveira A.C., Abreu M., Gírio F., Catarino J. Sustainable Value Methodology to Compare the Performance of Conversion Technologies for the Production of Electricity and Heat, Energy Vectors and Biofuels from Waste Biomass. *Cleaner Waste Systems*, 2022, vol. 3, art. no. 100029.

<https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100029>

24. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on Renewable Sources: Prospects for the World and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, pp. 433–440.

<https://doi.org/10.1134/S101933161606006X>

25. Priya, Deora P.S., Verma Y., Muhal R.A., Goswami C., Singh T. Biofuels: An Alternative to Conventional Fuel and Energy Source. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 48, part 5, pp. 1178–1184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.227>

26. Wang L., Weller C.L., Jones D.D., Hanna M.A. Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and its Application to Electricity and Fuel Production. *Biomass Bioenergy*, vol. 32, iss. 7, pp. 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.007>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.16.022.6.034

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-169-183

Характеристика полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги

М.М. Лысаченкова, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1155-0032>

Я.В. Казаков[✉], д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Д.Г. Чухчин, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

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; m.lisachenkova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru[✉], d.chuhchin@narfu.ru

Поступила в редакцию 16.09.24 / Одобрена после рецензирования 26.12.24 / Принята к печати 27.12.24

Аннотация. Представлены результаты сравнительной оценки физико-механических характеристик упаковочной влагопрочной бумаги из хвойной и лиственной белой целлюлозы. Неразрушающими и разрушающими методами выполнены измерения образцов бумаги 60 г/м², размерами 120×120 мм, размеченных на квадраты 15×15 мм. Получены поля характеристик на локальных участках. Кроме толщины и неоднородности просвета с применением ИК-спектроскопии неразрушающего полного внутреннего отражения определены параметры локальной степени анизотропии и угла ориентации волокон. Установлены физико-механические показатели при испытании на растяжение образцов малой длины. Выявлено, что флокулы и промоины в листе бумаги, визуально выражающиеся в неоднородности просвета, вносят решающий вклад в наличие локальной неоднородности анизотропии и вариацию деформационных и прочностных характеристик бумаги. Вариация неоднородности просвета, измеренная на отдельных участках, превышает 11 % при вариации толщины не более 3 %. Коэффициент вариации деформационных характеристик в несколько раз больше коэффициента вариации для толщины образца и зависит от области деформирования, в которой измерены показатели. Анализ экспериментальных данных и их статистическая обработка позволили получить визуальное представление о распределении локальных характеристик структуры, а также деформационных и прочностных свойств. По гистограммам распределения и полям локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги установлена очень высокая вариация параметров структуры и преобладание участков с пониженной анизотропией по сравнению с участками с большой анизотропией. Обнаружено соответствие полей локальных прочностных характеристик: максимальное напряжение, удлинение до максимальной нагрузки и работа разрушения. Показано, что вариация механических характеристик увеличивается при переходе от упругой зоны деформирования к зоне разрушения и максимальна для параметров, интегрально описывающих деформационные и прочностные свойства, таких как работа разрушения.

© Лысаченкова М.М., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: бумага, структура, анизотропия, деформационные свойства, ориентация волокна, вариация свойств

Для цитирования: Лысаченкова М.М., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г. Характеристика полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 169–183. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-169-183>

Original article

Characteristics of Local Anisotropy Fields of Paper Structure and Deformation Properties

Mariya M. Lysachenkova, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1155-0032>

Yakov V. Kazakov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

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, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; m.lisachenkova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru[✉], d.chukhchin@narfu.ru

Received on September 16, 2024 / Approved after reviewing on December 26, 2024 / Accepted on December 27, 2024

Abstract. The results of a comparative assessment of the physical and mechanical characteristics of moisture-resistant packaging paper made of bleached softwood and hardwood pulp are presented. Non-destructive and destructive methods have been used to measure 60 g/m² paper samples measuring 120×120 mm, divided into squares of 15×15 mm. The fields of characteristics in local areas have been obtained. In addition to the thickness lookthrough heterogeneity, the parameters of the local degree of anisotropy and the angle of orientation of the fibers have been determined using non-destructive total internal reflection IR-spectroscopy. Physical and mechanical properties have been determined during tensile testing of short-length samples. It has been revealed that floccules and gullies in a sheet of paper, visually expressed in the heterogeneity of the lookthrough, make a decisive contribution to the presence of local heterogeneity of anisotropy and the variation in the deformation and strength characteristics of the paper. The variation in the lookthrough heterogeneity measured in individual sections exceeds 11 % with a thickness variation of no more than 3 %. The coefficient of variation of deformation characteristics is several times greater than the coefficient of variation for the sample thickness and depends on the deformation area in which the parameters are measured. Analysis of experimental data and their statistical processing has made it possible to obtain a visual representation of the distribution of local characteristics of the structure, as well as deformation and strength properties. According to the distribution histograms and fields of local anisotropy of the structure and deformation properties of the paper, a very high variation in the structure parameters and the predominance of areas with reduced anisotropy compared to areas with high anisotropy have been established. A correspondence has been found between the fields of local strength characteristics: maximum strength, elongation to maximum load, and fracture work. It has been shown that the variation of mechanical characteristics increases with the transition from the elastic deformation zone and is maximum for parameters that integrally describe deformation and strength properties, such as fracture work.

Keywords: paper, structure, anisotropy, deformation properties, fiber orientation, properties variation

For citation: Lysachenkova M.M., Kazakov Ya.V., Chukhchin D.G. Characteristics of Local Anisotropy Fields of Paper Structure and Deformation Properties. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 169–183. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-169-183>

Введение

Бумага как капиллярно-пористый материал обладает анизотропной и неоднородной структурой, которую образуют стохастически распределенные в плоскости листа обработанные растительные волокна, связанные между собой силами межволоконных связей [19].

Неоднородность макроструктуры бумаги, вызванная процессами флокуляции при отливе, приводит к неоднородности ряда характеристик материала, таких как масса 1 м², толщина, плотность, и, как следствие, вариации прочностных и деформационных свойств на соседних участках.

Волокна в структуре бумаги различны по размерам, форме и неоднородно ориентированы. Неоднородность структуры обеспечивают флокулы и промоины. Анизотропию структуры определяет преимущественная ориентация волокон в машинном направлении. При этом в локальных флокулах и промоинах направленность волокон может отличаться. Наличие вспомогательных веществ (наполнителей, гидрофобизирующих и упрочняющих веществ, флокулянтов и пр.) вносит вклад в неоднородность структуры полотна [12].

Для интегральной оценки неоднородности макроструктуры бумаги наибольшее распространение получили измерения неоднородности полотна на просвет с применением оптических методов для анализа равномерности светового потока, проходящего сквозь лист бумаги [4].

Физико-механические свойства целлюлозных волокнистых листовых материалов в основном зависят от прочности химических внутримолекулярных и водородных связей разных типов: внутри и межмолекулярных в целлюлозных кристаллитах, межфибриллярных в структуре стенки волокна и межволоконных в бумажном листе.

Отмеченные особенности строения структуры обуславливают анизотропию и неоднородность физико-механических свойств бумаги. При приложении к образцу бумаги внешней нагрузки в структуре материала инициируется возникновение концентраций напряжений в меж- и внутриволоконных связях, величина которых зависит от количества контактов, их площади и ориентации волокон на локальном участке [15].

Растительные волокна являются основными элементами макроструктуры бумаги и состоят из природных полимеров – целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Поэтому логичным представляется рассматривать структуру и свойства целлюлозных материалов с позиций физикохимии растительных полимеров и применять соответствующие методы анализа [2, 10].

Для исследования химического состава, свойств и строения полимеров целлюлозно-бумажных материалов в мировой научной практике широко используется ИК-спектроскопия [8, 21, 22, 27, 29]. Применение классических

методов ИК-спектроскопии позволяет установить, например, различия компонентного состава травяных целлюлоз с одной стороны и хлопковой и древесных с другой [6, 20].

ИК-спектроскопия дает возможность оценить количество лигнина, экстрактивных веществ и целлюлозы в древесном сырье [26, 28], а также выход крафт-целлюлозы, содержание в ней целлюлозы [23]. С помощью Фурье ИК-спектроскопии изучают состав исторических образцов бумаги и степени их деградации в течение времени [7, 9].

Поверхность бумаги является оптически неоднородной системой со специфическим расположением дискретных целлюлозных волокон. Для анализа состава подобных структурно-неоднородных материалов применяют ИК-спектроскопию нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Метод основан на физических явлениях, которые возникают при отражении света на границе раздела 2 сред с разной оптической плотностью. Спектр ИК-спектроскопии НПВО имеет характеристики и форму, аналогичные спектру поглощения пропускания, что позволяет легко сравнивать его с последним. Технология ИК-спектроскопии НПВО обладает преимуществами, обуславливающими эффективность использования способа для исследования свойств бумаги: это неразрушающий метод; отсутствуют требования к размеру и форме образца; возможно получение спектров образцов, содержащих влагу [11].

Авторы работы [14] оценили возможности Фурье ИК-спектроскопии для определения относительного содержания волокон осины и березы в лиственной производственной целлюлозе.

Применение метода ИК-спектроскопии НПВО в целях изучения структуры полимеров в основном связано с определением ориентации макромолекул при анализе материалов с дихроизмом, поскольку метод позволяет выявить интенсивность поглощения для всех 3 пространственных координат и дает информацию о направлении расположения молекул в поверхностном слое [11]. Итогом измерений служит количественная оценка степени кристалличности полимерных материалов с анизотропной структурой.

В литературе описаны примеры использования ИК-спектроскопии НПВО для определения степени кристалличности целлюлозы при различных обработках материала [25].

В результате технологических воздействий на волокна в процессах выделения технической целлюлозы из растительного сырья и изготовления из нее бумаги изменяется химический состав и состояние стенки волокна, это проявляется в том, что интенсивность и ширина полос поглощения ИК-спектра, а также их положение становятся отличными от исходных. Анализ ИК-спектров позволяет дать количественную оценку происходящих сдвигов.

Ранее было установлено, что анализ ИК-спектров делает возможным установление степени анизотропии образца и среднего угла ориентации волокон в целлюлозосодержащем образце [24]. Причем для проведения измерений достаточно образца малых размеров, что открывает перспективы для построения карты распределения параметров структуры в материале.

Сопоставление данных спектроскопии с результатами традиционных неразрушающих (оптических, ультразвуковых) методов и определение взаимосвязей между различными параметрами структуры обеспечивает переход к тех-

нологии экспресс-анализа структуры и позволяет найти пути прогнозирования физико-механических свойств целлюлозно-бумажных материалов без проведения разрушающих испытаний.

Целью данной работы является сравнительная статистическая оценка локальной вариации параметров структуры и прочности образцов промышленной бумаги с анизотропией и неоднородностью структуры.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стала упаковочная влагопрочная бумага массой 60 г/м². Композиция по волокну включает хвойную и лиственную товарную сульфатную беленую целлюлозы в соотношении 1:1. В композицию бумаги введены наполнитель и химикаты для обеспечения влагопрочности и гидрофобности.

Сначала были определены неразрушающие характеристики на целом образце бумаги [13]: жесткость при растяжении ультразвуковым методом и анизотропия структуры на приборе L&W TSO Tester [3]; толщина бумаги на приборе L&W Micrometer по ГОСТ 27015–86; неоднородность формования на анализаторе формования РТА-Line Formation Tester [1]; неоднородность структуры по ОСТ 13-299–87. Номенклатура показателей и применяемые алгоритмы описаны в работах [5, 12], использовано программное обеспечение [17].

Для характеристики полей локальной неоднородности структуры и свойств образец бумаги 120×120 мм был размечен на 64 квадрата 15×15 мм (рис. 1).

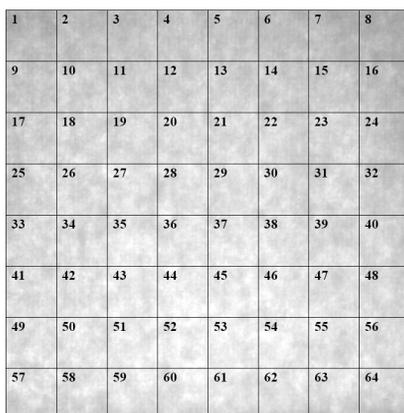


Рис. 1. Исследованный образец бумаги, размеченный на квадраты

Fig. 1. The examined paper sample, marked up into squares

На каждом квадрате выполнены измерения:

а) неоднородности структуры – среднеквадратическое отклонение яркости пикселей проходящего света от среднего значения; толщины (мкм); локальной анизотропии методом ИК-спектроскопии НПВО – степень анизотропии и средний угол ориентации волокон на участке [24].

б) деформативности и прочности при растяжении, измеренных при помощи разрывной машины ИТС-105, для полосок шириной 15 мм, вырезанных в машинном направлении, с расположением зажимов в пределах размеченных квадратов, при расстоянии между зажимами 10 мм, скорость – 10 мм/мин.

Для регистрации диаграмм «нагрузка–удлинение» и расчета деформативности и прочности использовано программное обеспечение [16]. В харак-

терных точках кривой деформирования определены предел упругости, максимальные жесткость (максимальный угол наклона касательной) и нагрузка (N), напряжение (МПа), удлинение (мм), деформация (%), модуль упругости (МПа), работа нагружения (мДж).

Параметры локальной анизотропии установлены методом ИК-спектроскопии НПВО. ИК-спектры образцов снимали на Фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker, Германия), приставка НПВО GladiATR (Pike Tech., США), материал кристалла НПВО – искусственный алмаз. Условия анализа: строгая поляризация ИК-излучения, диапазон записи спектров – $4000 \dots 400 \text{ см}^{-1}$, разрешение – 4 см^{-1} , количество параллельных сканирований образца – 128. Для обработки спектров использовали собственное программное обеспечение [18], позволяющее анализировать разницу в спектрах и строить зависимости отношения интенсивности поглощения полос различных функциональных групп от условий проведения анализа.

Использован ранее установленный факт [15], что при последовательном повороте образца относительно оптической оси спектрометра на угол до 360° в спектрах наблюдаются изменения, имеющие периодический характер. Наибольшая чувствительность к углу поворота образца свойственна полосе при волновом числе 933 см^{-1} – деформационные колебания C–O связи пиранозного кольца, а наименьшая – 489 см^{-1} , это внеплоскостные деформационные колебания гидроксильных групп [2]. Отношение данных оптических плотностей D_{933}/D_{489} принято для количественной характеристики наблюдаемых изменений.

Изменения отношения D_{933}/D_{489} описываются гармониками вида

$$Y = A \sin(Bx + \varphi) + C,$$

где A – амплитуда; B – частота, $B = 2$; C – смещение по Y ; φ – фаза.

Аппроксимация полученных зависимостей гармониками была проведена в MS Excel с использованием пакета оптимизации «Поиск решения». Определение коэффициентов A , C , φ осуществлялось по критерию минимума квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений. Параметр A использован для количественной оценки степени анизотропии образца, а параметр φ – угла преимущественной ориентации волокон в образце [15, 24].

Результаты исследования и их обсуждение

Предварительно по стандартным и общепринятым методикам неразрушающими методами были выявлены интегральные физико-механические свойства исследованного образца бумаги:

Плотность	0,983 г/см ³
Толщина листа	60 мкм
Влагопрочность	10,5 %
Индекс формования	77,3
Вклад в индекс формования флокул, размером	
1 мм	23,1
2 мм	12,1
3 мм	21,6
6 мм	9,2
10 мм	5,7
16 мм	5,6

Средний размер флокул.....	5,1 мм
Неоднородность структуры по ГОСТ 13-299–87	
Неоднородность	19,3
Индекс просвета.....	1,8
Средний размер флокул.....	6,5 мм
Жесткость при растяжении (ультразвуковой метод L&W TSO Tester)	
TSI_{MD}/TSI_{CD}	12,9/5,3 кН·м/г
TSO_{angle}	0,04°
$TSI_{MD/CD}$	2,43 кН·м/г

Из приведенных числовых значений видно, что бумага достаточно тонкая, с относительно высокой плотностью, обусловленной интенсивным размолом полуфабрикатов и введением в композицию наполнителей. Степень анизотропии образца по жесткости при растяжении составила 2,43, что является типичным для бумаги промышленного производства, а угол TSO оказался близок к нулю.

Данная бумага имеет неоднородную структуру, визуально определяемую на просвет, видны крупные и мелкие флокулы и промоины. Количественная оценка качества формования показала, что индекс формования по методике PTA-Line Formation Tester примерно соответствует значениям для офисной бумаги, которое может составлять от 65 до 120 [1]. В структуре выявлены неоднородности разных размеров, от 1 до 16 мм. Эти неоднородности представляют собой микрофлокулы, геометрическая форма которых достаточно разнообразна и часто несимметрична, а средний размер определен как 5,1 мм и различается в направлении MD/CD 4,6/5,5 мм. Неоднородность просвета по ГОСТ 13-299–87 была больше, чем для офисных видов бумаги – 16,5...19,6, а индекс просвета, вычисляемый как отношение высоты гистограммы распределения яркости пикселей к ее ширине, совпал с диапазоном для офисных и типографских видов бумаги – 1,6...2,3 [1].

Соответственно, неравномерность и анизотропия структуры данного образца бумаги должны вызывать вариацию структурных, деформационных и прочностных свойств на локальных участках.

Для получения количественной характеристики полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги, проведены измерения на каждом локальном участке образца. Они выполнены в одних и тех же точках, сначала – неразрушающими методами (толщина, неоднородность просвета, параметры локальной анизотропии методом ИК-спектроскопии), а затем образец по линиям разметки был разрезан на полоски и проведены испытания на растяжение.

Примеры получаемых диаграмм «напряжение–деформация» представлены на рис. 2. Из данных следует, что механическое поведение при растяжении у структуры бумаги различается в соседних областях, наблюдаются отличия в ходе кривых на начальном участке, характеризующем жесткость, и в зоне предразрушения, а также в максимальных прочности и растяжимости. Следовательно, для образцов свойственны разные прочность и жесткость на локальных участках, что связано с неоднородностью структуры и различиями в локальной анизотропии бумаги.

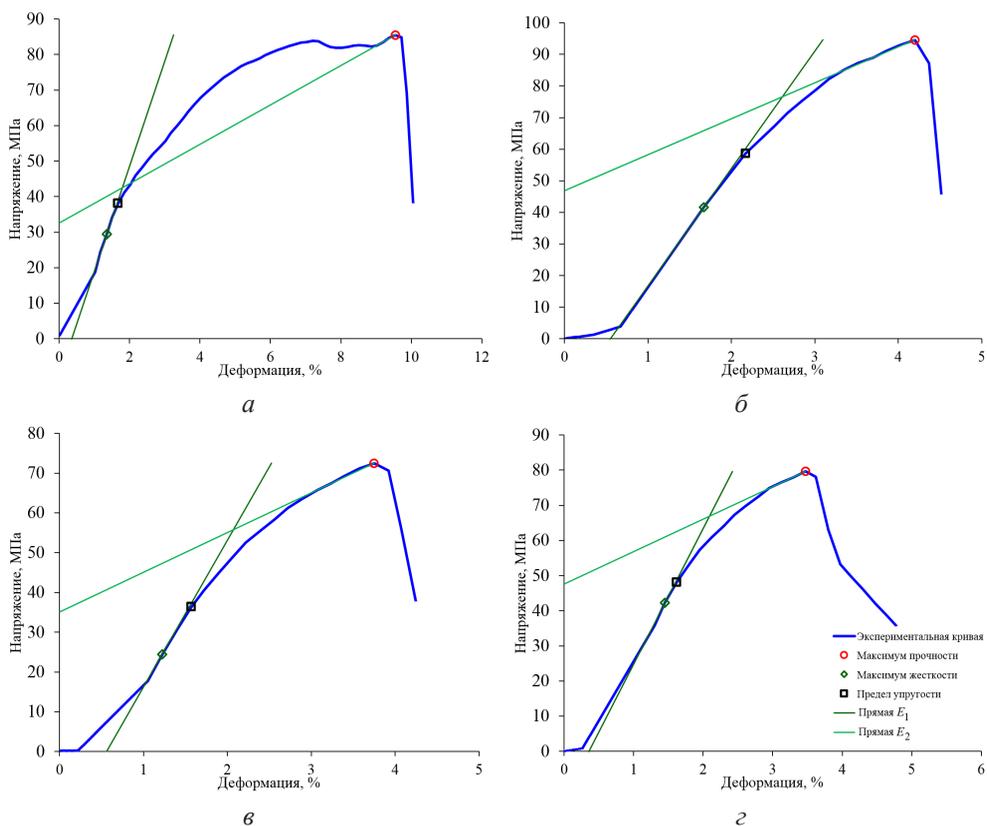


Рис. 2. Диаграммы «напряжение–деформация», полученные при испытании фрагментов образца на растяжение: а – квадрат 4 (см. рис. 1); б – 14; в – 27; г – 39 (E_1 – модуль упругости; E_2 – модуль упругости в области предразрушения)

Fig. 2. The stress-strain diagrams obtained during tensile testing of sample fragments: а – square 4 (see fig. 1); б – 14; в – 27; г – 39 (E_1 – modulus of elasticity; E_2 – modulus of elasticity in the pre-fracture area)

Для оценки вариации всех измеренных параметров проведена статистическая обработка этих данных. Определены характеристики описательной статистики: среднее значение \bar{X} , минимальное X_{\min} и максимальное X_{\max} , среднеквадратическое отклонение σ_x , коэффициент вариации v , %, размах варьирования R (см. таблицу).

Статистическая характеристика результатов измерений свойств бумаги на локальных участках

The statistical characteristics of the results of measurements of paper properties in local areas

Характеристика	\bar{X}	X_{\min}	X_{\max}	σ_x	R	v , %
Толщина образца, мкм	61	55	66	1,9	11,0	3,1
Неоднородность просвета	8,62	6,80	11,70	1,03	4,9	11,9
Параметр A	0,034	0,016	0,060	0,013	0,044	37,8
Параметр ϕ	0,26	-28,1	41,4	19,0	69,6	–
Максимальная нагрузка, Н	78,4	50,7	119,2	10,46	68,5	13,1
Удлинение до максимальной нагрузки, мм	0,48	0,34	0,96	0,08	0,62	16,0

Окончание таблицы

Характеристика	\bar{X}	X_{\min}	X_{\max}	σ_x	R	$v, \%$
Максимальное напряжение, МПа	85,6	53,7	124,2	11,62	70,5	13,6
Работа разрушения, мДж	22,7	7,7	55,9	6,6	48,2	29,0
Модуль упругости, МПа	3560	2560	4320	334	1760	9,4
Жесткость при растяжении, кН/м	217	153	268	19,0	115	8,8
Нагрузка в точке предела упругости, Н	37,9	25,14	54,2	5,19	29,1	13,7
Предел упругости, МПа	41,5	26,6	61,3	5,97	34,7	14,4
Предел упругой деформации, %	1,64	0,50	2,55	0,23	2,05	13,8
Работа упругости, мДж	2,50	0,70	4,94	0,61	4,24	24,5
Модуль упругости в области предразрушения, МПа	750	170	1730	308	1550	41,3

Данные показывают вариацию измеренных характеристик, обусловленных неоднородностью структуры образца на локальных участках. Максимальные и минимальные значения параметров существенно отклоняются от среднего и обеспечивают большой размах варьирования. Поскольку абсолютные численные показатели параметров резко отличаются друг от друга, сравнение степени их колебаний возможно выполнить с использованием коэффициента вариации. Наименьший коэффициент вариации имеет толщина – 3,1 %. Но при этом надо учитывать, что при ее определении на локальном участке площадь измерительной головки толщиномера соответствует размерам промоин в структуре бумаги или превышает их и измерения происходят по зонам изучаемого пространства, толщина которых максимальна.

Вариация неоднородности просвета на отдельных участках бумаги больше 11 %. При этом вариация для всего образца почти в 2 раза превышает показатель для локальных участков. Это свидетельствует о неоднородности отдельных участков бумаги.

Коэффициент вариации остальных характеристик в несколько раз превосходит коэффициент вариации толщины образца и для механических свойств зависит от области деформирования, в которой они измерены. В упругой области модуль упругости и жесткость при растяжении имеют коэффициент вариации менее 10 %. Нагрузка и напряжение характеризуются показателем 13,1...14,4 %. Удлинение до разрыва, предел упругой деформации – 13,8...16,0 %. В 2 раза бóльшая вариация отмечена для работы разрушения, оценивающей одновременно и прочность, и растяжимость материала. Для модуля упругости в области предразрушения коэффициент вариации составил более 41 %.

Обнаружена очень высокая вариация у параметров структуры, измеренных с применением ИК-спектроскопии НПВО. У параметра A коэффициент вариации равен 37,8 %, а размах варьирования параметра φ составляет почти 70°, что свидетельствует о различных степени упорядоченности и ориентации волокон в флокулах.

Гистограммы распределения и соответствующие им кривые нормального распределения исследованных параметров представлены на рис. 3. Гистограммы позволяют визуально оценить распределение данных и выявить соотношение больших и малых результатов измерений. Для основной части характеристик распределение близко к нормальному, что подтверждается самой частой

встречаемостью результатов, близких к средним. Однако для ряда параметров наблюдается отклонение гистограмм от симметричности. Например, для неоднородности просвета (рис. 3, *a*) гистограмма явно несимметрична и смещена в область малых значений. То есть участков с более сильно выраженной неоднородностью просвета меньше, чем однородных.

Гистограмма распределения толщины (рис. 3, *б*) близка к симметричной, но крайних минимальных значений меньше, чем максимальных, что связано с особенностями проведения измерений.

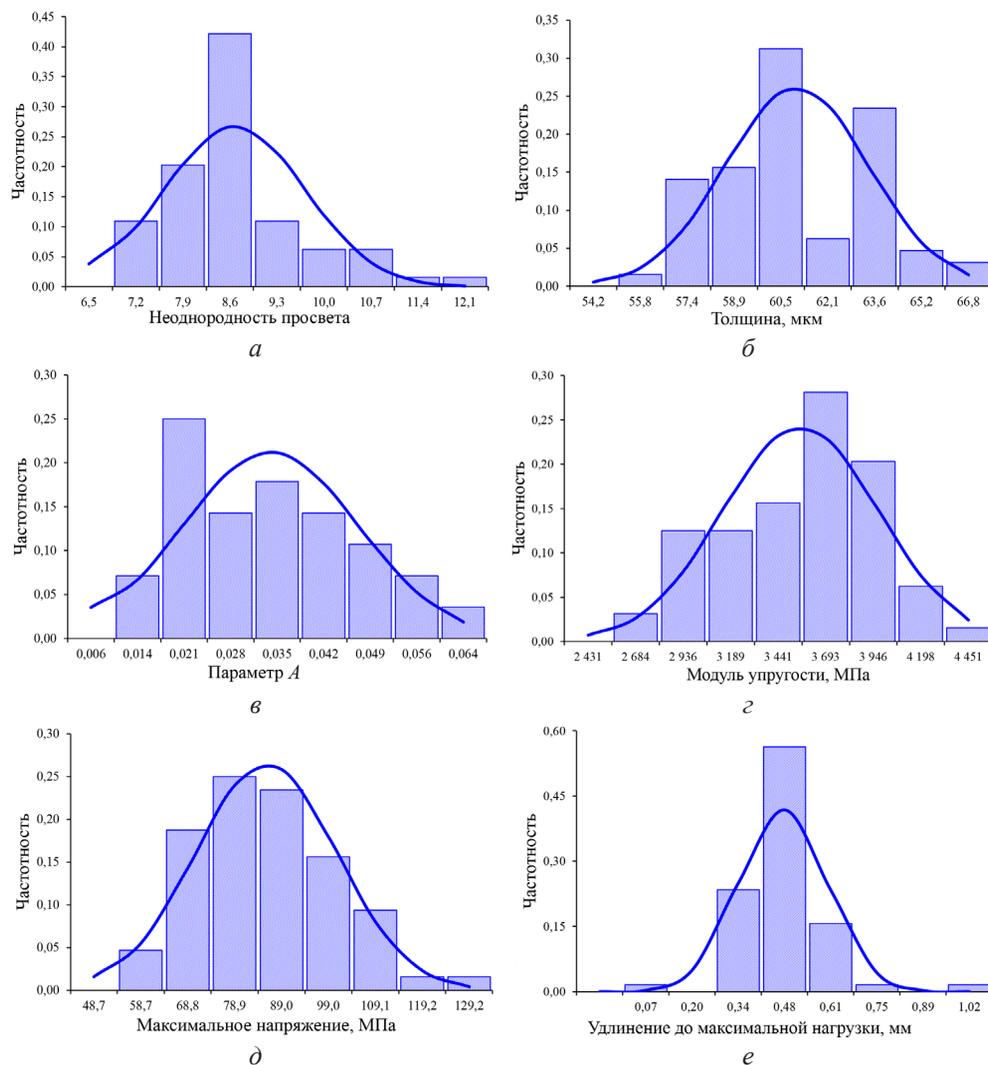


Рис. 3. Гистограммы распределения локально измеренных характеристик бумаги: *a* – неоднородность просвета; *б* – толщина; *в* – параметр *A*; *г* – модуль упругости; *д* – максимальное напряжение; *е* – удлинение до максимальной нагрузки

Fig. 3. The histograms of the distribution of locally measured paper characteristics: *a* – lookthrough heterogeneity; *б* – thickness; *в* – parameter *A*; *г* – modulus of elasticity; *д* – maximum stress; *е* – extension to maximum load

Спектроскопически измеренный параметр *A* имеет на гистограмме максимум в области малых значений (рис. 3, *в*), т. е. участков с пониженной

анизотропией больше, чем с высокой, а поскольку средние размеры флокул превышают площадь измерения методом ИК-спектроскопии НПВО, то можно отметить разницу в степени ориентации волокон в центре флокул и на их границах – выше и ниже соответственно. Из этого следует, что средняя анизотропия, которая измерена ультразвуковым методом на большой площади [3], будет в превосходящей степени определяться локальными участками с малой анизотропией, а фрагменты с высокой анизотропией встречаются реже, и они обусловлены структурой отдельных флокул.

Максимум гистограммы распределения модуля упругости (рис. 3, *з*) смещен в область более высоких значений. На этот показатель сильно влияют силы межволоконных связей, и на начальном участке кривой деформирования прочные связи преобладают.

Прочностные свойства, измеренные в точке разрушения образца – максимальное напряжение (рис. 3, *д*) и удлинение до максимальной нагрузки (рис. 3, *е*), – демонстрируют практически симметричные гистограммы при достаточно широком диапазоне варьирования свойств.

Для визуального представления полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги были построены поверхности (рис. 4).

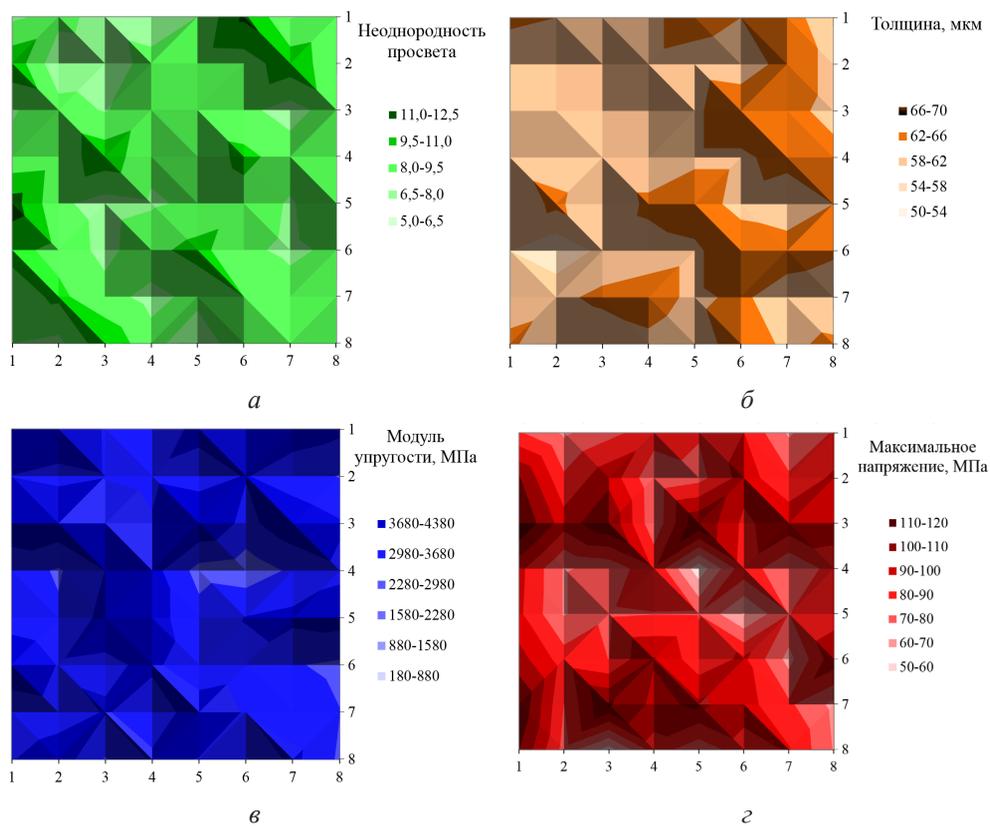


Рис. 4. Поверхности изменения локально учтенных характеристик бумаги:

a – неоднородность просвета; *б* – толщина; *в* – модуль упругости;
з – максимальное напряжение

Fig. 4. The surfaces of change of locally recorded characteristics:

a – lookthrough heterogeneity; *б* – thickness; *в* – modulus of elasticity; *з* – maximum stress

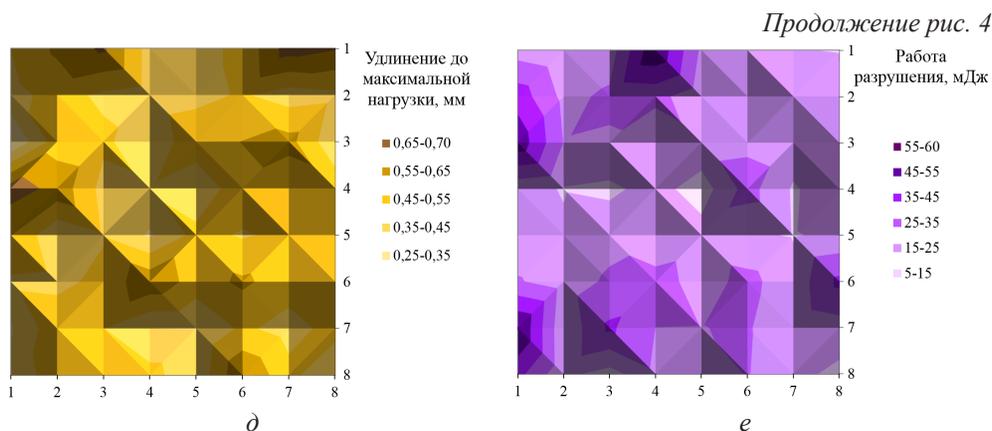


Рис. 4. Поверхности изменения локально учтенных характеристик бумаги:
 δ – удлинение до максимальной нагрузки; e – работа разрушения

Fig.4. The surfaces of change of locally recorded characteristics:
 δ – extension to maximum load; e – fracture work

Более темный цвет соответствует превосходящим значениям. У разных свойств места расположения максимумов и минимумов отличаются, и сложно выделить участок бумаги с наилучшим или наихудшим качеством. Однако наблюдается некоторое соответствие полей для максимального напряжения (рис. 4, e), удлинения до максимальной нагрузки (рис. 4, δ) и работы разрушения (рис. 4, e). Это связано с тем, что интегральный показатель работы разрушения зависит одновременно и от прочности, и от растяжимости материала.

Заключение

Установлено, что наличие флокул и промоин в образце упаковочной влаготрочной бумаги, визуально выражающееся в неоднородности просвета, вносит решающий вклад в наличие локальной неоднородности анизотропии и вариацию деформационных и прочностных характеристик бумаги.

Анализ экспериментальных данных позволил получить наглядное представление о распределении локальных показателей структуры, а также деформационных и прочностных свойств.

Обнаружена высокая вариация у параметров структуры, измеренных с применением ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения, и преобладание участков с пониженной анизотропией по сравнению с участками с высокой анизотропией.

Изменчивость механических характеристик увеличивается при переходе от упругой зоны к зоне разрушения и максимальна для параметров, интегрально описывающих деформационные и прочностные свойства, таких как работа разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абрамова В.В., Гурьев А.В. Оценка равномерности формирования макроструктуры офисной бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 172–186.

Abramova V.V., Gur'ev A.V. Evaluation of Macrostructure Forming Uniformity of Copy Paper. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 4, pp. 172–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.172>

2. Базарнова Н.Г., Карпова Е.В., Катраков И.Б., Маркин В.И., Микушина И.В., Ольхов Ю.А., Худенко С.В. Методы исследования древесины и ее производных. Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2002. 160 с.

Bazarnova N.G., Karpova E.V., Katrakov I.B., Markin V.I., Mikushina I.V., Ol'khov Yu.A., Khudenko S.V. *Methods for Studying Wood and its Derivatives*. Barnaul, Altai State University Publ., 2002. 160 p. (In Russ.).

3. Беляев О.С., Казаков Я.В. Использование неразрушающих методов контроля качества крафт-лайнера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 157–170.

Belyayev O.S., Kazakov Ya.V. Using Non-Destructive Methods of Kraft Liner Quality Control. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2016, no. 3, pp. 157–170. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.157>

4. Галактионов Б.В., Иванова Е.И., Сырников Ю.П., Ферсман И.А., Царев Н.Н. Объективная оценка просвета бумаги // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1995. № 3. С. 117–131.

Galaktionov B.V., Ivanova E.I., Syrnikov Yu.P., Fersman I.A., Tsarev N.N. Objective Assessment of Paper Lookthrough. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehneskoj akademii*, 1995, no. 3, pp. 117–131. (In Russ.).

5. Герасюта С.М., Смолин А.С., Иванова Е.И., Каневская В.С. Исследование коэффициента вариации и среднего размера неоднородности для различных типов бумаги на анализаторе просвета АП-2 // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. Вып. 217. С. 238–247.

Gerasuta S.M., Smolin A.S., Ivanova E.I., Kanevskaya V.S. Study of Coefficient of Variation and the Average Size Ingomogeneity for Various Types of Paper with Help of Formation Analyzer the AP-2. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehneskoj akademii*, 2016, iss. 217, pp. 238–247 (in Russ. with Eng. sum.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.217.238-247>

6. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В. Сравнение целлюлоз, выделенных из мискантуса, с хлопковой целлюлозой методом ИК-Фурье спектроскопии // Ползуновский вестн. 2014. № 3. С. 177–181.

Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Comparison of Celluloses Isolated from Miscanthus with Cotton Cellulose by FT-IR Spectroscopy. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 177–181. (In Russ.).

7. Деркачева О.Ю. Анализ ИК-спектров отражения исторических бумаг // Фотография. Изображение. Документ. 2013. № 4(4). С. 23–31.

Derkacheva O.Yu. Analysis of IR Reflection Spectra of Historical Papers. *Fotografiya. Izobrazheniye. Dokument*, 2013, no. 4(4), pp. 23–31. (In Russ.).

8. Деркачева О.Ю. Определение структуры волокон целлюлозы по инфра-красным спектрам отражения бумаги // Жур. прикладной спектроскопии. 2014. Т. 81, № 6. С. 947–953.

Derkacheva O.Yu. Determination of Cellulose Fiber Structure Using IR Reflectance Spectroscopy of Paper. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii = Journal of Applied Spectroscopy*, 2014, vol. 81, pp. 1037–1043. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0047-6>

9. Деркачева О.Ю., Сухов Д.А., Хейфец Д.М. Молекулярная спектроскопия как основа экспертной системы различных типов бумаги // Фотография. Изображение. Документ. 2011. № 2(2). С. 66–71.

Derkacheva O.Yu., Sukhov D.A., Kheyfets D.M. Molecular Spectroscopy as the Basis of an Expert System of Various Types of Paper. *Fotografiya. Izobrazheniye. Dokument*, 2011, no. 2(2), pp. 66–71. (In Russ.).

10. Дулькин Д.А., Блинова Л.А., Блинушова О.Н. Изменение надмолекулярной структуры волокнистых полуфабрикатов из древесины в процессе размола // Химия растит. сырья. 2007. № 1. С. 75–83.

Dul'kin D.A., Blinova L.A., Blinushova O.N. Changes in the Supramolecular Structure of Fibrous Semi-Finished Wood Products during Milling. *Khimiya Rastitel'nogo Syrja*, 2007, no. 1, pp. 75–83. (In Russ.).

11. Инфракрасная спектроскопия полимеров / пер. с нем., под ред. Э.Ф. Олейника. М.: Химия, 1976. 472 с.

Infrared Spectroscopy of Polymers. Trans. from Germ., ed. by E.F. Olejnik. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 472 p. (In Russ.).

12. Казаков Я.В., Зеленова С.В., Комаров В.И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 3. С. 110–121.

Kazakov Ya.V., Zelenova S.V., Komarov V.I. Influence of Structural Nonuniformity on Stiffness Characteristics of Linerboard. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2007, no. 3, pp. 110–121. (In Russ.).

13. Лысаченкова М.М., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г. Неразрушающий контроль локальной неоднородности структуры бумаги // Актуальные проблемы развития лесного комплекса»: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 330–334.

Lysachenkova M.M., Kazakov Ya.V., Chukhchin D.G. Non-Destructive Testing of Local Heterogeneity of Paper Structure. *Actual Problems of Forest Complex Development: Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference*. Vologda, Vologda State University Publ., 2021, pp. 330–334. (In Russ.).

14. Окулова Е.О., Гурьев А.В., Холмова М.А. Оценка соотношения волокон осины и березы в целлюлозных полуфабрикатах методом ИК-Фурье-спектроскопии // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3(51). С. 122–128.

Okulova Ye.O., Guriev A.V., Holmova M.A. Estimation of the Ratio of Aspen and Birch Fibers in Cellulose Semi-Finished Products by FT-IR Spectroscopy. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2021, no. 3(51), pp. 122–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-122-128>

15. Поташева А.Н. Влияние анизотропии структуры на неоднородность деформирования целлюлозно-бумажных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2020. 220 с.

Potashева A.N. *The Influence of Structural Anisotropy on the Heterogeneity of Deformation of Pulp and Paper Materials*: Cand. of Tech. Sci. Diss. Arkhangel'sk, 2020. 220 p. (In Russ.).

16. Св. № 2001610526 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (КОМПЛЕКС): № 2001610250: заявл. 11.03.2001: опубл. 10.05.2001 / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ.

Kazakov Ya.V., Komarov V.I. *Certificate no. 2001610526 RF. Certificate of State Registration of the Computer Program. Software for a Laboratory Testing Complex for Assessing the Deformability and Strength of Pulp and Paper Materials (KOMPLEX)*: no. 2001610250, 2001. (In Russ.).

17. Св. № 2012612685 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для количественной оценки неоднородности структуры бумаги на просвет (Анализатор формования): № 2012610587: заявл. 02.02.2012: опубл. 15.03.2012 / Я.В. Казаков, В.В. Абрамова; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО САФУ.

Kazakov Ya.V., Abramova V.V. *Certificate no. 2012612685 RF. Certificate of State Registration of the Computer Program. Program for Quantitative Evaluation of Paper Structure Heterogeneity in Lookthrough (Formation Analyzer)*: no. 2012610587, 2012. (In Russ.).

18. Св. № 2018661852. РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для корреляционного анализа серий ИК-спектров: № 2018616255: заявл. 19.06.2018: опубл. 20.08.2018 / Д.Г. Чухчин; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ.

Chukhchin D.G. *Certificate no. 2018661852 RF. Certificate of State Registration of the Computer Program. Program for Correlation Analysis of IR Spectra Series*: no. 2018616255, 2018. (In Russ.).

19. Смолин А.С., Аксельрод Г.З. Технология формования бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 120 с.

Smolin A.S., Aksel'rod G.Z. *Paper and Cardboard Forming Technology*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 120 p. (In Russ.).

20. Шипина О.Т., Гараева М.Р., Александров А.А. ИК-спектроскопические исследования целлюлозы из травянистых растений // Вестн. Казанск. Технол. ун-та. 2009. № 6. С. 148–152.

Shipina O.T., Garaeva M.R., Aleksandrov A.A. IR Spectroscopic Studies of Cellulose from Herbaceous Plants. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2009, no. 6, pp. 148–152. (In Russ.).

21. Acquah G.E., Via B.K., Fasina O.O., Eckhardt L.G. Rapid Quantitative Analysis of Forest Biomass Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Partial Least Squares Regression. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2016, vol. 2016, art. no. 1839598. <https://doi.org/10.1155/2016/1839598>

22. Chen H., Ferrari C., Angiuli M., Yao J., Raspi C., Bramanti E. Qualitative and Quantitative Analysis of Wood Samples by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Carbohydrate Polymers*, 2010, vol. 82, iss. 3, pp. 772–778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.052>

23. Downes G.M., Meder R., Bond H., Ebdon N., Hicks C., Harwood C. Measurement of Cellulose Content, Kraft Pulp Yield and Basic Density in Eucalypt Woodmeal Using Multisite and Multispecies near Infra-Red Spectroscopic Calibrations. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 2011, vol. 73, iss. 3–4, pp.181–186. <https://doi.org/10.2989/20702620.2011.639489>

24. Kazakov Ya., Romanova A., Chukhchin D. The Use of ATR-IR Spectroscopy to Determine the Anisotropy Parameters of the Structure of Materials Based on Plant Fibers. *Progress in Paper Physics Seminar PPS 2020*. Finland, Jyväskylä, VTT Technology 378, 2020, pp. 61–66. <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2020.T378>

25. Le Moigne N., Jardeby K., Navard P. Structural Changes and Alkaline Solubility of Wood Cellulose Fibers after Enzymatic Peeling Treatment. *Carbohydrate Polymers*, 2010, vol. 79, iss. 2, pp. 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.08.009>

26. Poke F.S., Raymond C.A. Predicting Extractives, Lignin, and Cellulose Contents Using Near Infrared Spectroscopy on Solid Wood in *Eucalyptus globulus*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2006, vol. 26, iss. 2, pp. 187–199. <https://doi.org/10.1080/02773810600732708>

27. Sandak A., Sandak J., Prądyński W., Zborowska M., Negri M. Near Infrared Spectroscopy as a Tool for Characterization of Wood Surface. *Folia Forestalia Polonica*, 2009, series B, iss. 40, pp. 31–40.

28. Skoglund A., Kessler W., Kessler R.W., Brundin A., Mandenius C.-F. On-line Spectroscopic Measurements of Wood Chips before a Continuous Digester. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2004, vol. 70, iss. 2, pp. 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2003.11.007>

29. Tsuchikawa S., Kobori H. A Review of Recent Application of Near Infrared Spectroscopy to Wood Science and Technology. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, pp. 213–220. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article

УДК 544.723.21

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-184-194

Purification of Liquid Radioactive Waste with Activated Carbon from Sludge-Lignin

Ekaterina S. Loginova (Kokina)^{1✉}, *Senior Lecturer*; ResearcherID: [HMP-6017-2023](https://orcid.org/0000-0001-8576-3338), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8576-3338>

Tatyana E. Boykova¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*;

ResearcherID: [AAK-1789-2020](https://orcid.org/0000-0002-4589-4015), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4589-4015>

Nikolay I. Bogdanovich², *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

Konstantin B. Vorontsov², *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*;

ResearcherID: [P-2313-2019](https://orcid.org/0000-0001-6369-7245), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-7245>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ul. K. Voronina, 6, Severodvinsk, 164500, Russian Federation; e.kokina@narfu.ru✉, t.boykova@narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; k.vorontsov@narfu.ru

Received on January 22, 2025 / Approved after reviewing on March 16, 2025 / Accepted on March 18, 2025

Abstract. In this article, the authors have carried out a study of the synthesis of carbon sorbents from sludge-lignin by thermochemical activation and determination of their adsorption properties. Sludge-lignin is a large-tonnage waste generated during coagulation treatment of wastewater from pulp and paper mills. The promising development of technological solutions for waste disposal is complicated by the complex chemical composition of the sludge and the lack of practical demand for potential products that can be obtained as a result of its processing. One of the possible areas of use of by-products of processing is the synthesis of activated sorbents for wastewater treatment from heavy metals and radionuclides. To study the effect of independent parameters on the adsorption properties of activated carbons, an experiment has been conducted using a second-order rotatable central composite design. Based on experimental data, regression equations for the adsorption activity of iodine and methylene blue have been derived. The porous structure of the coal surface has been analysed using the ASAP 2020 MR automated system. The pore volumes of the activated sorbents from sludge-lignin have been determined using the Brunauer-Emmett-Teller and Barrett-Joyner-Halenda methods. During the experiment, optimal pyrolysis conditions have been identified: pyrolysis temperature 700 °C, pyrolysis duration 60 min and the activating agent dosage 180 %. This mode is economically advantageous for the formation of high-performance carbon sorbents due to the low consumption of alkali compared to other types of lignin. The authors have studied sorbents obtained under optimal conditions. The sorption properties have been analyzed by the spectrometric method with respect to various radionuclides (cesium, cobalt, strontium, etc.). Energy spectra have been constructed using the SpectraLine GP (Gamma Precision) software package, and the initial and final activity of radionuclides has been calculated. It has been determined that carbon sorbents obtained from sludge-lignin by thermochemical activation can be used for the selective extraction of certain radionuclides with an efficiency of up to 94 %.

Keywords: adsorption properties, activated carbons, synthesis, sludge-lignin, radionuclides

For citation: Loginova (Kokina) E.S., Boykova T.E., Bogdanovich N.I., Vorontsov K.B. Purification of Liquid Radioactive Waste with Activated Carbon from Sludge-Lignin. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 184–194. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-184-194>

Научная статья

Очистка жидких радиоактивных отходов активированным углем, полученным из шлам-лигнина

Е.С. Логинова (Кокина)¹, *ст. преподаватель*; *ResearcherID*: [HMP-6017-2023](https://orcid.org/0000-0001-8576-3338),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8576-3338>

Т.Е. Бойкова¹, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID*: [AAK-1789-2020](https://orcid.org/0000-0002-4589-4015),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4589-4015>

Н.И. Богданович², *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID*: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

К.Б. Воронцов², *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID*: [P-2313-2019](https://orcid.org/0000-0001-6369-7245),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-7245>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, ул. К. Воронина, д. 6, г. Северодвинск, Россия, 164500; e.kokina@narfu.ru[✉], t.boykova@narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; k.vorontsov@narfu.ru

Поступила в редакцию 22.01.25 / Одобрена после рецензирования 16.03.25 / Принята к печати 18.03.25

Аннотация. Исследован синтез углеродных сорбентов из шлам-лигнина методом термохимической активации и определены их адсорбционные свойства. Шлам-лигнин – это крупнотоннажный отход, образующийся при коагуляционной очистке сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов. Проблемой при утилизации отхода является сложный химический состав осадка и отсутствие спроса на потенциальные продукты, которые могут быть получены в результате его переработки. В число возможных направлений использования побочных продуктов переработки входит синтез активированных сорбентов для очистки сточных вод от тяжелых металлов и радионуклидов. Для изучения влияния независимых параметров на адсорбционные свойства активированных углей был проведен эксперимент с применением ротатбельного центрального композиционного плана 2-го порядка. На основании экспериментальных данных выведены уравнения регрессии для адсорбционной активности иода и метиленового синего. Пористая структура поверхности углей анализировалась с помощью автоматизированной системы ASAP 2020 MR. По методикам Брунауэра–Эммета–Теллера и Баррета–Джойнера–Халенды определяли объемы пор активированных сорбентов из шлам-лигнина. В ходе эксперимента выявлены оптимальные условия режима пиролиза: температура – 700 °С, продолжительность – 60 мин и дозировка активирующего агента – 180 %. Данный режим является экономически выгодным для формирования высокоэффективных углеродных сорбентов по причине не очень высокого расхода щелочи по сравнению с другими видами лигнинов. Исследованы сорбенты, полученные при оптимальных условиях. Спектрометрическим методом проведен анализ сорбционных свойств по отношению к различным радионуклидам (цезий, кобальт, стронций и т. д.). С помощью программного комплекса SpectraLine GP (Gamma Precision) построе-

ны энергетические спектры, затем рассчитаны начальная и конечная активности радионуклидов. Определено, что углеродные сорбенты, полученные из шлам-лигнина методом термохимической активации, возможно применять для селективного извлечения некоторых радионуклидов с эффективностью до 94 %.

Ключевые слова: адсорбционные свойства, активированные угли, синтез, шлам-лигнин, радионуклиды

Для цитирования: Loginova (Kokina) E.S., Boykova T.E., Bogdanovich N.I., Vorontsov K.B. Purification of Liquid Radioactive Waste with Activated Carbon from Sludge-Lignin // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 184–194. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-184-194>

Introduction

Sludge-lignin is a large-tonnage waste generated the process of coagulation treatment of wastewater from pulp and paper mills with aluminum sulfate. The waste is a multicomponent colloidal system, mainly consisting of a large amount of aluminum hydroxides (11–13 %) and organic substances such as lignin, resin acids, organosulphur and other hazardous substances [8, 9, 18].

For 40 years of continuous operation, the coagulation treatment method has been used at the Baikalsk Pulp and Paper Mill [14]. By the time the plant was put into operation (1966), there was no technology for processing sludge-lignin. Therefore, it was stored in liquid form in sedimentation tanks. Design solutions for the disposal of sludge-lignin have not yet been developed, therefore, during the period of operation, 7 sludge-lignin storage sites have been created, containing more than 8 mln m³ of waste [9].

The prospects for developing technological solutions for the disposal of sludge-lignin are hampered by its complex chemical composition and the lack of practical demand for possible products obtained after its processing. Theoretically, the use of sludge-lignin is possible as a raw material for obtaining composts and fertilizers [7, 19], and for the preparation of drilling fluids by geological enterprises [12]. The ash from the combustion of sludge-lignin can be used for the production of building materials [10–12]. It is also possible to produce sorbents and coagulants for the physical and chemical treatment of wastewater [6].

Currently, there are many methods for obtaining carbon sorbents from technical lingins, one of which is pyrolysis with thermochemical activation [20]. NaOH is considered to be an effective chemical reagent for activating carbon materials with a disordered structure [17]. In Russia, similar studies were first conducted in the early 2000s [3] and continue to this day at the Northern (Arctic) Federal University.

The aim of this study has been to synthesize carbon adsorbents from sludge-lignin by thermochemical activation and to study their adsorption properties with respect to radioactive isotopes.

Research Objects and Methods

The coagulation process has been carried out in the laboratory of the Department of Pulp and Paper Technology of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov from model solutions with aluminum sulfate, in accordance with the optimal conditions determined during preliminary studies [16]. A model lignin-containing solution has been used with the following parameters:

lignin concentration – 400 mg/l, chromaticity – 1800 PCU according to the method [16]. The resulted sludge-lignin has been subjected to mechanical dehydration on filter presses, dried and pyrolysed with thermochemical activation with NaOH. In order to reduce the number of necessary experiments and study the influence of factors in their possible combinations, the experiment has been carried out using the method of the second-order rotatable central composite design (RCCD) for 3 factors: pyrolysis temperature (T_{pyr} , °C), the activating agent dosage (D_{NaOH} , %) and pyrolysis duration (τ , min) (Table 1).

Table 1

The levels of variation of input parameters

Levels of variation of independent variables	Input parameters		
	Pyrolysis temperature (X_1), °C	Pyrolysis duration (X_2), min	Activating agent dosage (X_3), %
– α	650	30	120
–1	670	42	144
0	700	60	180
+1	730	78	216
+ α	750	90	240

Based on the experimental data obtained, using regression analysis methods, the coefficients of the regression equations have been calculated. In general, the regression equation looks as follows:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3,$$

where x_i is represented in coded variables

The independent variables have varied on 5 levels. The following levels of variation of independent variables have been distinguished: $-\alpha$; -1 ; 0 .

During the laboratory test, the adsorption properties for iodine have been assessed in accordance with GOST 33618–2015 and for methylene blue [4] according to the method described in [16].

The automated system ASAP 2020 MR has been used to determine the porous structure of the coal surface. The experiment has been carried out at a temperature of -196 °C. Using the appropriate software, nitrogen adsorption-desorption isotherms from the gas phase have been obtained as a result.

The determination of the adsorption capacity of the obtained activated carbons in relation to radioactive isotopes has been carried out in the laboratory of the Department of Physics and Environmental Engineering Protection of the Institute of Shipbuilding and Arctic Marine Engineering at a liquid medium temperature of $t = 23 \pm 2$ °C in accordance with GOST 33587–2015. The construction of radionuclide energy spectra, automatic determination of radionuclide composition, calculation of peak parameters, calculation of radionuclide activity and measurement errors have been carried out automatically using the SpectraLineGP software package. Previous studies have confirmed [5] that the pH of the medium affects the recovery ratio of heavy metals and radionuclides from aqueous solutions [2]. Therefore, an alkaline medium (pH = 10) has been chosen as the optimal medium for the extraction of cobalt ions. The required medium has been created by alkalizing the solution with ammonia water. In this case, a complex cobalt compound has been obtained [5].

Results and Discussion

During the experiment, data have been obtained that have been used to develop statistical models describing the relationship between the values of the input parameters and the pyrolysis conditions. The adequacy of the model has been checked using the F-criterion (Fisher's criterion). The calculated criterion has not exceeded the critical one, which confirms the adequacy of the obtained models (at the significance level $\alpha = 0.05$).

When modeling the adsorption properties of iodine with carbon sorbents from sludge-lingin, the regression equation has been obtained:

$$A_{I_2} = 179.61 + 37.37X_3 - 10.63X_1X_2 + 26.88X_1X_3 - 7.13X_1^2 + 23.82X_2^2 - 7.13X_3^2.$$

When analyzing the equation, it can be seen that the negative coefficients at X_1^2 and X_3^2 indicate the extremum of the response surface relative to the pyrolysis temperature and the activating agent dosage. In addition, the positive value of the coefficient indicates the nature of the surface in relation to the duration of the pyrolysis process. The response surfaces have been plotted for the regression equation obtained (Fig. 1).

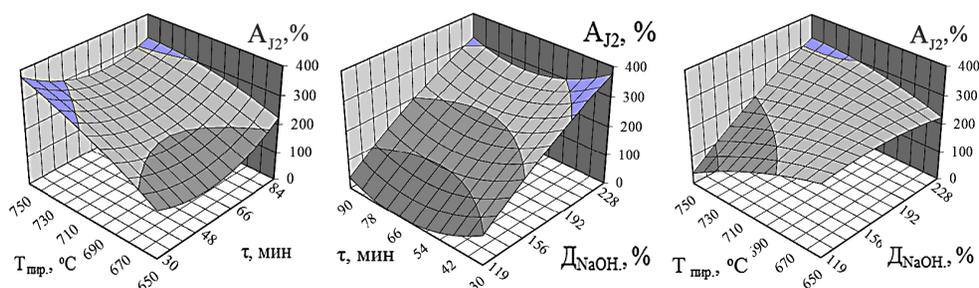


Fig. 1. The influence of regime parameters on iodine sorption capacity

Analysing the surfaces obtained (Fig. 1), it should be noted that a simultaneous increase in the pyrolysis temperature and alkali dosage has a positive effect on the development of iodine sorption capacity. Due to the economic feasibility, the optimal combination is a pyrolysis temperature of 700 °C and the activating agent dosage of 180 %.

When modelling the dependence of the specific adsorption of methylene blue on various parameters, the following regression equation has been obtained:

$$A_{MB} = 680.79 - 40.67X_1 + 130.74X_2 + 60.00X_1X_3 + 57.00X_2X_3 + 53.28X_2^2 - 33.01X_3^2.$$

For clarity, the response surfaces have been, which are presented in Fig. 2.

It is obvious that the specific adsorption is positively influenced by the dosage of NaOH and the combined effect (increase) of 2 factors: pyrolysis temperature and alkali dosage (Fig. 2). It should be noted that increasing only the pyrolysis temperature without changing other factors leads to a significant reduction in the specific adsorption of methylene blue. Thus, the optimal combination is a pyrolysis temperature of 700 °C and the activating agent dosage

of 180 %, which is equally effective for the formation of adsorption properties for iodine and methylene blue.

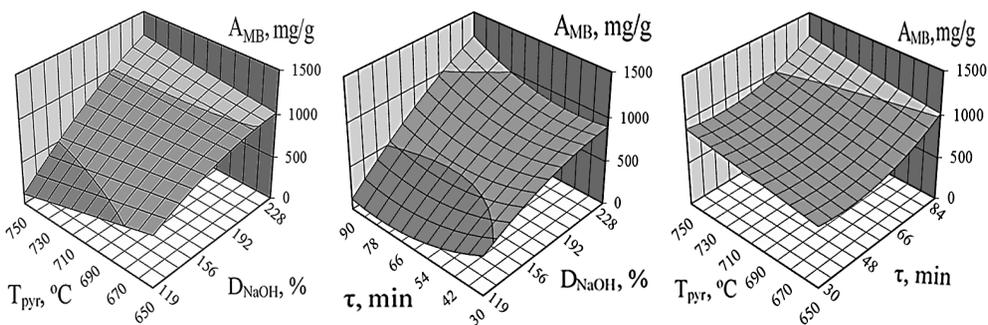


Fig. 2. The influence of independent parameters on the specific adsorption of methylene blue by carbon sorbents from sludge-lignin

The Brunauer–Emmett–Teller (BET) method has been used to describe poly-molecular adsorption and the relationship between the adsorption of a substance and its saturated vapor pressure. The resulting mathematical model illustrating the influence of experimental factors is represented by the following regression equation:

$$V_{\text{BET}} = 0.36 + 0.15X_3 - 0.06X_1X_2 + 0.07X_1X_3.$$

Analyzing the equation, it is clear that the pore volume depends on the activating agent dosage and the combined effect of 2 factors: temperature – dosage and temperature – pyrolysis duration.

Based on this equation, the response surfaces have been plotted (Fig. 3).

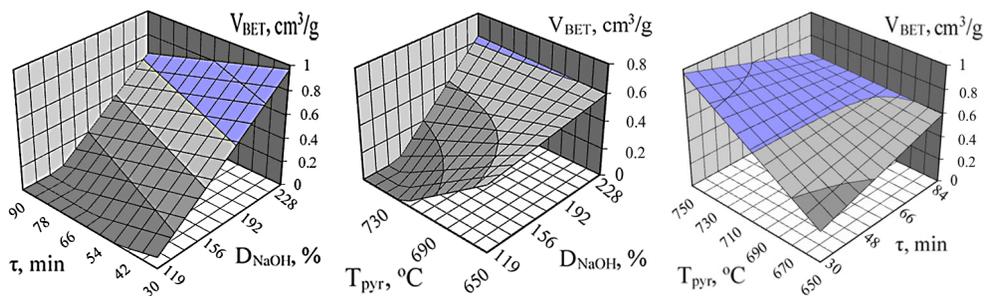


Fig. 3. The influence of experimental factors on the volume of V_{BJH} micropores with carbon sorbents from sludge-lignin

It is obvious that the volume of micropores is positively affected by an independent increase in the activating agent dosage and its increment with temperature growth. The negative influence is imposed by the combined effect of temperature and an increase in the duration of pyrolysis. Thus, the optimal mode for the formation of micropores in synthesised coals is a pyrolysis temperature of 700 °C and the activating agent dosage of 180 %.

To determine the volume of mesopores, calculations have been performed using the Barrett-Joyner-Halenda (BJH) method. As a result, a mathematical model has been obtained:

$$V_{\text{BJH}} = 0.08 + 0.07X_3 + 0.03X_1X_3 + 0.05X_3^2.$$

The response surfaces corresponding to the regression equation are shown in Fig. 4.

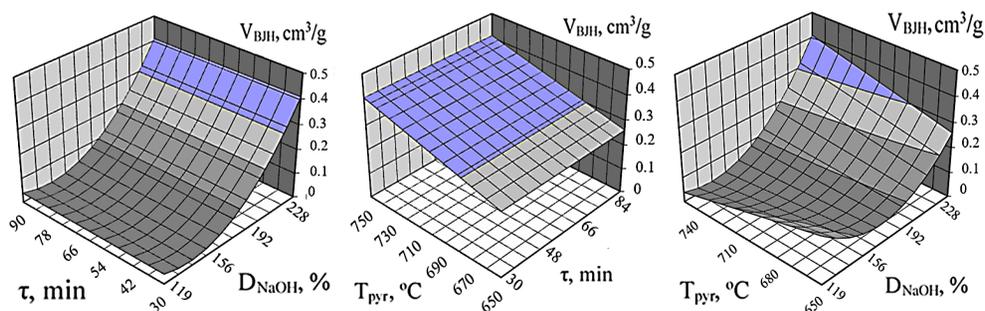


Fig. 4. The influence of experimental factors on the volume of mesopores of carbon sorbents from sludge-lignin

A beneficial effect on the volume of mesopores of carbon sorbents from sludge-lignin is achieved by increasing the dosage of the agent and the combined effect of temperature and dosage.

Thus, the optimal mode for the formation of micro- and mesopores, the adsorption capacity for iodine and methylene blue in synthesised carbons is a pyrolysis temperature of 700 °C and the activating agent dosage of 180 %.

Activated carbons synthesised in accordance with the optimal combination of factors ($T = 700\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 60\text{ min}$ and $D_{\text{NaOH}} = 180\text{ \%}$) have been used to purify liquid radioactive waste from a ship repair plant. 0.01 g of activated carbon has been added to a 200 ml sample under analysis and stirred on a magnetic stirrer at a speed of 1,500 rpm for 15 min. At the end of the experiment, the sample has been filtered and the analysed solution has been taken for further sample preparation. The liquid sample has been subjected to evaporation. As a result, a counting sample has been obtained, which is a stainless steel disc on which elemental isotopes are electrolytically deposited. The prepared disc has been analysed and accompanied by a protocol stating the disc number and the sample name.

In the Methodology for Measuring the Activity of Gamma-Emitting Nuclides in Counting Samples Using a Semiconductor Spectrometer [15], a method and algorithm for measuring the specific or volumetric activity of a gamma-emitting nuclide have been established. The activity has been measured by counting pulses at the peaks of total absorption represented in the hardware spectra. A hardware spectrum is a discrete distribution: along the abscissa axis – the channel numbers (energy E_γ) and along the ordinate axis – the number of pulses accumulated in the channels (imp/s). This histogram is further approximated by a smooth curve using various mathematical models, e.g. the Gaussian function. In order to correlate channel numbers with gamma-quanta energy values, the spectrometer is pre-calibrated using the energy of standard sources.

The smoothed radionuclide spectra obtained in the original sample (Fig. 5) and after sorption (Fig. 6) have been processed using an inbuilt tool for peak detection and calculation of radionuclide activity. One of the crucial aspects when calculating activity is the degree of identification of peaks in the spectrum. It can be unambiguous, i.e. each peak corresponds to no more than 1 library line, and ambiguous, when several library lines may correspond to a peak. For this purpose, a procedure for identifying pre-detected peaks is carried out according to the equation:

$$S = A_1 Y_{1i} + A_2 Y_{2i} + \dots + A_n Y_{ni},$$

where S is the area of the peak; A_n is the n -radionuclide activity; Y_n is the n -radionuclide line intensity.

The spectra processing algorithm is presented in Fig. 5 and 6. The calculation results are presented in Table 2.

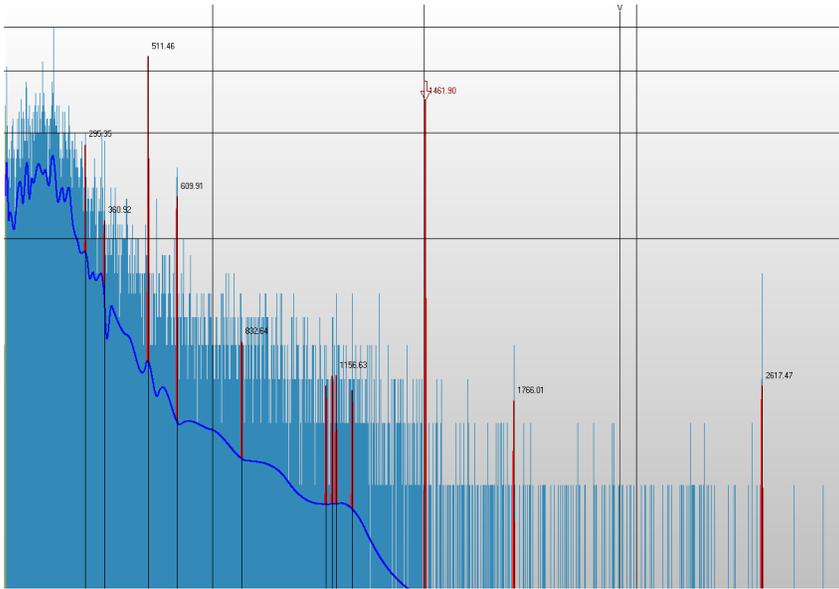


Fig. 5. The energy spectra of the sample before sorption

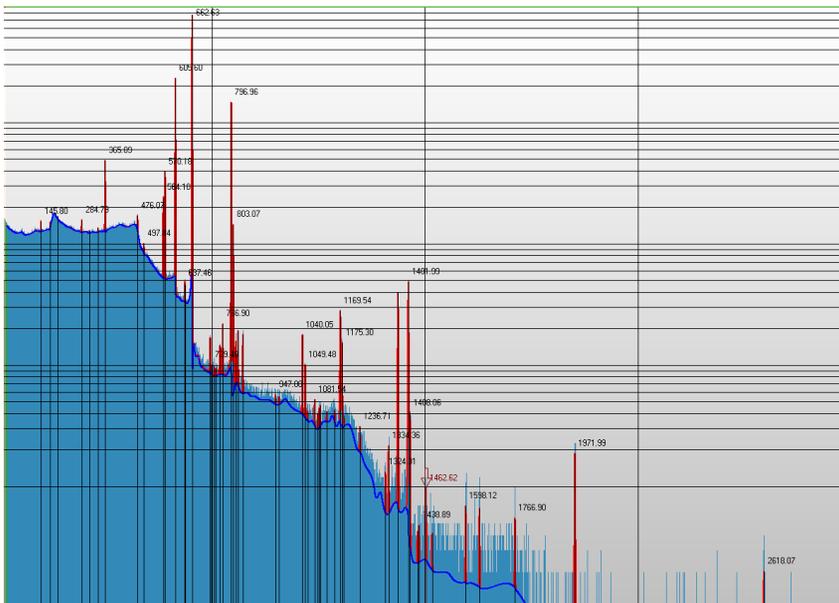


Fig. 6. The energy spectra of the sample after sorption

Based on the results of the calculated initial and final specific activity, the sorption efficiency has been calculated. It has been estimated based on the amount of sorbed radionuclides from liquid radioactive waste per 1 g of coal. The results obtained are presented in Table 2.

Table 2

The isotopic composition of the analyzed solution

Isotopic composition	Initial specific activity, Bq/kg	Final specific activity, Bq/kg	Purification efficiency, %
Nb-95	660	110	83
Mn-54	380	50	86
Cs-137	160,000	134,000	16
Cs-134	41,000	35,000	14
Sr-90	800	47	94

Based on the research results, it can be noted that sorbents are most effective for the selective extraction of strontium, niobium and manganese radionuclides (the atomic radius of radionuclides varies from 140 to 215 pm). The cesium radionuclide has an atomic radius of 267 pm, which prevents the atom from penetrating through the porous structure of activated carbon [7].

Conclusion

The study has revealed that carbon adsorbents obtained from sludge-lignin with thermochemical activation by alkali (NaOH) have high adsorption properties.

1. Regression equations for the adsorption of iodine and methylene blue have been obtained:

$$A_{I_2} = 179.61 + 37.37X_3 - 10.63X_1X_2 + 26.88X_1X_3 - 7.13X_1^2 + 23.82X_2^2 - 7.13X_3^2,$$

$$F_p = 0.39; F_{tab} = 4.82;$$

$$A_{MB} = 680.79 - 40.67X_1 + 130.74X_2 + 60.00X_1X_3 + 57.00X_2X_3 + 53.28X_2^2 - 33.01X_3^2,$$

$$F_p = 1,17; F_{tab} = 4.82.$$

2. Regression equations have been obtained for Brunauer–Emmett–Teller and Barrett-Joyner-Halenda methods:

$$V_{BET} = 0.36 + 0.15X_3 - 0.06X_1X_2 + 0.07X_1X_3,$$

$$F_p = 3.81; F_{tab} = 4.72;$$

$$V_{BJH} = 0.08 + 0.07X_3 + 0.03X_1X_3 + 0.05X_3^2,$$

$$F_p = 4.17; F_{tab} = 4.72.$$

3. It has been established that the formation of the specified properties is influenced jointly by the pyrolysis temperature and the activating agent dosage.

4. According to the results of the experiment, for the synthesis of adsorbents from sludge-lignin, the recommended pyrolysis temperature is 700 °C and the activating agent dosage is 180 %. The advantage of this technology is the low consumption of NaOH for the activation of carbon material compared to sorbents from hydrolysis or sulphate lignin.

5. These sorbents are applicable for the selective extraction of radionuclides from liquid radioactive waste.

6. On this basis, adsorbents obtained during the thermochemical activation of sludge-lignin are effective for the selective extraction of radionuclides with an atomic radius of 140 to 215 pm from an aqueous medium, including strontium, niobium and manganese.

REFERENCES

1. Bedmohata M.A., Chaudhari A.R., Singh S.P., Choudhary M.D. Adsorption Capacity of Activated Carbon Prepared by Chemical Activation of Lignin for the Removal of Methylene Blue Dye. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*, 2015, vol. 2, iss. 8, pp. 1–13.

2. Beletskaya M.G., Bogdanovich N.I., Makarevich N.A. *Carbon Adsorbent Technology: Physico-Chemical Analysis of Activated Carbons*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2015. 96 p. (In Russ.).

3. Bogdanovich N.I. Pyrolysis of Technical Lignins. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1998, no. 2–3, pp. 120–132. (In Russ.).

4. Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Dobelev G.V. New Reagents of Thermochemical Activation of Carbon Materials in the Synthesis of Adsorbents. *Carbon Adsorbents: Proceedings of the 2nd International Seminar*. Kemerovo, Institute of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000, pp. 16–18. (In Russ.).

5. Celik A., Demirbaş A. Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions via Adsorption onto Modified Lignin from Pulping Wastes. *Energy Sources*, 2005, vol. 27, iss. 12, pp. 1167–1177. <https://doi.org/10.1080/00908310490479583>

6. Chernysheva E.A., Nakhanovich V.S., Zajtseva A.A., Russavskaya N.V. Technology and Equipment for Obtaining Sulfur-Containing Sorbents Based on Lignin. *Collection of Scientific Papers of the Angarsk State Technical University*, 2016, no. 1, pp. 76–80. (In Russ.).

7. Chistyakov A.V., Tsodikov M.V. Methods for Preparing Carbon Sorbents from Lignin (Review). *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, vol. 91, pp. 1090–1105. <https://doi.org/10.1134/S1070427218070054>

8. Elnakar H., Buchanan I.D. Pulp and Paper Mill Effluent Management. *Water Environment Research*, 2019, vol. 91, iss. 10, pp. 1069–1071. <https://doi.org/10.1002/wer.1179>

9. Irkutsk National Research Technical University. *INRTU Scientists Will Present Several Waste Disposal Technologies from the Baikal Central Processing Plant at the International Ecological and Water Forum*. Available at: <https://www.istu.edu/novosti/pub/45665> (accessed 5.08.24). (In Russ.).

10. Khorokhordin A.M., Rudakov O.Ya., Perzev V.T., Cherepakhina R.G., Rudakov O.B. Application of Slime-Lignin with Slaked Lime as an Organomineral Additive in Cement. *Khimiya, fizika i mekhanika materialov*, 2021, no. 2(29), pp. 89–96. (In Russ.).

11. Lainer Yu.A., Malkov G.A., Tuzhilin A.S., Perekhoda S.P., Vetchinkina T.N. Prospects of Aluminum-Containing Waste Integrated Treatment with Production of Alumina, Coagulants and Construction Materials. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia, 2013, no. 4, pp. 10–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-4-10-15>

12. Lityaeva Z.A., Gavrillov S.N. *Combined Humate-Containing Reagent for Drilling Fluids*. Patent RF no. 208751, 1997. (In Russ.).

13. Loginova (Kokina) E.S., Boykova T.E., Bogdanovich N.I., Vorontsov K.B., Adsorption of Cobalt Isotope from Liquid Radioactive Waste by Carbon Nanostructured Materials of Thermochemical Activation of Sludge-Lignin. *Bezopasnost' i okhrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvakh* = Occupational Health and Safety in Logging and Woodworking Industries, 2024, no. 3. <https://doi.org/10.33920/pro-5-2403-04>

14. Malnik V.V., Yamamuro M., Tomberg I.V., Molozhnikova E.V., Bukin Yu.S., Timoshkin O.A. Lacustrine, Wastewater, Interstitial and Fluvial Water Quality in the Southern Lake Baikal Region. *Journal of Water & Health*, 2022, vol. 20, iss. 1, pp. 23–40.

<https://doi.org/10.2166/wh.2021.064>

15. *Methodology for Measuring the Activity of Gamma-Emitting Nuclides in Counting Samples Using a Semiconducting Spectrometer*. Certificate no. 582/04 on Certification Issued by D.I. Mendeleev Institute for Metrology, 25.10.2004. (In Russ.).

16. Sedova E.L., Vorontsov K.B., Burkova S.A. Influence of Coagulation Treatment on the Efficiency of Lignin Containing Wastewater Purification. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 4, pp. 159–167. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.159>

17. Suhas, Carrott P.J.M., Ribeiro Carrott M.M.L. Lignin – from Natural Adsorbent to Activated Carbon: A Review. *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, iss. 12, pp. 2301–2312.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.008>

18. Thompson G., Swain J., Kay M., Forster C.F. The Treatment of Pulp and Paper Mill Effluent: A Review. *Bioresource Technology*, 2001, vol. 77, iss. 3, pp. 275–286.

[https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00060-2](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00060-2)

19. Timofeeva S.S. Vermicomposting of Technical Waste and Their Biological Activity. *Environmental Safety of the East Siberian Region: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Irkutsk, 2003, pp. 17–21. (In Russ.).

20. Vorontsov K.B., Bogdanovich N.I., Sedova E.L., Solovyova P.V. Formation of Adsorption Properties of Carbon Nanostructured Materials by Thermochemical Activation of Sludge-Lignin. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 4, pp. 181–188. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-181-189>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 630*591.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-195-203

Температурные характеристики стволов сосны в северной подзоне тайги

П.А. Феклистов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Е.А. Пинаевская¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

Н.А. Неверов¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

И.Н. Болотов¹, д-р биол. наук, чл.-корр. РАН; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

С.Н. Тарханов¹, д-р биол. наук, зав. лабораторией; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

О.Н. Тюкавина², д-р с.-х. наук; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, na-neverov@yandex.ru, dirnauka@fciactic.ru, tarkse@yandex.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru

Поступила в редакцию 30.11.23 / Одобрена после рецензирования 21.02.24 / Принята к печати 22.02.24

Аннотация. Исследование проводилось в северной тайге в сосняках разных типов леса в Новодвинском и Исакогорском лесничествах Архангельского лесничества. Все изученные сосняки характеризуются как средневозрастные, чистые по составу или с небольшой примесью ели и березы. Цель работы – определить температуру внутренних тканей ксилемы, т. к. несмотря на то, что древесные растения являются пойкилотермными организмами, их температура отличается от температуры воздуха. В каждом типе леса подбирались 45–50 учетных деревьев. Для измерения температуры поверхности коры использовали тепловизор Testo 890-2, метеофакторы рядом с деревьями определялись с помощью прибора МЭС-200, температура ксилемы – портативного цифрового мультиметра МУ 64. Показано, что температура поверхности стволов и температура ксилемы заметно отличаются от температуры окружающего воздуха. Температура гладкой коры в теплую погоду оказалась ниже температуры корки (трещиноватой коры) на 2 °С, или на 10 %. Тонкие деревья имеют температуру корки выше, чем толстые на 1,5 °С, или 7 %. В солнечную безоблачную погоду в сосняках черничном и кустарничково-сфагновом температура поверхности коры выше температуры воздуха: в сосняке черничном – на 0,98 °С, в сосняке кустарничково-сфагновом – на 5,43 °С. В пасмурную

погоду, наоборот, температура воздуха превосходит температуру поверхности хвои. Температура ксилемы у шейки корня всегда ниже, чем на высоте 1,3 м. Различия составляют 0,8–1,2 °С. По-видимому, это связано с температурой воды, которая поступает из почвы в ксилему. Температура ксилемы в течение вегетационного сезона возрастает и достигает максимума к концу июля, после чего снижается. Температура ксилемы всегда меньше температуры воздуха и зависит от возраста – у старых деревьев показатель более низкий.

Ключевые слова: температура ствола, температура ксилемы, температура воздуха, соняк, тип леса, северная тайга, Архангельская область

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова УрО РАН (№ 125021902596-8).

Для цитирования: Феклистов П.А., Пинаевская Е.А., Неверов Н.А., Болотов И.Н., Тарханов С.Н., Тюкавина О.Н. Температурные характеристики стволов сосны в северной подзоне тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 195–203.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-195-203>

Original article

Temperature Characteristics of Pine Stems in the Northern Taiga Subzone

Pavel A. Feklistov[✉], Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Ekaterina A. Pinaevskaya¹, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

Nikolay A. Neverov¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

Ivan N. Bolotov¹, Doctor of Biology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

Sergei N. Tarkhanov¹, Doctor of Biology, Head of Laboratory;
ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Olga N. Tyukavina², Doctor of Agriculture; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prosp., 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, na-neverov@yandex.ru, dirnauka@fciarctic.ru, tarkse@yandex.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.tukavina@narfu.ru

Received on November 30, 2023 / Approved after reviewing on February 21, 2024 / Accepted on February 22, 2024

Abstract. The research has been carried out in the northern taiga in pine forests of different types in the Novodvinsk and Isakogorka forestries of the Arkhangelsk forestry district. All the studied pine forests are characterized as middle-aged, pure in composition or with a small admixture of spruce and birch. The aim of the research has been to determine the temperature of the internal tissues of the xylem, since despite the fact that woody plants

are poikilothermic organisms, their temperature differs from that of the air. In each forest type, 45–50 registered trees have been selected for the study. To measure the temperature of the bark surface, a Testo 890-2 thermal imager has been used, meteorological factors near the trees have been determined using a MES-200 device, and the xylem temperature has been determined using a portable digital multimeter MY 64. It has been shown that the surface temperature of the stems and the xylem temperature differ significantly from the ambient air temperature. The temperature of the smooth bark in warm weather has turned out to be lower than the temperature of the crust (fissured bark) by 2 °C, or by 10 %. Thin trees have a crust temperature higher than thick trees by 1.5 °C, or 7 %. In sunny, cloudless weather, the bark surface temperature in blueberry and shrubby-sphagnum pine forests is higher than the air temperature: by 0.98 °C in blueberry pine forests and by 5.43 °C in shrubby-sphagnum pine forests. In cloudy weather, on the contrary, the air temperature exceeds the temperature of the surface of the needles. The xylem temperature at the root collar is always lower than at a height of 1.3 m. The differences are from 0.8 to 1.2 °C. Apparently, this is due to the temperature of the water that flows from the soil into the xylem. The xylem temperature increases during the growing season and reaches a maximum by the end of July, after which it decreases. The xylem temperature is always lower than the air temperature and depends on the age – in older trees the indicator is lower.

Keywords: stem temperature, xylem temperature, air temperature, pine forest, forest type, northern taiga, the Arkhangelsk Region

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (no. 125021902596-8).

For citation: Feklistov P.A., Pinaevskaya E.A., Neverov N.A., Bolotov I.N., Tarkhanov S.N., Tyukavina O.N. Temperature Characteristics of Pine Stems in the Northern Taiga Subzone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 195–203. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-195-203>

Введение

Древесные растения являются пойкилотермными организмами [2, 4, 9]. В общем виде это означает, что температура органов растений соответствует температуре окружающей среды, прежде всего показателям для воздуха, почвы и окружающих предметов и тел. В свою очередь, температура на поверхности земли определяется солнечной радиацией, лучами, которые несут и световую, и тепловую энергию [1]. Тепло передается почве, предметам на поверхности земли, растительности. Затем посредством излучения, теплопроводности и тепловой конвекции нагревается окружающий воздух [13]. Однако, как было показано [2, 3], температура растительных организмов существенно отличается от температуры воздуха, причем речь в работах шла в основном о травянистых растениях и нетипичных для северо-таежного региона Архангельской области видах. Температура деревьев определяется многими факторами: цветом коры, листьев, генеративных органов (темные предметы нагреваются сильнее), структурой поверхности, на которую поступают солнечные лучи, углом падения, шириной местности и др. Имеет значение содержание воды в разных органах растений. Например, в стволах доревев сосны и ели воды может быть около 50 % [14]. А вода, как известно, обладает самой высокой теплоемкостью [6] и, следовательно, вносит свой вклад в тепловой баланс растений. В то же время температура тканей растений играет чрезвычайно важную роль: с уве-

личением температуры скорость химических реакций пропорционально растет [15]. И хотя все биохимические реакции являются ферментативными, активность ферментов также увеличивается с повышением температуры до момента распада белков-ферментов (45–50 °С) [8]. Таким образом, температура органов растений является важной характеристикой для понимания процессов их жизнедеятельности. В то же время для основных лесообразующих пород северной тайги таких сведений нет или они единичны.

Цель – изучить температурные характеристики поверхности коры, температуру ксилемы и сравнить полученные показатели с температурой воздуха. Все это нужно и для понимания механизмов жизнедеятельности деревьев, например, работы камбия, передвижения воды с минеральными элементами, а также с теоретической точки зрения, поскольку считается, что температура деревьев равна температуре окружающей среды.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были черничные и кустарничково-сфагновые сосняки естественного происхождения, расположенные на территориях Исакогорского и Новодвинского лесничеств Архангельской области. Данные сосняки являются средневозрастными, чистыми по составу или с небольшой примесью ели и березы (табл. 1), в основном имеют IV–V класс бонитета.

Для проведения работ в сосняках с учетом общепринятых рекомендаций (ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки») были заложены пробные площади.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоя пробных площадей
The inventory characteristics of the stands of the sample plots

Тип сосняка	Состав	Порода	Средние		Полнота		Возраст, лет	Бонитет	Запас, м ³ /га
			диаметр, см	высота, м	абсолютная, м ² /га	относительная			
<i>Исакогорское участковое лесничество</i>									
Черничный	8С1Б1Ос	С Б Ос	17,0	18,0	С – 22,7 Б – 1,6 Ос – 3,0	0,67	86	IV	190
Кустарничково-сфагновый	10С	С	11,1	10,0	11,73	–	66	V	63
Черничный	8С1Ос1 Б+Е	С	17,9	17,5	26,50	0,80	100	IV	231
<i>Новодвинское участковое лесничество</i>									
Черничный	10С	С	9,9	11,3	13,95	0,60	56	IV	78

Произведены замеры температуры поверхности коры на высоте 1,3 м у 45–50 учетных деревьев, параллельно фиксировалась температура воздуха рядом с деревом. В первом случае использован тепловизор Testo 890-2, во втором – прибор МЭС-200. Температура ксилемы определялась портативным цифровым мультиметром МУ 64 с диапазоном измерения от –20 до 1000 °С. Для этого в каждом анализируемом дереве сверлилось отверстие, в которое вставлялся электрод, изолированный до поверхности контакта (4,5 мм) и соединенный с

прибором посредством гибкого провода [5]. Учет температуры ткани выполнялся в солнечные и пасмурные дни. При этом шурфы сверлились на различной высоте: у шейки корня и на уровне 1,3 м. Всего было осуществлено около 900 замеров.

Результаты исследования и их обсуждение

Температура тканей древесных растений имеет важное значение для всех физиологических процессов в стволах деревьев [17, 19, 20]. Измерение температуры воздуха рядом с деревьями сосны и температуры поверхности коры в сосняках черничном и кустарничково-сфагновом показало неодинаковые результаты в зависимости от погоды: жаркой солнечной безоблачной или пасмурной. В первом случае в обоих типах сосняков температура поверхности коры была выше температуры воздуха. В сосняке черничном эти различия составили 0,98 °С, а в кустарничково-сфагновом – 5,43 °С (табл. 2). В пасмурную погоду, наоборот, температура коры была ниже температуры воздуха: в сосняке черничном – на 1 °С, в сосняке кустарничково-сфагновом – на 0,77 °С. Все полученные данные достоверны.

Таблица 2

**Температура воздуха под пологом рядом с деревьями и поверхности коры
стволов в разных типах леса**
**The temperature of the air under the canopy near trees and the surface
of the bark of the stems in different forest types**

Статистический показатель	Погода							
	жаркая солнечная				пасмурная			
	Сосняк черничный		Сосняк кустарничково-сфагновый		Сосняк черничный		Сосняк кустарничково-сфагновый	
	Воздух	Кора	Воздух	Кора	Воздух	Кора	Воздух	Кора
M, °С	26,63	27,61	26,66	32,09	12,38	11,88	13,03	12,26
m, °С	0,13	0,61	0,31	0,64	0,09	0,04	0,06	0,07
σ	0,92	4,35	2,24	4,59	0,57	0,29	0,44	0,47
V, %	3,59	15,74	8,40	14,29	4,62	2,48	3,35	3,85
P, %	0,51	2,23	1,12	2,00	0,69	0,37	0,47	0,54
t	196,2	44,9	85,1	49,9	145,2	270,3	210,8	183,5

Примечание: Критическое значение критерия Стьюдента для P = 0,95 составляет 2,01.

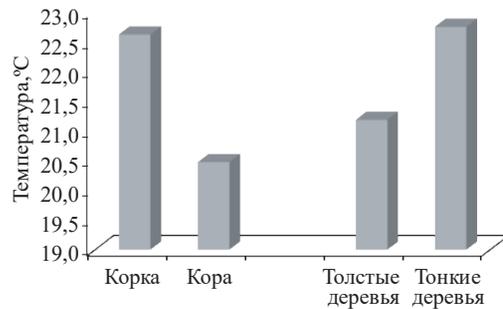
Интересно сравнение температуры поверхности коры на разных высотах стволов в сосняке черничном. На высоте 1,3 м в районе т. н. корки (толстой трещиноватой коры) температура на 2,14 °С выше, чем температура гладкой слегка шелушащейся коры в то же время (рис. 1). Различия достоверны на уровне 0,05. Критерий Стьюдента – 2,58 (критическое значение – 2,01).

Сравнение температуры поверхности коры на высоте груди у деревьев разной толщины показало, что значение для тонких деревьев на 0,56 °С больше, чем для толстых. Однако различия оказались недостоверны по критерию Стьюдента. Он составил 1,98 (критическое значение – 2,01). Наверное, следовало бы увеличить число измерений, и тогда, возможно, различия были бы достоверными. Тем не менее можно констатировать, что температура корки выше темпе-

ратуры гладкой коры, а толщина деревьев слабо влияет на этот показатель, что, скорее всего, связано со структурой коры.

Рис. 1. Температура поверхности корки и гладкой коры у деревьев разной толщины

Fig. 1. The surface temperature of the crust and smooth bark of trees of different thicknesses

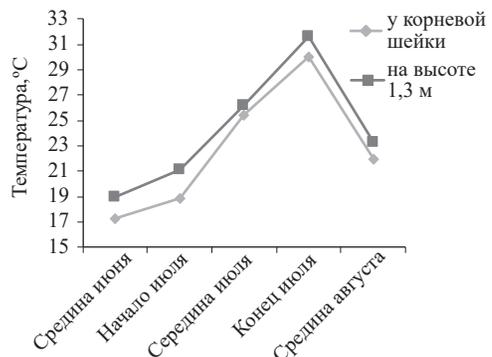


Представляется важным оценить температуру ксилемы стволов сосны, т. е. той части, по которой движутся вода и минеральные элементы.

Таких данных очень мало, и в основном они относятся к другим породам и другим условиям [10–12, 16, 18, 21]. Наши измерения показали, что температура ксилемы у основания дерева (у шейки корня) ниже, чем на высоте 1,3 м, в разные сроки вегетационного периода (рис. 2). Несовпадение в температуре составляет 0,8–1,2 °C. Все различия достоверны на уровне значимости 0,05, за исключением данных для середины июля (здесь критерий Стьюдента при оценке различий средних значений равен 1,01). В это время различия недостоверны. В целом температура ксилемы в течение вегетационного периода возрастает от середины июня и достигает максимума в конце июля, а затем начинает снижаться. По-видимому, температура ксилемы определяется 2 факторами – это температура воздуха и поступающей в ксилему из почвы воды. Вода из почвы холоднее воздуха и у шейки корня, она во многом определяет температуру ксилемы, передвигаясь по ней и постепенно нагреваясь вместе с ее структурами.

Рис. 2. Температура ксилемы у деревьев на разных высотах (сосняк черничный) [7]

Fig. 2. The xylem temperature in trees at different heights (blueberry pine forest) [7]



Температура ксилемы у деревьев разного возраста отличается. Так, температура ксилемы на высоте груди у деревьев 3-го класса возраста на 1,7 °C выше, чем у деревьев 4-го класса возраста (рис. 3). Различия достоверны (критерий Стьюдента – 2,40, пороговое значение – 2,01), то же самое наблюдается и у шейки корня. Это во многом согласуется с ранее полученным выводом о том, что более тонкие деревья имеют температуру поверхности хвои выше. Диаметр деревьев зависит от возраста, этим объясняются приведенные здесь данные, что температура молодых деревьев выше.

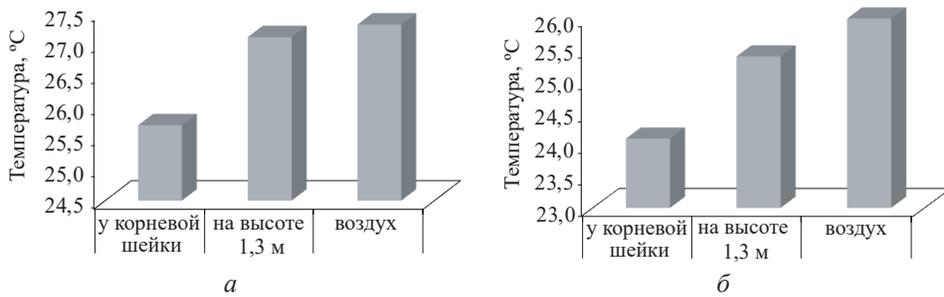


Рис. 3. Температура ксилемы деревьев и воздуха на разных высотах [7]:
 а – деревья 3-го класса возраста; б – деревья 4-го класса возраста

Fig. 3. The tree xylem and air temperatures at different heights [7]:
 а – trees of age class 3; б – trees of age class 4

Выводы

1. Температура гладкой коры сосны в теплую погоду ниже температуры корки (трещиноватой коры) на 2 °С, или на 10 %.
2. Тонкие деревья имеют температуру трещиноватой коры выше, чем толстые, на 1,5 °С, или 7 %.
3. В солнечную безоблачную погоду температура поверхности коры выше температуры воздуха: в сосняке черничном – на 0,98 °С, а в сосняке кустарничково-сфагновом – на 5,43 °С. В пасмурную погоду, наоборот, значение для воздуха превосходит значение для поверхности хвои.
4. Температура ксилемы у шейки корня всегда ниже, чем на высоте 1,3 м. Различия составляют 0,8–1,2 °С.
5. В течение вегетационного сезона температура ксилемы возрастает и достигает максимума к концу июля, после чего снижается. Однако температура ксилемы всегда меньше температуры воздуха и зависит от возраста: более старые деревья имеют показатель ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Валова (Копылова) В.Д. Экология. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дашков и К, 2013. 360 с.
 Valova (Kopylova) V.D. *Ecology*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Dashkov and K. Publ., 2013. 360 p. (In Russ.).
2. Горышина Т.К. Экология растений. М.: Высш. шк., 1979. 368 с.
 Goryshina T.K. *Plant Ecology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 368 p. (In Russ.).
3. Демина М.И., Соловьев А.В., Четкина Н.В. Геоботаника с основами экологии и географии растений. М.: РГАЗУ, 2013. 148 с.
 Demina M.I., Solov'ev A.V., Chechetkina N.V. *Geobotany with the Basics of Ecology and Geography of Plants*. Moscow, Russian State Agrarian Correspondence University Publ., 2013. 148 p. (In Russ.).
4. Дроздов В.В. Общая экология. СПб.: РГГМУ, 2011. 412 с.
 Drozdov V.V. *General Ecology*. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2011. 412 p. (In Russ.).
5. Евсикова Н.Ю., Матвеев Н.Н., Корчагин О.М., Камалова Н.С., Заплетин В.Ю. Сканирование электрического поля в стволах древесных растений как метод выявления жизненного состояния // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 6. С. 43–49.

Evsikova N.Yu., Matveev N.N., Korchagin O.M., Kamalova N.S., Zapletin V.Yu. Scanning of Electric Field in Wooden Plant Stems as Method of Exposing Living State. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 6, pp. 43–49. (In Russ.).

6. Зацепина Г.Н. Свойства и структура воды. М.: Московск. ун-т, 1974. 162 с.

Zatsepina G.N. *Properties and Structure of Water*. Moscow, Moscow University Publ., 1974. 162 p. (In Russ.).

7. Килушева Н.В., Феклистов П.А., Килушев А.Ю., Овсянникова Н.В. Температурный режим ксилемы ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в пригородных лесах Архангельска // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 7. С. 82–88.

Kilyusheva N.V., Feklistov P.A., Kilyushev A.Yu., Ovsyannikova N.V. The Temperature of the Xylem of Pine Trunk (*Pinus sylvestris* L.) in Suburban Forests of Arkhangelsk. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2016, no. 7, pp. 82–88. (In Russ.).

8. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Абрис, 2011. 783 с.

Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Plant Physiology*. Moscow, Abris Publ., 2011. 783 p. (In Russ.).

9. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Основы общей экологии. М.: Унив. кн., 2005. 140 с.

Mirkin B.M., Naumova L.G. *Fundamentals of General Ecology*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2005. 140 p. (In Russ.).

10. Овсянникова Н.В., Волкова Н.В., Феклистов П.А. Температура стволов сосны и ели как фактор определения категории санитарного состояния деревьев ели // Возобновляемые лесные ресурсы: инновационное развитие в лесном хозяйстве: сб. материалов Междунар. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2012. С. 256–260.

Ovsyannikova N.V., Volkova N.V., Feklistov P.A. The Temperature of Pine and Spruce Trunks as a Factor in Determining the Category of Sanitary Condition of Spruce Trees. *Renewable Forest Resources: Innovative Development in Forestry: Collection of Materials of the International Conference*. St. Petersburg, St. Petersburg Forest Technical University Publ., 2012, pp. 256–260. (In Russ.).

11. Овсянникова Н.В., Феклистов П.А., Волкова Н.В. Температура стволов ели // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. Архангельск: САФУ, 2012. Вып. 15. С. 28–30.

Ovsyannikova N.V., Feklistov P.A., Volkova N.V. Temperature of Spruce Trunks. *Environmental Problems of the Arctic and Northern Territories: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2012, iss. 15, pp. 28–30. (In Russ.).

12. Овсянникова Н.В., Феклистов П.А., Волкова Н.В., Мелехов В.И., Тараканов А.М., Мерзленко М.Д. Температура древесины ели обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 1. С. 38–42.

Ovsyannikova N.V., Feklistov P.A., Volkova N.V., Melekhov V.I., Tarakanov A.M., Merzlenko M.D. The Temperature of Spruce Trunks. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 1, pp. 38–42. (In Russ.).

13. Русин И.Н., Арапов П.П. Основы метеорологии и климатологии. СПб.: РГТМУ, 2013. 199 с.

Rusin I.N., Arapov P.P. *Fundamentals of Meteorology and Climatology*. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2013. 199 p. (In Russ.).

14. Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Барзут В.М. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: ИПЦ АГТУ, 1997. 140 с.

Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzut V.M. *Biological and Ecological Features of Pine Growth in the Northern Subzone of the European Taiga*. Arkhangelsk, IPC of Arkhangelsk State University Publ., 1997. 140 p. (In Russ.).

15. Чернова Н.М., Былова А.М. Общая экология. М.: Дрофа, 2004. 416 с.

Chernova N.M., Bylova A.M. *General Ecology*. Moscow, Drofa Publ., 2004. 416 p. (In Russ.).

16. Frits H.C. *Tree Rings and Climate*. London, New York, San Fransisco, Academic Press Publ., 1976. 567 p.

17. Kim Y., Still C.J., Hanson C.V., Kwon H., Greer B.T., Law B.E. Canopy Skin Temperature Variations in Relation to Climate, Soil Temperature, and Carbon Flux at a Ponderosa Pine Forest in Central Oregon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, vol. 226–227, pp. 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.06.001>

18. Kramer P.J., Boyer J.S. *Water Relations of Plants and Soils*. New York, San Diego, Academic Press Publ., 1995. 495 p.

19. Lambers H., Chapin F.S., Pons T.L. *Plant Physiological Ecology*. New York, Springer New York Publ., 1998. 540 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2855-2>

20. Lambers H., Oliveira R.S. *Plant Physiological Ecology*. Springer Cham Publ., 2019. 736 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1>

21. Mayr S., Wieser G., Bauer H. Xylem Temperatures during Winter in Conifers at the Alpine Timberline. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, vol. 137, iss. 1–2, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.02.013>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*182.21

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-204-214

Опыт ступенчатой интродукции дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях северных широт

*А.А. Карбасников*¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [JXM-3724-2024](https://orcid.org/0009-0001-9739-3562),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9739-3562>

Е.Б. Карбасникова^{1✉}, д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAH-6250-2021](https://orcid.org/0000-0003-2850-9362),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2850-9362>

*О.С. Залывская*², д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAV-4901-2020](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

*В.И. Мелехов*², д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; alex-karbon@yandex.ru, helen15@yandex.ru✉

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.zalyvskaya@narfu.ru, v.melekhov@narfu.ru

Поступила в редакцию 26.11.23 / Одобрена после рецензирования 22.02.24 / Принята к печати 26.02.24

Аннотация. Проблема обогащения дендрофлоры зеленых насаждений северных городов и их зеленых зон новыми видами за счет интродуцентов является актуальной. Данную проблему можно решить путем ступенчатой интродукции, которая на сегодняшний день теоретически обоснована и неоднократно применялась на практике. Потепление климата позволяет считать перспективной для Европейского Севера неморальную дендрофлору, в частности дуб черешчатый. Вид обладает высокой декоративностью, особыми экосистемными свойствами. В южной подзоне тайги встречается фрагментарно в пойменных лесах, что сделало его распространенным в озеленении северных городов. Именно насаждения этого вида должны первоочередно рассматриваться как источник семенного материала. Цель исследования заключается в обобщении опыта ступенчатой интродукции дуба черешчатого в условиях северной агломерации. Объектом исследования стал городской сад г. Вологды, где в начале XX в. существовал ботанический сад с экспозицией широколиственных лесов. Эти насаждения рассматриваются как 1-я ступень интродукции. За 2-ю ступень приняты насаждения в пригородной зеленой зоне, созданные сеянцами из семян, собранных с деревьев городского сада. Результаты сравнительного анализа показали, что содержание фотосинтетических пигментов, количественные и качественные характеристики желудей деревьев зеленой зоны выше, чем деревьев городского сада. Можно сделать заключение, что на обоих объектах растения сохраняют жизненную форму, слабо обмерзают. Количество фотосинтетических пигментов лежит в пределах нормы. Содержание каротиноидов находится на высоком уровне, что обеспечивает устойчивость деревьев к неблагоприятным климатическим факторам. Биометрические показатели семян соответствуют значениям, свойственным для естественных условий произрастания вида. При этом необходимо отметить, что по некоторым критериям деревья зеленой зоны агломерации превосходят экземпляры городской черты. Высокое качество

семенного материала позволяет рекомендовать использование деревьев зеленой зоны как маточных. Для получения посадочного материала следует брать желуди средней и крупной фракции.

Ключевые слова: ступенчатая интродукция, зимостойкость, пигменты фотосинтеза, всхожесть, морфометрические показатели, дуб черешчатый, Вологодская область

Для цитирования: Карбасников А.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Мелехов В.И. Опыт ступенчатой интродукции дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях северных широт // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 204–214.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-204-214>

Original article

Experience of Stepwise Introduction of English Oak (*Quercus robur* L.) in Northern Latitudes

*Aleksandr A. Karbasnikov*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [JXM-3724-2024](https://orcid.org/0009-0001-9739-3562), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9739-3562>

*Elena B. Karbasnikova*¹, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAH-6250-2021](https://orcid.org/0000-0003-2850-9362), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2850-9362>

*Olga S. Zalyvskaya*², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAV-4901-2020](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

*Vladimir I. Melekhov*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹Vologda State Dairy Farming Academy named after V.N. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, Molochnoe Village, Vologda, 160555, Russian Federation; Alex-karbon@yandex.ru, helen15@yandex.ru[✉]

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.zalyvskaya@narfu.ru, v.melekhov@narfu.ru

Received on November 26, 2023 / Approved after reviewing on February 22, 2024 / Accepted on February 26, 2024

Abstract. The problem of enriching the dendroflora of green plantations in northern cities and their green zones with new species at the expense of introduced species is urgent. This problem can be solved by stepwise introduction, which is currently theoretically justified and has been repeatedly applied in practice. Climate warming makes it possible to consider nemoral dendroflora, in particular English oak, as promising for the European North. This species is highly decorative and has special ecosystem properties. In the southern taiga subzone, it occurs fragmentarily in floodplain forests, which has made it widespread in the landscaping of northern cities. It is the plantations of this species that should be considered primarily as a source of seed material. The aim of the study is to generalize the experience of stepwise introduction of English oak under the conditions of the northern agglomeration. The object of the study has become the city garden of Vologda, where at the beginning of the 20th century there has been a botanical garden with an exposition of broad-leaved forests. These plantations have been considered as the 1st stage of introduction. The 2nd stage has included plantations in the suburban green zone, created by seedlings created from seeds collected from trees of the city garden. The results of the comparative analysis have shown that the content of photosynthetic pigments, quantitative and qualitative characteristics of acorns of green zone trees are higher than those of city garden trees. It can be concluded that at both sites the plants

retain their vital form and freeze slightly. The amount of photosynthetic pigments is within the normal range. The carotenoid content is at a high level, which ensures the resistance of trees to adverse climatic factors. The biometric parameters of the seeds correspond to the values typical for the natural growing conditions of the species. At the same time, it should be noted that according to some criteria, the trees in the green zone of the agglomeration are superior to those in the city limits. The high quality of the seed material allows us to recommend the use of green zone trees as mother trees. To obtain planting material, acorns of medium and large fractions should be used.

Keywords: stepwise introduction, winter hardiness, photosynthetic pigments, germination, morphometric parameters, English oak, the Vologda Region

For citation: Karbasnikov A.A., Karbasnikova E.B., Zalyvskaya O.S., Melekhov V.I. Experience of Stepwise Introduction of English Oak (*Quercus robur* L.) in Northern Latitudes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 204–214. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-204-214>

Введение

Вопросам интродукции древесных растений в последнее время отводится все большее внимание. Основной причиной является тот факт, что благодаря введению в культуру новых видов обеспечивается увеличение биологического разнообразия насаждений северных городов и их зеленых зон. Городские парки и пригородные леса имеют ключевое значение для рекреации и оздоровления населения. Улучшение структуры зеленых насаждений и повышение их декоративности входит в число первоочередных задач.

В настоящее время сформулированы теоретические выкладки и накоплен практический опыт, позволяющие активно вести работу в этом направлении. В основу положена концепция постепенного продвижения представителей дендрофлоры в более суровые условия. Анализ литературных источников [1–3, 5, 8, 14], освещающих результаты интродукционных испытаний дендрофлоры северных городов, свидетельствует о том, что у каждого последующего поколения растений снижается интродукционный стресс и они легче адаптируются к новым условиям.

Перспективным видом для внедрения в северные регионы является относящийся к неморальной флоре дуб черешчатый. Он обладает хорошими санитарно-гигиеническими качествами, что увеличивает его ценность. Учеными доказано [13, 18–20, 24], что дубовые леса положительно влияют на здоровье человека. Выделяемые фитонциды насыщают кровь кислородом, успокаивают, благотворно влияют на сон, а также характеризуются значительной антибактериальной способностью. Дуб черешчатый высоко декоративен за счет мощной кроны, резных листьев, окрашивающихся в желтый цвет осенью, желудей, появляющихся на ветках к концу лета.

По данным ряда ученых [6, 10, 21], граница ареала дуба проходит по территории Вологодской области, но она не является сплошной. Можно встретить отдельные рощи, сформированные видом, или его единичные экземпляры в пойменных лесах. Здесь он произрастает фрагментарно как рефугиумальные растительные группировки.

Цель исследования – обобщение опыта ступенчатой интродукции дуба черешчатого в условиях северной агломерации.

Объекты и методы исследования

Источником исходного материала при акклиматизации принимается северная граница ареала растений. Предпочтительными условиями для выращивания 1-го поколения культиваров являются территории городов, где формируется т. н. остров тепла. За счет жилой застройки, покрытых асфальтом и камнем дорог, интенсивного движения автотранспорта, большого числа подземных коммуникаций и других факторов здесь создается особый микроклимат. В результате воздух в городе оказывается на несколько градусов (до 5 °С) выше, чем в пригороде, скорость ветра – меньше на 10–20 %, влажность воздуха – ниже, а таяние снега начинается раньше. Выращивание интродуцентов в урбанизированных пространствах является 1-й ступенью интродукции. Следующее поколение культиваров целесообразно разводить в условиях зеленых зон городов с постановкой производственных опытов. Каждое последующее поколение интродуцентов приближается к группе пониженного интродукционного стресса с увеличением посевных качеств семян.

Исследование проводилось в пределах Вологодской северной агломерации. Она характеризуется умеренно континентальным климатом с положительным водным балансом. Зимний период холодный и малоснежный при неустойчивом режиме погоды, его длительность составляет 162 дня. Самый холодный месяц январь имеет среднюю температуру воздуха –11,5 °С. Абсолютный минимум – –47,1 °С. Снежный покров достигает в среднем 36 см. Летний период умеренно теплый и влажный, длится 203 дня. Самым жарким месяцем является июль со средней температурой 16,9 °С. Абсолютный минимум – 1,2 °С, абсолютный максимум – 34,5 °С. Продолжительность безморозного периода составляет 116 дней.

В настоящий момент дуб встречается на 14 объектах общего пользования в пределах городской черты г. Вологды. Здесь он появился в результате стихийной интродукции, когда для озеленения этого населенного пункта использовался посадочный материал, привезенный из лесов на границе с Ярославской областью или из западных районов Вологодской области.

Основная часть исследования проведена на территории Кремлевского сада г. Вологды, где в период с 1924 по 1929 гг. существовал Ботанический сад, превращенный со временем в парк культуры и отдыха. На его территории располагался акклиматизационный участок с древесными породами, среди которых присутствовали экземпляры дуба, перенесенные из лесов Грязовецкого и Череповецкого районов. Мы считаем это поколение началом 1-й ступени интродукции дуба в городские условия на северной границе его ареала. За следующую ступень мы принимаем пригородную зеленую зону, на территории которой есть групповые посадки дуба, выращенные из семян от деревьев Кремлевского сада.

Результаты исследования и их обсуждение

Программа исследования включала изучение зимостойкости и морозоустойчивости, сезонного развития, репродуктивных свойств в течение 10-летнего периода. На объектах проводились фенологические наблюдения, в ходе которых устанавливалось влияние абиотических и биотических факторов внешней

среды, особенно на процессы цветения, опыления, образования завязей и созревания желудей. Отмечено, что дуб черешчатый проходит все стадии сезонного развития (см. рисунок).



Условные обозначения



Фенологический спектр сезонного развития дуба черешчатого в г. Вологде

The phenological spectrum of seasonal English oak development in Vologda

Набухание почек и распускание листьев приходится на 1–2-ю декады мая (в среднем 9 ± 5 мая). Температурный порог составляет 12°C . Примерно через неделю наблюдается разворачивание листьев. Полное облиствление наступает 18 ± 3 мая при температуре близкой к 15°C . В конце мая отмечается цветение (в среднем 30 ± 4 мая) при накоплении активных температур $508,9 \pm 2,6^\circ\text{C}$. Продолжительность этого этапа развития незначительная, около 8 ± 1 день. Оценка интенсивности цветения по шкале В.Г. Каппера составляет 4 балла. Сроки зацветания в значительной степени зависят от погодных условий [4, 9]. При теплой и сухой погоде и отсутствии осадков данная ступень развития достигается раньше, но ее продолжительность меньше, и наоборот, при низких температурах и значительном количестве осадков зацветание бывает позднее и его длительность больше.

Массовое созревание плодов приходится на 24 ± 5 сентября, балл плодоношения – 3–4. Урожай желудей повторяется не ежегодно, а через 2–3 года, т. е. периодически. При этом за 10 лет исследования абсолютных неурожаев (полного отсутствия желудей) не наблюдалось. Во 2-й декаде сентября отмечены пожелтение листьев и листопад, который длится до конца октября. Весь цикл фенологического развития дуба черешчатого проходит до установления стабильных отрицательных температур. Продолжительность вегетации составляет 158 ± 6 дней, что на 4 дня меньше, чем в условиях г. Москвы [12].

В зеленой зоне Вологодской агломерации дуб черешчатый также проходит полный цикл развития, разница в наступлении фенологических фаз с городскими условиями составляет 3–5 дней.

Зимостойкость и морозоустойчивость древесных растений являются важнейшими показателями для установления степени напряженности интродукционного стресса [21–23]. От этих характеристик зависит способность дерева сохранять жизненную форму, декоративность, противостоять обмерзанию 1-летних побегов и т. д.

Зимостойкость и морозоустойчивость определяли весной, после окончания поздних весенних заморозков. Для этого производили измерения части ветвей, получивших повреждения из-за низких температур (табл. 1).

Таблица 1

**Зимостойкость и морозоустойчивость дуба черешчатого
в Вологодской агломерации**

The winter hardiness and frost resistance of English oak in the Vologda agglomeration

Объект исследования	Сохранение жизненной формы	Зимостойкость, балл/процент обмерзания 1-летних побегов	Морозоустойчивость, индекс обмерзания/характеристика
Город	Сохраняется	II/40	0,5/слабо обмерзает
Пригородная зеленая зона		II/10	0,15/слабо обмерзает

Жизненная форма дерева у дуба черешчатого в условиях Вологодской агломерации сохраняется, высота взрослых растений достигает 16–20 м. Однолетние побеги слабо обмерзают, при этом повреждения наблюдаются только в особенно морозные зимы, характеризующиеся отклонениями от температурной нормы. При сравнении растений в городской черте и зеленой зоне города отмечается меньшее обмерзание у деревьев 2-й интродукционной ступени.

Чувствительность к изменению факторов внешней среды определяли по состоянию фотосинтетического аппарата. Отбор образцов листьев производился в июле из средней части кроны, листья сразу доставлялись в лабораторию для проведения анализа (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание пигментов фотосинтеза в листьях дуба черешчатого
для Вологодской агломерации**

**The content of photosynthetic pigments in the leaves of English oak
for the Vologda agglomeration**

Объект исследования	Значение	Содержание, мг/г сырого веса				Отношение	
		Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Каротиноиды	Хлорофилл <i>a + b</i>	$\frac{\text{хлорофилл } a}{\text{хлорофилл } b}$	$\frac{\text{хлорофилл } a + b}{\text{каротиноиды}}$
Город	Среднее	5,6± 0,3	2,4± 0,3	2,5± 0,4	8,6± 0,5	3,0± 0,6	4,2± 0,6
	Минимальное	3,7	0,5	1,2	5,0	1,3	1,3
	Максимальное	6,7	3,9	5,1	9,6	7,5	7,3
Пригородная зеленая зона	Среднее	5,8± 0,3	2,6± 0,3	2,5± 0,4	8,8± 0,5	3,3± 0,6	4,2± 0,6
	Минимальное	3,7	0,5	1,3	5,2	1,3	1,3
	Максимальное	6,9	3,8	5,4	10,5	7,5	7,3

Эффективность фотосинтеза в большей степени зависит от содержания хлорофиллов *a* и *b*, их соотношение свидетельствует о степени сформированности ассимиляционного аппарата и в данном случае лежит в верхней границе нормы. Содержание хлорофилла *a* более чем в 2 раза выше, чем хлорофилла *b*, что говорит о светолюбивости вида. Количество

каротиноидов – пигментов, выполняющих защитную функцию, – достаточно высокое, что показывает хорошую приспособленность деревьев к неблагоприятным факторам среды. В целом уровень пигментов в листьях соответствует норме.

Следующим этапом продвижения интродуцентов является их культивирование в пригородных зонах. Работа проводилась на деревьях, выращенных из желудей, собранных в Кремлевском саду и высаженных в пригородной зоне. В настоящий момент их возраст составляет 17 лет. Высота в среднем $5,3 \pm 0,11$ м, диаметр ствола – $9 \pm 0,25$ см. Плодоношение наблюдается с 15 лет, бал цветения и плодоношения – 2–3. Важным показателем натурализации растений под влиянием интродукционного стресса является наличие полноценных семян [7, 11, 15]. Сбор желудей для анализа осуществляли осенью с земли, со 2-й декады сентября (табл. 3).

Таблица 3

Биометрические показатели семян дуба черешчатого в Вологодской агломерации
The biometric indicators of English oak seeds in the Vologda agglomeration

Объект исследования	Показатель	Длина, мм	Толщина, мм	Ширина, мм	Объем, мм ³	Масса 1000 шт., г
Город	Минимальное	15	11	11	1815	2254
	Максимальное	29	18	18	9396	5692
	Среднее	$25,2 \pm 0,56$	$15,3 \pm 0,24$	$15,2 \pm 0,18$	$7724,9 \pm 196,12$	$3871 \pm 498,03$
Пригородная зеленая зона	Минимальное	17	13	13	2873	2429,7
	Максимальное	33	20	20	13200	6589,2
	Среднее	$27,7 \pm 0,44$	$16,8 \pm 0,20$	$16,8 \pm 0,20$	$8009,6 \pm 263,07$	$4553,97 \pm 552,93$
<i>Среднее по ареалу</i>		13–36	11–12	11–12	–	3000–4000

В условиях г. Вологды у дуба черешчатого формируются полноценные семена, которые имеют достаточную для получения семенного материала всхожесть.

Биометрические показатели семян соответствуют видовым особенностям и находятся в границах нормы. Масса 1000 шт. семян несколько выше, чем в целом по ареалу, – на 12–34 %. Это свидетельствует о качестве семенного материала. Сравнивая данные для зеленой зоны с данными для г. Вологды, также отмечаем, что средние размеры и масса семян выше на 9–10 и 15 % соответственно.

Всхожесть желудей определяли на 4 пробных образцах методом проращивания во влажном песке. Энергия прорастания подсчитывалась на 7-й день испытания, а всхожесть – на 14-й день. Для установления доброкачественности желуды разрезали на 2 части и визуальным путем оценивали состояние зародыша и эндосперма, внешней и внутренней поверхностей семядолей (табл. 4).

Таблица 4

Качество желудей дуба черешчатого в Вологодской агломерации
The quality of English oak acorns in the Vologda agglomeration

Объект исследования	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Доброкачественность, %	Класс качества
Город	72	93	93	1
Пригородная зеленая зона	81	96	98	1

Результаты оценки способности дуба черешчатого из разных мест произрастания давать семенное потомство наглядно демонстрируют, что показатели желудей, полученных от интродуцентов 1-го поколения, ниже по сравнению с семенами от деревьев 2-го поколения. Энергия прорастания желудей из зеленой зоны выше на 11 %. Все партии в проведенном исследовании соответствуют 1-му классу качества. Всхожесть и доброкачественность в городской черте также несколько уступают пригородным посадкам – на 3–5 %.

Данные свидетельствуют о том, что с каждым последующим поколением растения приближаются к группе с пониженным интродукционным стрессом.

Далее изучены сеянцы, выращенные из желудей. Партия семян была разделена на 3 группы: крупные, средние и мелкие. Осенью в открытый грунт произведен посев, осенью следующего года определены морфометрические показатели сеянцев (табл. 5). Проанализировано отношение крупности семян и роста потомства [17].

Таблица 5

Морфометрические показатели 1-летних сеянцев дуба черешчатого
The morphometric parameters of 1-year-old English oak seedlings

Размер семян			Всхожесть семян, %	Высота побега		Диаметр шейки корня	
характеристика	длина, мм ширина, мм	средняя масса, г		см	%	мм	%
Крупные	$\frac{28-33}{17-20}$	5,3	96	13,64±1,03	141	4,80±0,25	129
Средние	$\frac{22-27}{15-17}$	4,5	99	14,70±1,02	152	5,14±0,21	138
Мелкие	$\frac{17-21}{13-14}$	2,8	92	9,65±0,44	100	3,72±0,16	100

Отбор семян по морфометрическим параметрам оказался неэффективным. Продуктивные свойства средних по размерам семян выше, чем крупных. Подобные выводы ранее уже были получены учеными [16]: у самых крупных семян удельный вес снижается, т. к. они имеют более рыхлое строение и повышенное содержание воздуха в оболочках. В этом заключается одна из причин того, что самые крупные семена иногда уступают меньшим по урожайности. Деление на фракции действительно только для удаления мелких семян.

Заключение

В ходе сравнительного анализа 2 поколений дуба черешчатого установлено, что по ряду параметров дерева 2-го поколения превышают маточные. Современные климатические характеристики северной агломерации соответствуют сезонному ритму древесной породы, которая проходит полный цикл развития. Зимостойкость высокая – II балл, сохраняется жизненная форма дерева, а обмерзание 1-летних побегов находится на уровне не более 40 % их длины и лишь в аномальные зимы, при этом у интродуцентов 2-й степени обмерзание ниже (до 10 %). Количество фотосинтетических пигментов свидетельствует о высокой степени акклиматизации вида. И если у маточных растений некоторые показатели находятся на границе нормы, то у 2-го поколения – в оптимуме. Биометрические параметры и качественные показатели желудей 2-го поколения больше. Это позволяет рекомендовать их для получения семян в целях дальнейшего продвижения вида в северные условия. При посеве следует отдавать предпочтение семенам средней и крупной фракций.

Целесообразно дальнейшее продвижение дуба черешчатого в северные регионы путем включения в городские зеленые насаждения и зеленые зоны городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андропова М.М., Бабич Н.А., Хамитов Р.С. Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины: моногр. Архангельск, 2021. 412 с.

Andronova M.M., Babich N.A., Khamitov R.S. *Stepwise Introduction of Woody Plants in the Northern Russian Plain*: Monograph. Arkhangelsk, 2021. 412 p. (In Russ.).

2. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В. Основные подходы развития ступенчатой интродукции в Северные широты // Труды по интродукции и акклиматизации растений. Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН. Ижевск, 2021. С. 17–19.

Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Alexandrova Yu.V. Basic Approaches of the Development of Stepped Introduction to the Northern Latitudes. *Trudy po introduktsii i akklimatizatsii rastenij*. Izhevsk, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 17–19. (In Russ.).

3. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 73–85.

Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gaevskiy N.P. Stepwise Introduction of Dendroflora Species to the Northeastern Part of the Russian Plain (Review). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-73-85>

4. Буторова О.Ф., Шестак К.В. Фенология интродуцентов в дендрарии Сибирского государственного технологического университета // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 2. С. 49–54.

Butorova O.F., Shestak K.V. Phenology of Introduced Plants in Arboretum of Siberian State Technological University. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2007, no. 2, pp. 49–54. (In Russ.).

5. Залывская О.С. Интродукция видов дендрофлоры в субарктических условиях: дис. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2022. 295 с.

Zalyvskaya O.S. *Introduction of Dendroflora Species in Subarctic Conditions*: Doc. Agric. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2022. 295 p. (In Russ.).

6. Иванова М.Г. Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) на северном пределе распространения в Европейской части России: дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2022. 197 с.

Ivanova M.G. *English Oak (Quercus robur L.) at the Northern Limit of its Distribution in the European Part of Russia*: Cand. Agric. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2022. 197 p. (In Russ.).

7. Казанцева М.Н., Казанцев П.А. Плодоношение дуба черешчатого под Тюменью в контексте климатических изменений // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 3, ч. 2. С. 327.

Kazantseva M.N., Kazantsev P.A. Fruiting of the English Oak near Tyumen in the Context of Climate Change. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Researches*, 2017, no. 3, part 2, p. 327. (In Russ.).

8. Карбасникова Е.Б. Натурализация видов дендрофлоры в условиях интродукционного стресса: дис. д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2022. 267 с.

Karbasnikova E.B. *Naturalization of Dendroflora Species under Conditions of Introduction Stress*: Doc. Agric. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2022. 267 p. (In Russ.).

9. Кущенко И.Т. Влияние температуры воздуха на сезонный рост хвойных лесобразующих видов в таежной зоне (Республика Карелия) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 84–93.

Kishchenko I.T. The Influence of Air Temperature on Seasonal Growth of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Republic of Karelia). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 84–93. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.84>

10. Комиссарова М.Г. О стихийно меняющемся ареале дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2013. № 3. С. 56–58.

Komissarova M.G. Natural Habitat Change of English Oak (*Quercus robur* L.). *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) Federal'nogo univ'eristeta. Seriya: Estestvennye nauki = Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences*, 2013, no. 3, pp. 56–58. (In Russ.).

11. Крюкова С.А., Ширнин В.К. Плодоношение дубрав и плюсовых деревьев дуба черешчатого // Лесотехн. журн. 2017. Т. 6, № 2. С. 22–30.

Kryukova S.A., Shirnin V.K. Oakwood and Plus Trees Common Oak Fruiting. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 22–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/19950>

12. Малаховец П.М., Тисова В.А. Деревья и кустарники дендросада Архангельского государственного технического университета. Архангельск: АГТУ, 1999. 50 с.

Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Trees and Shrubs of the Arboretum of the Arkhangelsk State Technical University*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 1999. 50 p. (In Russ.).

13. Моисеев Н.А. Роль лесов в создании экологически комфортной среды обитания и меры для ее реализации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 203–207.

Moiseev N.A. The Role of Forests in Creation of a Comfortable Environment and Measures for its Implementation. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 5, pp. 203–207. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.203>

14. Романова А.Б. Интродукция древесных растений. Красноярск, 2018. 86 с.

Romanova A.B. *Introduction of Woody Plants*. Krasnoyarsk, 2018. 86 p. (In Russ.).

15. Рубцов В.И., Самошкин Е.Н. Интродукция древесных растений – важный путь биологического разнообразия лесных экосистем // Изв. вузов. Лесн. журн. 1997. № 1–2. С. 44–47.

Rubtsov V.I., Samoshkin E.N. Introduction of Woody Plants – an Important Pathway for Biological Diversity of Forest Ecosystems. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1997, no. 1–2, pp. 44–47. (In Russ.).

16. Хатнянский В.И., Волгин В.В., Пивень Л.Е. Влияние крупности семян на их посевные и урожайные качества // Науч.-техн. бюл. Всерос. науч.-исследоват. ин-та масличных культур. 2005. Вып. 1(132). С. 42–48.

Khatnyanskij V.I., Volgin V.V., Piven' L.E. The influence of Seed Size on Their Sowing and Yield Qualities. *Nauchno-tekhnicheskij bulluten' Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur*, 2005, iss. 1(132), pp. 42–48. (In Russ.).

17. Ширнин В.К., Кострикин В.А., Ширнина Л.В., Крюкова С.А. Лесовосстановление дуба черешчатого сеянцами с закрытой корневой системой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 32–41.

Shirnin V.K., Kostrikin V.A., Shirnina L.V., Kryukova S.A. English Oak Reforestation by Ball-Rooted Seedlings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 2, pp. 32–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.32>

18. Agostinelli M., Cleary M., Martín J.A., Benedicte R.A., Witzell J. Pedunculate Oaks (*Quercus robur* L.) Differing in Vitality as Reservoirs for Fungal Biodiversity. *Frontiers in Microbiology. Section: Fungi and Their Interactions*, 2018, vol. 9, art. no. 1758. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01758>

19. Bolund P., Hunhammar S. Ecosystem Services in Urban Areas. *Ecological Economics*, 1999, vol. 29, iss. 2, pp. 293–301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)

20. Helander M., Ahlholm J., Sieber T.N., Hinneri S., Saikkonen K. Fragmented Environment Affects Birch Leaf Endophytes. *New Phytologist*, 2007, vol. 175, iss. 3, pp. 547–553. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02110.x>

21. Karbasnikova E.B., Karbasnikov A.A., Kiryanova V.S., Suvorova E.A., Vasilyeva D.A. Introduction of Pedunculate Oak in the Conditions of the Northern Border of the Range. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1045, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012025>

22. Netsvetov M., Sergejev M., Nikulina V., Korniyenko V., Prokopuk Yu. The Climate to Growth Relationships of Pedunculate Oak in Steppe. *Dendrochronologia*, 2017, vol. 44, pp. 31–38. <https://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.004>

23. Kwaśna H., Szewczyk W., Behnke-Borowczyk J. Fungal Root Endophytes of *Quercus robur* Subjected to Flooding. *Forest Pathology*, 2016, vol. 46, iss. 1, pp. 35–46. <https://doi.org/10.1111/efp.12212>

24. Witzell J., Martín J.A. Phenolic Metabolites in the Resistance of Northern Forest Trees to Pathogens – Past Experiences and Future Prospects. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, vol. 38, no. 11, pp. 2711–2727. <https://doi.org/10.1139/X08-112>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest