

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

5

2024

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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)

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

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

5

2024

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

EDITORIAL BOARD:

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

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>С.Н. Тарханов, Е.А. Пинаевская, Ю.Е. Аганина, А.С. Пахов.</i> Адаптация форм <i>Pinus sylvestris</i> с разным цветом семян на избыточно увлажненных почвах.....	9
<i>Е.Н. Киселева, М.А. Раченко, А.М. Раченко, И.М. Мокшинова.</i> Укореняемость черенков хвойных видов дендрофлоры Прибайкалья.....	27
<i>В.В. Иванов, А.Н. Борисов, О.А. Шапченкова, А.Е. Петренко.</i> Особенности роста сосны обыкновенной в условиях Красноярской лесостепи.....	40
<i>С.И. Тарасов, Н.В. Герлинг.</i> Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть II. Моделирование площади поверхности иглы.....	51
<i>А.А. Парамонов, В.А. Усольцев, С.В. Третьяков, И.В. Цветков, И.С. Цепордей.</i> Обобщенные модели фитомассы деревьев ивы (род <i>Salix</i> L.): мета-анализ.....	64
<i>В.П. Макаров, Ю.В. Зима.</i> Концентрация химических элементов в хвое <i>Larix gmelinii</i> и листьях <i>Betula pendula</i>	76
<i>О.Е. Клименко, Н.И. Клименко.</i> Влияние насаждений <i>Quercus robur</i> L. и <i>Juglans ripensis</i> Engelm. на свойства степных почв.....	91
<i>Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина, И.В. Шевелина.</i> Формирование вторичного ареала караганы древовидной в лесопарках г. Екатеринбурга.....	109
<i>А.К. Шхапацев, К.Ш. Казеев, Ю.С. Козунь, В.П. Солдатов, А.Н. Федоренко, В.В. Вилкова.</i> Биологическая активность горных почв Западного Кавказа после сведения леса.....	119

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
 ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>В.И. Клевеко.</i> Моделирование теплового режима дорожной одежды и земляного полотна лесовозных дорог.....	133
<i>В.И. Посметьев, В.О. Никонов, А.Ю. Мануковский, В.В. Посметьев, И.В. Казиков.</i> Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля.....	143

С.В. Посыпанов, К.В. Козлов. Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор..... 159

В.Д. Эскин, В.Н. Ермолин, А.И. Криворотова. Конструкционные плиты из гидродинамически активированной коры сосны (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ..... 175

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

С.В. Анискин, В.С. Куров. Эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов содорегенерационного котла при производстве целлюлозы..... 188

Т.А. Королева, В.В. Медведев, Ю.В. Помелов. Результаты исследования взаимосвязи вязкости и механической прочности блененной лиственной сульфатной целлюлозы..... 203

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

А.М. Антонов, А.И. Чудецкий, Ю.С. Черятова, И.Б. Кузнецова, Е.И. Куликова. Совершенствование технологического цикла клонального микроразмножения *Rubus chamaemorus* L. 214



CONTENTS

FORESTRY

- S.N. Tarkhanov, E.A. Pinaevskaya, Yu.E. Aganina, A.S. Pakhov.* Adaptation of *Pinus sylvestris* Forms with Seeds of Different Colours under Conditions of Excessively Moist Soils..... 9
- E.N. Kiseleva, M.A. Rachenko, A.M. Rachenko, I.M. Mokshonova.* Rooting of the Cuttings of Coniferous Species of Dendroflora of the Baikal Region..... 27
- V.V. Ivanov, A.N. Borisov, O.A. Shapchenkova, A.E. Petrenko.* The Peculiarities of Scots Pine Growth in the Conditions of the Krasnoyarsk Forest-Steppe..... 40
- S.I. Tarasov, N.V. Gerling.* Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part II. Modeling the Needle Surface Area..... 51
- A.A. Paramonov, V.A. Usoltsev, S.V. Tretyakov, I.V. Tsvetkov, I.S. Tsepordey.* Generic Models of Willow (genus *Salix* L.) Tree Phytomass: a Meta-Analysis..... 64
- V.P. Makarov, Yu.V. Zima.* Concentration of Chemical Elements in *Larix gmelinii* Needles and *Betula pendula* Leaves..... 76
- O.E. Klimenko, N.I. Klimenko.* The Influence of *Quercus robur* L. and *Juglans rupestris* Engelm. Plantations on the Properties of Steppe Soils..... 91
- E.A. Tishkina, L.A. Semkina, I.V. Shevelina.* Formation of the Secondary Area of *Caragana arborescens* Lam. in the Forest Parks of Yekaterinburg..... 109
- A.K. Shkhapatsev, K.Sh. Kazeev, Yu.S. Kozun', V.P. Soldatov, A.N. Fedorenko, V.V. Vilkova.* Biological Activity of Mountain Soils of the Western Caucasus after Deforestation..... 119

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

- V.I. Kleveko.* Modeling the Thermal Regime of Road Pavement and Roadbed of Logging Roads..... 133
- V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov, A.Yu. Manukovskii, V.V. Posmetyev, I.V. Kazakov.* Modeling of the Rotary Mechanism of the Hydraulic Manipulator of a Timber Truck..... 143

S.V. Posypanov, K.V. Kozlov. The Engineering Calculation of Flexible Shells of Timber-Rafting Anchors..... 159

V.D. Eskin, V.N. Ermolin, A.I. Krivorotova. Structural Boards Made of Hydrodynamically Activated Pine (*Pinus sylvestris*) Bark without Binders..... 175

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

S.V. Aniskin, V.S. Kurov. The Effect of Intensive Oxidation of Hydrogen Sulfide from Flue Gases of a Soda Recovery Boiler in the Production of Pulp..... 188

T.A. Koroleva, V.V. Medvedev, Yu.V. Pomelov. The Results of the Study of the Relationship between Viscosity and Mechanical Strength of Bleached Hardwood Kraft Pulp..... 203

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

A.M. Antonov, A.I. Chudetsky, Yu.S. Cheryatova, I.B. Kuznetsova, E.I. Kulikova. Improving the Technological Cycle of Microclonal Propagation of *Rubus chamaemorus* L. 214



Научная статья

УДК 581.5:58.087

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-9-26

Адаптация форм *Pinus sylvestris* с разным цветом семян на избыточно увлажненных почвах

С.Н. Тарханов[✉], д-р биол. наук, зав. лаб., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Е.А. Пинаевская, 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>

Ю.Е. Аганина, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

А.С. Пахов, мл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-8840>

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; tarkse@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru, aleksander.pakhoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.22 / Одобрена после рецензирования 29.01.23 / Принята к печати 02.02.23

Аннотация. Исследованы адаптивные изменения биохимических показателей разных форм сосны в условиях постоянного избыточного увлажнения почв в северных широтах европейской части России. Показано влияние сезонной изменчивости на динамику фотосинтетического пигментного комплекса форм сосны с разной окраской семян. Установлено, что повышенная температура в начале осени способствует накоплению хлорофилла, и это может негативно сказаться на закаливании деревьев при подготовке к перезимовке. Доля хлорофиллов, локализованных в светособирающих комплексах хлоропластов, колеблется с мая по ноябрь от 43 до 60 %, что связано с адаптацией фотосинтетического аппарата деревьев разных форм к световым условиям высоких широт и другим экологическим факторам. Определено, что антоцианы значительно больше накапливаются в хвое сосны осенью: их антиоксидантная роль в этот сезон повышается. Выявлено, что пероксидазная активность в 1-летней хвое усиливается в осенний период. Это можно рассматривать как защитную реакцию разных форм сосны, препятствующую развитию неконтролируемых процессов при ограниченном снабжении органов кислородом. Отмечено значительное образование водорастворимых белков в хвое сосны с темной окраской семян в связи с ухудшением погодных условий. Эта форма по сравнению с сосной со светлыми семенами, вероятно, сильнее реагирует на действие стрессовых факторов, усиливающих гипоксию корневой системы. Сделан вывод о том, что концентрация пролина в хвое – очень изменчивый показатель, резко реагирующий на действие стрессовых факторов. Общие тенденции в сезонной динамике показателя не выявлены. Установлено, что содержание аскорбиновой кислоты в хвое деревьев разных форм сосны в конце весны существенно меньше, чем в летний и осенний сезоны.

© Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С., 2024

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

Это свидетельствует о развитии защитных механизмов для предотвращения окислительного стресса при неблагоприятных метеоусловиях.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, формы сосны обыкновенной, сезонная изменчивость, цвет семян, биохимическая адаптация, фотосинтетический пигментный комплекс, рН, активность пероксидаз, содержание стрессовых метаболитов, постоянное избыточное увлажнение почв

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН» (регистрационный номер – 122011400384-2).

Для цитирования: Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Адаптация форм *Pinus sylvestris* с разным цветом семян на избыточно увлажненных почвах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 9–26. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-9-26>

Original article

Adaptation of *Pinus sylvestris* Forms with Seeds of Different Colours under Conditions of Excessively Moist Soils

Sergei N. Tarkhanov[✉], Doctor of Biology, Laboratory Chief, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Ekaterina A. Pinaevskaya, 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>

Yuliya E. Aganina, Junior Research Scientist; ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

Aleksandr S. Pakhov, Junior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-8840>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prosp., 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; tarkse@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru, aleksander.pakhoff@yandex.ru

Received on November 1, 2022 / Approved after reviewing on January 29, 2023 / Accepted on February 2, 2023

Abstract. Adaptive changes in biochemical parameters of different pine forms under conditions of constant excessive soil moisture in the northern latitudes of the European part of Russia have been studied. The influence of seasonal variability on the dynamics of the photosynthetic pigment complex of pine forms with different seed colours has been shown. It has been established that elevated temperatures in early autumn contribute to the accumulation of chlorophyll, and this can negatively affect the hardening of trees in preparation for overwintering. The proportion of chlorophylls localized in the light-harvesting complexes of chloroplasts fluctuates from May to November from 43 to 60 %, which is associated with the adaptation of the photosynthetic apparatus of trees of different forms to the light conditions of high latitudes and other environmental factors. It has been determined that anthocyanins accumulate significantly more in pine needles in autumn, which increases their antioxidant role in this season. It has been revealed that peroxidase activity in 1-year-old needles increases in the autumn period. This can be considered as a protective reaction of different forms of pine, preventing the development of uncontrolled processes with a limited oxygen supply



to the organs. A significant new formation of water-soluble proteins in pine needles with dark-coloured seeds has been detected due to the deterioration of weather conditions. This form, compared to pine with light seeds, probably reacts more strongly to the effect of stress factors that increase hypoxia of the root system. It has been concluded that the concentration of proline in needles is a very variable indicator, reacting sharply to the action of stress factors. No general trends in the seasonal dynamics of the indicator have been identified. It has been established that the content of ascorbic acid in the needles of trees of different forms of pine in late spring is significantly lower than in the summer and autumn seasons. This indicates the development of protective mechanisms to prevent oxidative stress under adverse weather conditions.

Keywords: Scots pine, Scots pine forms, seasonal variability, seed colour, biochemical adaptation, photosynthetic pigment complex, pH, peroxidase activity, stress metabolite content, constant excessive soil moisture

Acknowledgements: The work was carried out as part of the state assignment of the Federal State Budgetary Research Institution N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration no. 122011400384-2).

For citation: Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E., Pakhov A.S. Adaptation of *Pinus sylvestris* Forms with Seeds of Different Colours under Conditions of Excessively Moist Soils. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 9–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-9-26>

Введение

Наиболее надежными морфологическими маркерами наследственных форм у хвойных являются признаки генеративных органов. Они обладают низкими уровнями экологической и географической изменчивости, стабильны во всех метамерах кроны деревьев и во времени [1, 13, 19, 21]. Считается [7], что в этом случае в процессе онтогенеза признак независим по отношению к формирующим его условиям, а его развитие определяется преимущественно генотипом особи. Этот подход широко применяется в последние годы в исследованиях фенотипической структуры популяций хвойных. К числу альтернативных дискретных вариаций морфологических признаков (присутствие особей только одной вариации признака) у видов семейства Pinaceae можно отнести, например, окраску мужских и женских стробилов, цвет оболочки семян, тип развития семенных чешуй шишек и др. [15].

Постоянное избыточное увлажнение почвы на Севере приводит к корневой гипоксии, вызывая нарушение кислородного режима в тканях и хронический стресс, который сопровождается изменением метаболических реакций у всего растительного организма. Замедление роста и физиологических процессов у сосны в сфагновых лесорастительных условиях объясняется нарушением работы ее корневой системы, вызываемым затоплением, а также недостаточным снабжением растущих побегов энергопластическими веществами из кроны в результате нарушения их нормального оттока и передвижения в дереве [9]. Растение отвечает на стресс развитием устойчивости, что подразумевает биохимические, физиологические и морфологические изменения, требующиеся для снятия или ослабления стресса [44]. Эти изменения связаны с генетической адаптацией и формируются под влиянием стресса и природных факторов. Наиболее распространенная стратегия устойчивости в условиях хронического действия негативных факторов – выработка защитных механизмов [24, 42]. К индикаторам – стрессовым метаболитам с защитной функцией – относят,

например, аминокислоты, низкомолекулярные углеводы, полиамины. Под действием различных стрессов в клетках активизируется экспрессия генов, кодирующих синтез стрессовых белков [35, 36, 39]. Для гипоксического стресса характерны реакции накопления крахмала, аминокислот и белков, органических кислот цикла Кребса [30]. Деревья разных форм сосны могут быть и более, и менее устойчивыми, например, к недостатку кислорода при избытке влаги в почве и другим факторам, а следовательно, различаться по содержанию этих метаболитов. Динамика их содержания связана с работой комплекса ферментов, что также обуславливает их рассмотрение с позиции использования в качестве индикаторов стресса [24].

Цель работы – изучение адаптивных изменений биохимических показателей у форм сосны обыкновенной с разной окраской семян в условиях длительного избыточного увлажнения почвы.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали сосняки кустарничково-сфагновые на болотных верховых торфяных почвах северной тайги. В таких сосняках торф, как правило, сфагновый или пушице-сфагновый, низкой степени разложения. Он имеет кислую реакцию среды (рН солевой суспензии – 2,6–3,2), высокую обменную и гидролитическую кислотность, очень низкую степень насыщенности основаниями (11–14 %). Содержание золы в верхнем торфе составляет 2–4 %. У торфа верхних горизонтов низкая объемная масса, высокая полевая влажность, близкая к полной влагоемкости (90–94 %). Лесоводственно-геоботаническое описание и таксационную характеристику древостоев давали общепринятыми методами [2, 17, 18, 25].

Для определения биохимических признаков у 10 деревьев каждой из форм сосны, выделенных по цвету оболочек семян согласно нашей классификации (светлые: бежевые, белые; темные: темно-серые, серо-бурые, бурые), в районе устья р. Северной Двины в 2019 г. отбирали образцы хвои с 1-летних побегов. Для изучения сезонной динамики разных показателей отбор образцов хвои производили в разные календарные периоды. В лабораторных условиях спектрофотометрическим методом определяли содержание в 1-летней хвое фотосинтетических пигментов [20], свободного пролина [33], водорастворимых белков по методу V.F. Kalb, R.W. Bernlohr [3], аскорбиновой кислоты [8]. Долю хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) рассчитывали по формуле [43]. Определяли содержание антоцианов [16], рН гомогената хвои [5], активность пероксидазы [4].

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что на протяжении всей жизни сосны окраска ее семян не изменяется [19]. Цвет оболочки и интенсивность окраски семян передаются по наследству потомству. Эти формы представляют собой сложный конгломерат различных генотипов, и поэтому не следует во всех случаях ожидать наличия четких корреляций между окраской семян и другими признаками и свойствами деревьев [13]. Согласно полученным нами результатам [26], в период вегетации динамика содержания фотосинтетических пигментов зависит от мете-

орологических факторов и сроков прохождения у деревьев фенологических фаз. В ряде работ сообщалось об уменьшении фонда зеленых пигментов в результате окислительной деградации части хлорофилла в листьях в неблагоприятный период года [14, 32, 41]. Пониженная среднемесячная температура в июле 2019 г. (13,5 °С) по сравнению со средней многолетней (15,6 °С) негативно отразилась на синтезе зеленых пигментов. Так, у формы сосны со светлым цветом семян содержание хлорофилла *a* и сумма зеленых пигментов в июле были существенно меньше, чем в сентябре (рис. 1).

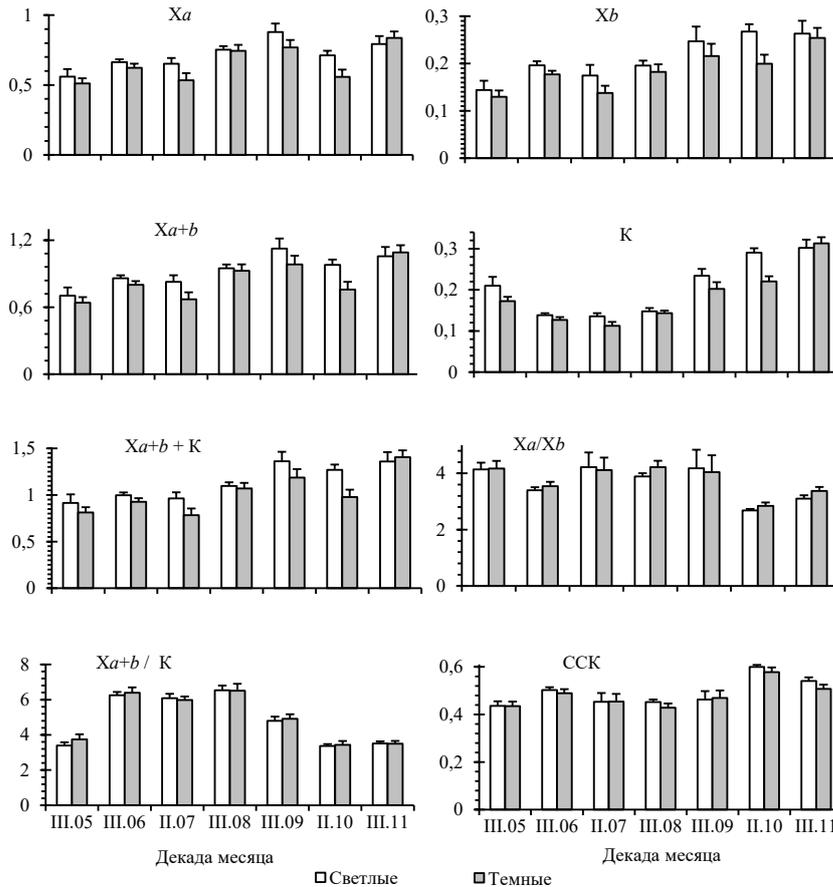


Рис. 1. Сезонная динамика содержания фотосинтетических пигментов (среднее значение с ошибкой) в 1-летней хвое у форм сосны с разным цветом семян: *Xa*, *Xb*, *K* – содержание хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов соответственно, мг · г⁻¹ воздушно-сухой массы; *CCK* – доля хлорофиллов светособирающего комплекса

Fig. 1. The seasonal dynamics of the photosynthetic pigment content (average value with error) in 1-year-old needles of pine forms with different seed colours: *Xa*, *Xb*, *K* – content of chlorophylls *a* and *b* and carotenoids, respectively, mg · g⁻¹ of air-dry weight; *CCK* – proportion of chlorophylls of the light-harvesting complex

Содержание хлорофилла *b* в хвое этой формы в июле существенно ниже, чем в октябре и ноябре. У сосны с темными семенами хлорофилла *a* и хлорофиллов *a* и *b* в сумме существенно меньше по сравнению с показателями августа, сентября и ноября. Концентрация хлорофилла *b* в июле была значительно ниже, чем в сентябре и ноябре. Хлорофилла *a*, *b* и хлорофиллов *a* и *b* в сово-

купности у сосны со светлым цветом семян в период с августа по ноябрь существенно больше по сравнению с уровнем в мае. У формы с темными семенами содержание хлорофилла a и сумма хлорофиллов a и b в июне, августе, сентябре и ноябре ощутимо больше, чем в мае. Количество хлорофилла b с августа по ноябрь у этой формы существенно превышает его содержание в мае (табл. 1).

Таблица 1

Достоверность различий показателей фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвои за календарные периоды у сосны с разным цветом семян (значения t -критерия Стьюдента, $t_{0,05} = 2,26$)
The significance of differences in the indices of the photosynthetic pigment complex of annual needles over calendar periods in pine trees with different seed colours (Student's t -test value, $t_{0,05} = 2,26$)

Сравниваемые периоды (декады месяцев)	X_a	X_b	X_{a+b}	K	$X_{a+b} + K$	X_a/X_b	X_{a+b}/K	ССК	
<i>Форма со светлыми семенами</i>									
III.05	III.06	1,79	2,44	1,99	3,26	0,86	2,82	10,76	2,93
	II.07	1,36	1,03	1,30	3,27	0,43	0,13	8,77	0,42
	II.08	3,24	2,31	3,02	2,72	1,80	0,95	9,62	0,75
	III.09	3,95	2,80	3,66	0,90	3,23	0,06	4,72	0,67
	II.10	2,41	4,95	3,16	3,33	3,29	5,95	0,12	7,71
	III.11	2,99	3,57	3,19	3,10	3,24	3,88	0,49	4,25
III.06	II.07	0,24	0,90	0,50	0,28	0,49	1,52	0,51	1,27
	II.08	2,75	0,06	2,03	0,95	1,96	3,11	0,86	3,13
	III.09	3,40	1,58	2,86	5,60	3,40	1,17	4,73	1,06
	II.10	1,27	4,10	2,21	12,69	4,27	6,15	13,12	6,45
	III.11	2,16	2,37	2,26	7,79	3,41	1,90	11,92	1,96
II.07	II.08	2,09	0,84	1,76	1,05	1,73	0,61	1,21	0,03
	III.09	3,12	1,89	2,79	5,46	3,26	0,04	3,75	0,19
	II.10	1,14	3,43	2,01	11,67	3,54	2,92	10,11	3,87
	III.11	2,02	2,53	2,25	7,64	3,27	2,07	9,31	2,19
III.08	III.09	1,94	1,57	1,86	4,72	2,40	0,44	4,81	0,29
	II.10	0,98	3,89	0,54	10,41	2,51	9,40	10,90	10,68
	III.11	0,65	2,34	1,20	7,01	2,40	4,70	10,15	4,75
III.09	II.10	2,44	0,60	1,45	2,83	0,77	2,28	5,55	3,77
	III.11	1,04	0,40	0,57	2,57	0,02	1,62	4,86	2,03
II.10	III.11	1,24	0,14	0,80	0,50	0,76	3,20	0,83	3,30
<i>Форма с темными семенами</i>									
III.05	III.06	2,36	3,06	2,63	3,62	1,68	2,00	6,29	2,14
	II.07	0,38	0,41	0,40	4,19	0,31	0,10	6,33	0,53
	II.08	4,09	2,54	3,74	2,37	3,13	0,13	5,64	0,23
	III.09	3,94	2,96	3,72	1,54	3,49	0,19	3,03	0,94
	II.10	0,76	2,98	1,38	2,94	1,73	4,44	0,86	5,19
	III.11	5,56	4,95	5,53	7,72	6,34	2,60	0,74	2,80
III.06	II.07	1,52	2,31	1,82	1,25	1,77	1,22	1,13	0,97
	II.08	2,32	0,30	1,89	1,81	2,01	2,44	0,23	2,51
	III.09	2,37	1,44	2,17	4,27	2,63	0,81	3,69	0,57
	II.10	1,09	1,09	0,54	6,60	0,59	3,54	7,86	3,41
	III.11	3,96	3,42	4,01	11,43	5,71	0,80	8,43	0,75

Окончание табл. 1

Сравниваемые периоды (декады месяцев)	X_a	X_b	X_{a+b}	K	$X_{a+b} + K$	X_a/X_b	X_{a+b}/K	ССК	
II.07	II.08	3,16	2,03	3,01	2,72	3,08	0,20	1,19	0,71
	II.09	3,17	2,60	3,15	4,75	3,49	0,10	3,25	0,33
	II.10	0,34	2,52	0,93	6,85	1,84	2,77	8,53	3,29
	II.11	4,47	4,45	4,71	11,34	6,04	1,59	9,73	1,46
III.08	II.09	0,35	1,10	0,60	3,38	1,07	0,27	3,37	1,13
	II.10	2,76	0,69	1,87	5,54	0,93	5,28	6,80	5,66
	II.11	1,49	2,71	1,91	10,57	3,50	3,14	7,08	3,19
III.09	II.10	2,82	0,51	2,17	0,88	1,73	1,96	4,39	2,92
	II.11	0,98	1,14	1,07	5,02	1,86	1,08	4,72	1,07
II.10	II.11	4,07	1,91	3,53	4,77	3,95	2,88	0,26	2,66

Примечание: $t_{0,05}$ – значение критерия Стьюдента на 5 %-м уровне значимости.

Повышенная температура воздуха в сентябре (7,9 °С) способствовала накоплению хлорофилла в этот период, что, однако, могло отрицательно отразиться на закаливании сосны при подготовке к перезимовке. Предполагается [23], что при сезонном снижении температуры на ранних стадиях закаливания падение уровня хлорофилла способствует уменьшению количества поглощенной световой энергии.

Антиоксидантная функция каротиноидов заключается в том, что они способны предотвратить повреждения, вызываемые образованием триплетного хлорофилла и синглетного кислорода [12, 38]. Согласно данным [27–29], содержание каротиноидов в хвое разных форм сосны увеличивается осенью, после окончания активной вегетации. У форм сосны с разным цветом семян содержание каротиноидов в хвое осенью больше по сравнению с летним сезоном. Их защитная роль осенью повышается. Пониженная концентрация каротиноидов в летний сезон связывается с их усиленным расходом на поддержание фотохимической роли хлорофилла a при стрессовом воздействии [46].

В условиях сезонного климата функционирование фотозащитных механизмов сопровождается выраженными изменениями количественного и качественного составов фотосинтетических пигментов [22, 32, 48]. Общеизвестно [31], что с увеличением географической широты происходит уменьшение высоты солнцестояния, что приводит к снижению уровня солнечной радиации и изменению соотношения спектральных потоков. Показано [41], что вдоль широтного градиента увеличивается соотношение хлорофиллов a и b и снижается соотношение суммы хлорофиллов a и b и каротиноидов. Это свидетельствует о том, что адаптация пигментного аппарата растений идет путем трансформации ССК. Насыщение почвы водой вокруг корней растений наиболее сильно воздействует на их ССК [11]. Повышение соотношений хлорофиллов a и b и суммы хлорофиллов a и b и каротиноидов указывает на активацию защитных систем сосны [10, 26, 28]. По нашим данным, в период весеннего развития и начала роста побегов отношение суммы хлорофиллов к содержанию каротиноидов значительно меньше по сравнению с этим показателем в летний период и в период теплого сентября. Хлорофилл b находится в ССК фотосистемы II (ФС II), поэтому изменение соотношения хлорофилла a и b может быть связано с изменением ее функционирования [34]. Минимум этого показателя в ходе исследования мы наблюдали в октябре–ноябре.

Доля хлорофиллов, локализованных в ССК хвои, у форм сосны с разным цветом семян в среднем по месяцам (с мая по ноябрь) колеблется в пределах

43–60 %, однако различия этого показателя в разные периоды незначительны. Диапазон колебаний ССК хлоропластов связан с адаптацией фотосинтетического аппарата деревьев разных форм к световым условиям высоких широт и другим экологическим факторам.

Выявлено сходство сезонной изменчивости показателей фотосинтетического пигментного комплекса у сосны со светлыми и темными семенами. Однако в октябре–ноябре это сходство у разных форм сосны нарушается. У формы с темными семенами наблюдается существенное увеличение содержания хлорофилла *a*, суммы хлорофиллов *a* и *b*, содержания каротиноидов, суммы фотосинтетических пигментов, соотношения хлорофиллов *a* и *b*, ССК хлоропластов в ноябре по сравнению с октябрём. У сосны со светлой окраской семян в ноябре существенно повышается по сравнению с октябрём только соотношение хлорофиллов *a* и *b*. Однофакторный дисперсионный анализ подтверждает достоверное влияние сезонной изменчивости на показатели фотосинтетического пигментного комплекса у форм сосны (табл. 2).

Таблица 2

Результаты однофакторного дисперсионного анализа сезонного влияния на биохимические показатели хвои сосны с разным цветом семян ($F_{0,05} = 2,25$)
The results of a one-way analysis of variance of the seasonal influence on the biochemical parameters of pine needles with different seed colours ($F_{0,05} = 2,25$)

Показатель	Форма со светлыми семенами			Форма с темными семенами		
	F	η^2	s_{η^2}	F	η^2	s_{η^2}
Xa	5,612	0,348	0,062	8,265	0,444	0,054
Xb	5,259	0,334	0,063	6,077	0,370	0,061
Xa+b	5,175	0,330	0,064	7,741	0,428	0,055
K	24,749	0,702	0,028	36,244	0,778	0,021
Xa+b + K	6,452	0,381	0,059	10,295	0,499	0,048
Xa/Xb	3,191	0,233	0,073	2,392	0,188	0,079
Xa+b/K	50,501	0,828	0,016	25,535	0,712	0,028
ССК	6,976	0,399	0,057	4,778	0,316	0,066
АП	4,306	0,291	0,068	3,012	0,223	0,074
АК	43,387	0,805	0,019	36,095	0,775	0,021
pH	12,905	0,551	0,043	6,343	0,377	0,059
Б	1,792	0,146	0,081	1,488	0,124	0,083
П	7,795	0,426	0,055	4,926	0,319	0,065
А	10,354	0,497	0,048	15,115	0,590	0,039

Примечание: F – критерий Фишера; $F_{0,05}$ – значение F на 5%-м уровне значимости; η^2 – сила влияния фактора; s_{η^2} – ошибка η^2 ; АП – активность пероксидазы, усл. ед.; АК – содержание аскорбиновой кислоты, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ воздушно-сухой массы; Б – содержание водорастворимых белков, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ воздушно-сухой массы; П – содержание пролина, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ воздушно-сухой массы; А – концентрация антоцианов, %.

В октябре содержание хлорофилла *a*, *b*, сумма хлорофиллов *a* и *b*, содержание каротиноидов и сумма фотосинтетических пигментов у сосны со светлыми семенами существенно больше по сравнению с формой с темным цветом семян (табл. 3). Однофакторный дисперсионный анализ подтверждает достоверное влияние фактора формы на эти показатели в октябре на 5%-м уровне значимости ($F = 6,61–17,81$; $F_{0,05} = 4,45$).

Таблица 3

Достоверность различий показателей фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвои форм сосны с разным цветом семян (значения t-критерия Стьюдента, $t_{0,05} = 2,26$)

The significance of differences in the indices of the photosynthetic pigment complex of 1-year-old needles of pine forms with different seed colours (Student's t-test value, $t_{0,05} = 2,26$)

Декада месяца	X_a	X_b	X_{a+b}	K	$X_{a+b} + K$	X_a/X_b	X_{a+b}/K	ССК
III.05	0,76	0,60	0,72	1,58	0,94	0,08	1,02	0,05
III.06	1,11	1,70	1,37	1,37	1,45	0,76	0,40	0,63
II.07	1,81	1,37	1,80	1,93	1,84	0,15	0,34	0,02
II.08	0,17	0,69	0,33	0,39	0,36	1,28	0,05	1,17
III.09	1,38	0,77	1,20	1,39	1,27	0,16	0,33	0,13
II.10	2,52	2,79	2,64	4,20	3,02	1,20	0,25	0,99
III.11	0,61	0,27	0,33	0,45	0,37	1,51	0,02	1,41

В октябре 2019 г. количество выпавших осадков (99 мм) было значительно выше среднегогодового показателя для этого месяца (63 мм), что способствовало затоплению корневой системы сосны поверхностными водами с низким содержанием кислорода. Как следствие, наблюдалось существенное снижение содержания хлорофилла a по сравнению с сентябрем у сосны и со светлыми, и с темными семенами. При этом у формы с темным цветом семян по сравнению с сентябрем существенно уменьшилось также суммарное содержание зеленых пигментов. Вероятно, сосна с темной окраской семян сильнее реагирует на действие стрессовых факторов при большом количестве осадков в указанный период.

Антоцианы – пигменты из группы водорастворимых флавоноидов, содержатся почти во всех высших, а также низших растениях [37]. Нами не установлены достоверные различия содержания антоцианов в 1-летней хвое между формами со светлой и темной окраской семян на 5%-м уровне значимости t-критерия. У обеих форм наблюдаются существенные различия содержания антоцианов в конце весны и летом, с одной стороны, и осенью – с другой (рис. 2).

В мае–августе их концентрация в хвое значительно меньше по сравнению с сентябрем–ноябрем у форм как со светлой окраской семян, так и с темной (табл. 4).

Известно [47], что антоцианы непосредственно участвуют в детоксикации свободных радикалов, смягчают действие ультрафиолета и обладают антиоксидантной активностью в стрессовых условиях. Этим, вероятно, можно объяснить их значительное накопление осенью. Проведенный однофакторный дисперсионный анализ не выявил достоверного влияния фактора формы на содержание антоцианов в хвое на 5%-м уровне значимости F-критерия. Однако наблюдается зависимость этого показателя у обеих форм от сезонной изменчивости.

Ранее показано [6], что рН хвои сосны обыкновенной зависит от ее возраста и времени года: показатель изменчив во времени и относительно постоянен в период зимнего покоя. В период вегетации рН отражает содержание в хвое органических кислот: чем их меньше, тем выше рН. С возрастом у хвои снижается содержание воды и органических кислот, увеличиваются рН клеток и количество сахаров в период вегетации. Достоверные различия между рН гомогената 1-летней хвои для форм с разной окраской семян нами не выявлены (t-критерий, $p > 0,05$). В летние месяцы 2019 г. рН гомогената 1-летней хвои у форм сосны существенно ниже по сравнению с маем и осенью. Зависимость рН хвои от сезона подтверждается однофакторным дисперсионным анализом.

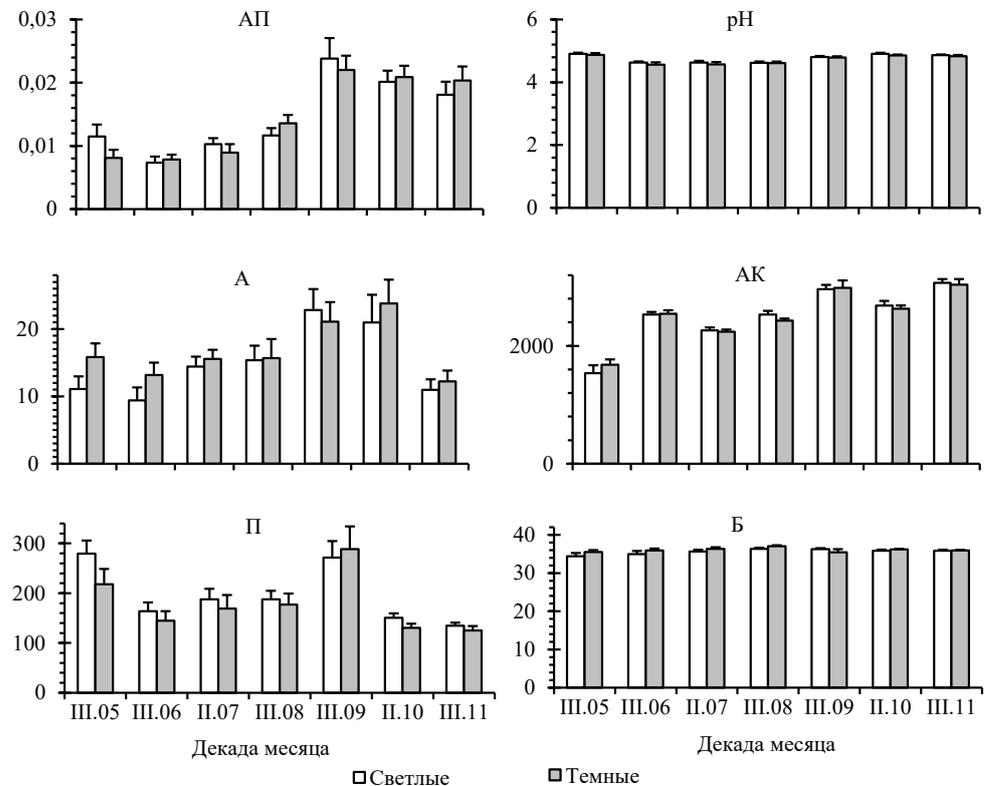


Рис. 2. Сезонная динамика биохимических показателей (среднее значение с ошибкой) 1-летней хвои у форм сосны с разным цветом семян (обозначения – см. табл. 2)

Fig. 2. The seasonal dynamics of the biochemical parameters (average value with error) of 1-year-old needles in pine forms with different seed colours (for legend – see Table 2)

Помимо оксидазной функции в процессах биологического окисления, пероксидазе принадлежит активная роль в общем метаболизме растительной клетки. Пероксидаза рассматривается как приспособительный фермент при кислородном голодании у растений [40]. Активность пероксидазы быстро повышается при любых воздействиях. Нами не выявлены достоверные различия пероксидазной активности между формами со светлыми и темными семенами на принятых уровнях значимости *t*-критерия. Наибольшая пероксидазная активность в хвое обеих форм в 2019 г. отмечается в сентябре–октябре, а наименьшая – в предзимний период (конец ноября), когда замедляются физиолого-биохимические процессы. У этих форм различия активности пероксидазы между сентябрем–октябрем и концом ноября достоверны. Однофакторный дисперсионный анализ подтверждает достоверное влияние сезонной изменчивости на активность пероксидазы. Усиление активности пероксидазы осенью можно рассматривать как защитную реакцию разных форм сосны, препятствующую развитию неконтролируемых окислительных процессов при ограниченном снабжении органов кислородом.

Таблица 4

Достоверность различий содержания стрессовых метаболитов, рН и активности пероксидазы 1-летней хвои за календарные периоды у сосны с разным цветом семян (значения t-критерия Стьюдента, $t_{0,05} = 2,26$)

The significance of differences in the content of stress metabolites, pH and peroxidase activity of 1-year-old needles over calendar periods in pine trees with different seed colours (Student's t-test value, $t_{0,05} = 2,26$)

Сравниваемые периоды (декады месяцев)	АП	АК	рН	Б	П	А	
<i>Форма со светлыми семенами</i>							
III.05	III.06	0,63	7,04	5,23	0,45	3,64	1,93
	II.07	1,40	5,14	4,39	1,25	2,72	0,55
	II.08	1,50	6,73	5,12	2,14	2,92	0,08
	III.09	3,21	9,35	2,11	2,10	0,18	3,30
	II.10	2,18	7,46	0,00	1,69	4,63	3,33
	III.11	0,05	10,38	1,01	1,70	5,36	2,37
III.06	II.07	2,08	3,97	0,13	0,70	0,88	2,20
	II.08	2,07	0,01	0,09	1,54	0,98	2,84
	III.09	3,65	4,94	3,82	1,49	2,88	4,89
	II.10	2,54	1,74	5,32	1,07	0,66	6,37
	III.11	0,63	6,84	5,05	1,09	1,54	4,75
II.07	II.08	0,36	3,33	0,20	1,21	0,00	0,90
	III.09	2,42	7,88	3,06	1,14	2,14	4,03
	II.10	1,49	4,62	4,45	0,48	1,63	4,93
	III.11	1,62	10,06	4,05	0,49	2,42	3,47
III.08	III.09	1,95	4,40	3,73	0,16	2,26	3,55
	II.10	1,20	1,55	5,20	1,07	1,93	4,01
	III.11	1,66	5,97	4,90	1,12	2,93	2,74
III.09	II.10	0,35	2,56	2,16	1,01	3,55	1,00
	III.11	3,38	1,11	1,38	1,07	4,09	1,50
II.10	III.11	2,26	3,82	1,04	0,00	1,46	0,75
<i>Форма с темными семенами</i>							
III.05	III.06	0,98	7,98	3,25	0,63	2,04	0,18
	II.07	0,12	5,77	3,20	1,29	1,20	0,45
	II.08	0,05	7,64	3,43	2,77	1,09	2,94
	III.09	1,48	8,48	1,20	0,05	1,28	5,33
	II.10	1,96	9,03	0,30	1,30	2,77	5,84
	III.11	1,40	10,38	0,57	0,76	2,92	4,75
III.06	II.07	1,04	4,37	0,11	0,63	0,75	0,71
	II.08	0,75	1,69	0,55	2,07	1,11	3,68
	III.09	2,30	3,20	2,57	0,52	2,90	5,90
	II.10	2,67	1,09	3,52	0,49	0,67	6,73
	III.11	0,37	4,43	3,19	0,08	0,92	5,28
II.07	II.08	0,04	3,61	0,43	1,48	0,22	2,43
	III.09	1,73	5,75	2,50	0,99	2,25	4,95
	II.10	2,18	6,03	3,48	0,37	1,38	5,37
	III.11	1,58	7,89	3,14	1,01	1,56	4,37
III.08	III.09	1,33	4,31	2,66	1,90	2,19	3,20
	II.10	1,80	3,14	4,07	3,25	1,99	3,29
	III.11	1,06	6,04	3,55	4,22	2,19	2,60
III.09	II.10	0,59	2,61	1,23	0,90	3,41	0,38
	III.11	2,67	0,34	0,81	0,55	3,51	0,52
II.10	III.11	2,99	3,74	0,39	1,46	0,45	0,20

Пролин накапливается в органах многих растений в ответ на экологический стресс [45]. Нами не установлены достоверные различия содержания пролина в 1-летней хвое между формами с разной окраской семян ($t < t_{0,05}$). Сезонная динамика концентрации пролина у сосны со светлыми и темными семенами схожа. Содержание пролина у обеих форм в мае 2019 г. существенно больше, чем в октябре–ноябре. Наибольшее содержание пролина отмечено в сентябре у сосны как со светлыми, так и с темными семенами, что существенно превышает этот показатель в октябре и ноябре. Меньше всего концентрация пролина в хвое обеих форм была в ноябре, по-видимому в связи с замедлением процессов метаболизма перед зимой. Методом однофакторного дисперсионного анализа подтверждено существенное влияние сезонной изменчивости на концентрацию пролина в 1-летней хвое разных форм сосны. Общие тенденции в сезонной динамике этого показателя не выявлены. С учетом ранее полученных результатов [26–29] можно сделать вывод, что содержание пролина в хвое – очень изменчивый показатель, резко реагирующий на действие стрессовых факторов.

Нами не установлены достоверные различия концентрации водорастворимых белков между формами с разным цветом семян при критических значениях t -критерия. Наибольшая концентрация водорастворимых белков в хвое у рассматриваемых форм наблюдалась в августе. Существенные различия содержания водорастворимых белков установлены между маем и августом, августом и октябрём, августом и ноябрём у сосны с темными семенами – в августе оно заметно выше. У сосны со светлыми семенами различия этого показателя между месяцами не достоверны на 5%-м уровне значимости t -критерия. Август 2019 г. был холоднее (11,4 °С) обычного (13,6 °С) и дождливее (103 против 67 мм). Вероятно, это стало одной из причин повышения содержания водорастворимых белков в данный период, поскольку плохие погодные условия еще более ухудшают кислородный режим почвы и усиливают гипоксию корневой системы. Учитывая значительный рост показателя у сосны с темной окраской семян, можно сказать, что эта форма сильнее реагирует на действие факторов внешней среды. По увеличению уровня водорастворимых белков правомерно судить об активации защитных реакций сосны [10].

Аскорбиновая кислота занимает доминирующее место во внутриклеточной и внеклеточной защите, являясь потенциальным донором атомов водорода и электронов, используемых для восстановления пероксида водорода или некоторых свободнорадикальных продуктов. Нами не выявлены достоверные различия содержания аскорбиновой кислоты в 1-летней хвое между формами сосны с разным цветом семян на 5%-м уровне значимости t -критерия. Наименьшее содержание аскорбиновой кислоты у обеих форм сосны в 2019 г. наблюдалось в мае. Установлены существенные различия концентрации аскорбиновой кислоты между маем и другими летними и осенними месяцами у разных форм. Различия этого показателя также существенны между большинством других месяцев за наблюдаемый нами период. Отмечены колебания содержания аскорбиновой кислоты в течение исследованного периода. Общий тренд градиента этого показателя у сосны со светлой и темной окраской семян и в разные календарные периоды отсутствует. Методом однофакторного дисперсионного анализа установлено достоверное влияние сезона на данный параметр.

Заключение

Исследованы адаптивные изменения биохимических показателей у форм сосны с разным цветом семян в условиях длительного избыточного увлажнения почв в северных широтах европейской части России. Показано влияние сезонной изменчивости на динамику фотосинтетического пигментного комплекса разных форм сосны. Повышенная температура воздуха в сентябре способствовала накоплению хлорофилла, что могло негативно отразиться на закаливании деревьев этих форм сосны при подготовке к зимнему сезону. Вместе с тем большее количество атмосферных осадков в октябре 2019 г. способствовало повышению дефицита кислорода в корнеобитаемой зоне торфяной почвы и привело к существенному снижению суммы зеленых пигментов у сосны с темным цветом семян. Вероятно, сосна с темной окраской семян сильнее реагирует на действие стрессовых факторов при большом количестве осадков в этот период.

У разных форм сосны наблюдается снижение соотношения хлорофиллов *a* и *b* в октябре–ноябре, которое связано с изменением функционирования фотосистемы II. Наибольшая доля хлорофиллов, локализованных в светособирающих комплексах хлоропластов, у сосны отмечена осенью, при относительно коротком световом дне, что свидетельствует о негативном влиянии экологических факторов на сосну в этот период. Доля хлорофиллов в светособирающих комплексах в среднем по месяцам (с мая по ноябрь) у форм с разным цветом семян колеблется в пределах 43–60 %, что связано с адаптацией фотосинтетического аппарата деревьев разных форм к световым условиям высоких широт и другим экологическим факторам.

Содержание каротиноидов в хвое разных форм повышается осенью после окончания активной вегетации, когда усиливается их защитная роль. Пониженная концентрация каротиноидов в летний сезон, вероятно, вызвана их интенсивным расходом на поддержание фотосинтетической роли хлорофилла *a* в условиях длительного избыточного увлажнения почв. Концентрация антоцианов в хвое разных форм в конце весны и в летний период ниже по сравнению с осенним периодом, что указывает на повышение антиоксидантной активности осенью в условиях длительного избыточного увлажнения почвы. Показатель рН 1-летней хвои у разных форм летом существенно ниже, чем в конце весны и осенью. Наибольшая пероксидазная активность хвои наблюдается осенью, в сентябре–октябре, что можно рассматривать как защитную реакцию разных форм на воздействие стрессовых факторов, препятствующую развитию неконтролируемых окислительных процессов при ограниченном снабжении органов кислородом в условиях длительного избыточного увлажнения почвы.

Содержание пролина в хвое – очень изменчивый показатель, резко реагирующий на действие стрессовых факторов. Характер изменчивости содержания пролина различен, общие закономерности в сезонной динамике этого показателя не выявлены. Как известно, реакции данного показателя на действие факторов внешней среды имеют неспецифический характер. В период с мая по ноябрь наблюдается тенденция более высокого содержания водорастворимых белков в хвое у сосны с темной окраской семян по сравнению с сосной со светлыми семенами. Особенно это проявляется у формы с темными семенами при повышении количества осадков в конце августа, что еще более ухудшает кислородный режим почвы и усиливает гипоксию корневой системы.

При холодной дождливой погоде в конце лета сосна с темным цветом семян сильнее реагирует на действия стрессовых факторов. Содержание аскорбиновой кислоты в хвое деревьев сосны в конце весны существенно ниже по сравнению с летним и осенним сезонами. Повышение этого показателя летом и, особенно, осенью свидетельствует о развитии защитных механизмов у сосны для предотвращения окислительного стресса при неблагоприятных метеоусловиях.

Сезонная изменчивость показателей фотосинтетического пигментного комплекса, кислотности, оксидазной активности и содержания стрессовых метаболитов в хвое разных форм сосны отражает их адаптацию и обеспечивает устойчивость сосновых лесов в условиях постоянного избыточного увлажнения почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абдуллина Д.С., Петрова И.В. Дифференциация популяций сосны обыкновенной по фенотипическим признакам на северо-восточном пределе ареала // Аграр. вестн. Урала. 2012. № 9(101). С. 34–36.
Abdullina D.S., Petrova I.V. Differentiation of Scots Pine Populations by Phenotypic Traits at the North-Eastern Areal Boundary. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2012, no. 9(101), pp. 34–36. (In Russ.).
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. 5th ed., enlarged. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).
3. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы / сост. М.Г. Кусакина, В.И. Суворов, А.А. Чудинова. Пермь, 2012. 148 с.
“Biochemistry”. *Laboratory Works: Enlarged Tutorial*. Comp. by M.G. Kusakina, V.I. Suvorov, A.A. Chudinova. Perm', 2012. 148 p. (In Russ.).
4. Бояркин А.Н. Быстрый метод определения активности пероксидазы // Биохимия. 1951. Т. 16, вып. 4. С. 352–357.
Boyarkin A.N. A Fast Technique for Determining Peroxidase Activity. *Biokhimiya*, 1951, vol. 16, iss. 4, pp. 352–357. (In Russ.).
5. Васфилов С.П. Использование pH гомогената хвои для оценки воздействия диоксида серы на сосну // Экология. 1995. № 5. С. 347–350.
Vasfilov S.P. Using pH of Pine Needle Homogenate to Assess the Impact of Sulfur Dioxide on Pine. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 1995, no. 5, pp. 347–350. (In Russ.).
6. Васфилов С.П. Возрастная изменчивость хвои в кроне сосны обыкновенной // Лесоведение. 2014. № 6. С. 41–48.
Vasfilov S.P. Age Variability of Needles in Scots Pine Crown. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2014, no. 6, pp. 41–48. (In Russ.).
7. Видякин А.И. Фены лесных древесных растений: выделение, масштабирование и использование в популяционных исследованиях (на примере *Pinus sylvestris* L.) // Экология. 2001. № 3. С. 197–202.
Vidyakin A.I. Phenotypes of Forest Woody Plants: Identification, Scaling and Use in Population Studies (by the Example of *Pinus sylvestris* L.). *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2001, no. 3, pp. 197–202. (In Russ.).
8. Воскресенская О.Л., Алябышева Е.А., Половникова М.Г. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1. Йошкар-Ола: Марийск. гос. ун-т, 2006. 107 с.
Voskresenskaya O.L., Alyabysheva E.A., Polovnikova M.G. *Enlarged Tutorial on Bioecology: Part 1*. Yoshkar-Ola, Mari State University Publ., 2006. 107 p. (In Russ.).

9. Зарубина Л.В., Хамитов Р.С. Сезонный рост сосны обыкновенной на заболоченных почвах Севера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 86–100.
- Zarubina L.V., Khamitov R.S. Seasonal Growth of Scots Pine under the Conditions of Water-Logged Soils of the North. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 86–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-86-100>
10. Калугина О.В., Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биохимическая адаптация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) к техногенному загрязнению // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 1. С. 98–110. <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20180109>
- Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Technogenic Pollution. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2018, no. 1, pp. 98–110. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20180109>
11. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 462 с.
- Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 462 p. (In Russ.).
12. Красновский А.А. Синглетный молекулярный кислород. Механизмы образования и пути дезактивации в фотосинтетических системах // Биофизика. 1994. Т. 39, № 2. С. 236–250.
- Krasnovskiy A.A. Singlet Molecular Oxygen. Mechanisms of Formation and Pathways of Deactivation in Photosynthetic Systems. *Biofizika* = Biophysics, 1994, vol. 39, no. 2, pp. 236–250. (In Russ.).
13. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae* на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
- Mamaev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (by the Example of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p. (In Russ.).
14. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С., Шерстнева О.А., Буболо Л.С., Зубкова Е.К. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата у зимневегетирующих хвойных растений в различные сезоны года // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 5. С. 672–681.
- Maslova T.G., Mamushina N.S., Sherstneva O.A., Bubolo L.S., Zubkova E.K. Seasonal Structural and Functional Changes in the Photosynthetic Apparatus of Evergreen Conifers. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2009, vol. 56, pp. 607–615. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1021443709050045>
15. Молотков П.И., Патлай И.Н., Давыдова Н.И., Щепотьев Ф.Л., Ирошников А.И., Мосин В.И., Пирагс Д.М., Милютин Л.И. Селекция лесных пород. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 224 с.
- Molotkov P.I., Patlaj I.N., Davydova N.I., Shchepot'ev F.L., Iroshnikov A.I., Mosin V.I., Pirags D.M., Milyutin L.I. *Selection of Forest Species*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 224 p. (In Russ.).
16. Муравьева Д.А., Бубенчикова В.Н., Беликов В.В. Спектрофотометрическое определение суммы антоцианов в цветках василька синего // Фармация. 1987. Т. 36, № 5. С. 28–29.
- Murav'eva D.A., Bubenchikova V.N., Belikov V.V. Spectrophotometric Determination of the Amount of Anthocyanins in Blue Cornflower Flowers. *Farmakologiya*, 1987, vol. 36, no. 5, pp. 28–29. (In Russ.).
17. Паршевников А.Л. Руководство по полевому исследованию лесных почв. Архангельск: АИЛиЛХ, 1974. 46 с.
- Parshevnikov A.L. *Guide to the Field Study of Forest Soils*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1974. 46 p. (In Russ.).

18. Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. Т. III. М.; Л.: Наука, 1964. 530 с.
Field Geobotany: vol. 3. Ed. by E.M. Lavrenko, A.A. Korchagin. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1964. 530 p. (In Russ.).
19. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 191 с.
Pravdin L.F. *Scots Pine. Variability, Intraspecific Taxonomy and Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 191 p. (In Russ.).
20. Практикум по физиологии растений / под ред. Н.Н. Третьякова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
Tutorial on Plant Physiology. Ed. by N.N. Tret'yakov. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 271 p. (In Russ.).
21. Путенихин В.П. Популяционная структура и сохранение генофонда хвойных видов на Урале: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2000. 48 с.
Putenikhin V.P. *Population Structure and Conservation of the Gene Pool of Coniferous Species in the Urals*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 2000. 48 p. (In Russ.).
22. Софронова В.Е., Антал Т.К., Дымова О.В., Головки Т.К. Фотозащитные механизмы в фотосистеме II *Ephedra monosperma* в период формирования морозоустойчивого состояния // Физиология растений. 2014. Т. 61, № 6. С. 798–807.
Sofronova V.E., Antal T.K., Dymova O.V., Golovko T.K. Photoprotective Mechanisms in Photosystem II of *Ephedra monosperma* during Development of Frost Tolerance. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2014, vol. 61, pp. 751–759. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1021443714060181>
23. Софронова В.Е., Дымова О.В., Головки Т.К., Чепалов В.А., Петров К.А. Адаптивные изменения пигментного комплекса хвои *Pinus sylvestris* при закаливании к низкой температуре // Физиология растений. 2016. Т. 63, № 4. С. 461–471.
Sofronova V.E., Dymova O.V., Golovko T.K., Chepalov V.A., Petrov K.A. Adaptive Changes in Pigment Complex of *Pinus sylvestris* Needles upon Cold Acclimation. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2016, vol. 63, pp. 433–442. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1021443716040142>
24. Судаchkova Н.Е. Состояние и перспективы изучения влияния стрессов на древесные растения // Лесоведение. 1998. № 2. С. 3–9.
Sudachkova N.E. Status and Prospects of Studying the Effect of Stress on Woody Plants. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1998, no. 2, pp. 3–9. (In Russ.).
25. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: АН СССР, 1961. 144 с.
Sukachev V.N., Zonn S.V. *Methodological Guidelines for Studying Forest Types*. Moscow, USSR Academy of Science Publ., 1961. 144 p. (In Russ.).
26. Тарханов С.Н., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Сезонная изменчивость биохимических показателей и поврежденность разных форм сосны обыкновенной в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 1. С. 5–12.
Tarkhanov S.N., Aganina Yu.E., Pakhov A.S. Seasonal Variability of Biochemical Characteristics and a Defect in the Needleless of Different Forms of *Pinus sylvestris* under Stress Conditions in the Northern Taiga. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-1-5-12>
27. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Адаптивные реакции морфологических форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) в стрессовых условиях северной тайги (на примере Северо-Двинского бассейна) // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 4. С. 425–437.
Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Adaptive Responses of Morphological Forms of Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Stressful Conditions of the Northern Taiga

(in the Northern Dvina Basin). *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2018, no. 4, pp. 425–437. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20180404>

28. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Адаптация и морфологическое состояние разных форм сосны в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги // Лесоведение. 2022. № 1. С. 72–84.

Tarkhanov S.N., Pinaevskaya Ye.A., Aganina Yu.Ye. Adaptation and Morphology of Various Forms of Scots Pine under the Conditions of a Constant Excessive Moisture in the Northern Taiga's Soils. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2022, no. 1, pp. 72–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821060103>

29. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аншуклова Ю.Е. Морфоструктурные особенности и изменчивость биохимических признаков форм *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в условиях избыточного увлажнения почв северной тайги // Растит. ресурсы. 2014. Т. 50, вып. 4. С. 567–578.

Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Anshukova Yu.E. Morphostructural Features and Variability of Biochemical Characters of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Forms under Conditions of Excessive Moisture of Soils in the Northern Taiga. *Rastitelnye resursy*, 2014, vol. 50, iss. 4, pp. 567–578. (In Russ.).

30. Чиркова Т.В. Метаболизм этанола и лактата в тканях древесных растений, различающихся по устойчивости к недостатку кислорода // Физиология растений. 1975. Т. 22, № 5. С. 952–958.

Chirkova T.V. Metabolism of Ethanol and Lactate in Tissues of Woody Plants Differing in Their Tolerance to Oxygen Deficiency. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 1975, vol. 22, no. 5, pp. 952–958. (In Russ.).

31. Шульгин И.А. Растение и солнце. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 251 с.

Shul'gin I.A. *Plant and Sun*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 251 p. (In Russ.).

32. Яцко Я.Н., Дымова О.В., Головки Т.К. Пигментный комплекс зимне- и вечнозеленых растений в подзоне средней тайги европейского Северо-Востока // Ботан. журн. 2009. Т. 94, № 12. С. 1812–1820.

Yatsko Ya.N., Dymova O.V., Golovko T.K. Pigment Complex of Winter- and Evergreen Plants in the Middle Taiga Subzone of the European North-East. *Botanicheskij Zhurnal*, 2009, vol. 94, no. 12, pp. 1812–1820. (In Russ.).

33. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*, 1973, vol. 39, pp. 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

34. Björkman O. Responses to Different Quantum Flux Densities. Physiological Plant Ecology I. *Encyclopedia of Plant Physiology*: vol. 12. Berlin, Heidelberg, Springer, 1981, pp. 57–107.

35. Black A.R., Subject J.R. Mechanisms of Stress-Induced Thermo- and Chemotolerances. *Stress Proteins. Induction and Functions*. Berlin, Springer, 1990, pp. 10–117.

36. Bohnert H.J., Nelson D.E., Jensen R.G. Adaptation to Environmental Stresses. *The Plant Cell*, 1995, vol. 7, iss. 7, pp. 1099–1111. <https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.1099>

37. Davies K.M., Schwinn K.E. Molecular Biology and Biotechnology of Flavonoid Biosynthesis. *Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*. London, CRC Press, 2006, pp. 143–218.

38. Edge R., Truscott G. Properties of Carotenoid Radicals and Excited States and Their Potential Role in Biological System. *Carotenoids, Physical, Chemical, and Biological Functions and Properties*. Landrum Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 2010, pp. 283–307.

39. Gatenby A.A., Donaldson G.K., Golubinoff P., LaRossa R.A., Lorimer G.H., Lubben T.H., Van Dyk T.K., Viitanen P.V. The Cellular Function of Chaperonins. *Stress Proteins*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1990, pp. 57–69. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75815-7_5

40. Gordon W.R., Henderson J.H. Isoperoxidases of (IAA Oxidase) Oxidase in Oat Coleoptiles. *Canadian Journal of Botany*, 1973, vol. 51, iss. 11, pp. 2047–2052. <https://doi.org/10.1139/b73-266>
41. Ivanov L.A., Ivanova L.A., Rochina D.A., Yudina P.K. Changes in the Chlorophyll and Carotenoid Contents in the Leaves of Steppe Plants along a Latitudinal Gradient in South Ural. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2013, vol. 60, no. 6, pp. 812–820. <https://doi.org/10.1134/S1021443713050075>
42. Levitt J. *Responses of Plants to Environmental Stresses. Vol. 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses*. New York, Academic Press, 1980. 497 p.
43. Lichenthaler 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)
44. Mohr Y., Shopfer P. *Plant Physiology*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1995. 629 p.
45. Roohi A., Nazish B., Nabgha-e-Amen, Malecha M., Waseem S. A Critical Review on Halophytes: Salt Tolerant Plants. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, vol. 5(33), pp. 7108–7118. <https://doi.org/10.5897/JMPRX11.009>
46. Scheer H. The Pigments. *Light-Harvesting Antennas in Photosynthesis*. Dordrecht, Springer, 2003, vol. 13, pp. 29–81. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2087-8_2
47. Smillie R.M., Hetherington S.E. Photoabatement by Anthocyanin Shields Photosynthetic Systems from Light Strees. *Photosynthetica*, 1999, vol. 36(3), pp. 451–463. <https://doi.org/10.1023/A:1007084321859>
48. Verhoeven A. Sustained Energy Dissipation in Winter Evergreens. *New Phytologist*, 2014, vol. 201, iss. 1, pp. 57–65. <https://doi.org/10.1111/nph.12466>

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

Научная статья

УДК 582.47:630*232.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-27-39

Укореняемость черенков хвойных видов дендрофлоры Прибайкалья

Е.Н. Киселева[✉], канд. с.-х. наук; ResearcherID: [JEP-1390-2023](https://orcid.org/0000-0002-4267-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4267-5829>

М.А. Раченко¹, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [J-4520-2018](https://orcid.org/0000-0001-7644-7771),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7644-7771>

А.М. Раченко², преподаватель; ResearcherID: [JYO-4456-2024](https://orcid.org/0000-0001-5568-4938),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5568-4938>

И.М. Мокшонов¹, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2518-9685>

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН, ул. Лермонтова, д. 132, г. Иркутск, Россия, 664033; elenasolya@mail.ru[✉], bigmks73@rambler.ru, mokshonovaira@mail.ru

²Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, пос. Молодежный, Иркутский р-н, Иркутская обл., Россия, 664038; ann_rachenko@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.23 / Одобрена после рецензирования 19.04.23 / Принята к печати 20.04.23

Аннотация. Активное развитие производства негативно сказывается на экологии. Ежегодно для нужд производства вырубается миллионы кубометров леса. Эти объемы необходимо восстанавливать, поэтому исследования в области возобновления лесов актуальны и важны. Цель данного исследования – оценка технологии укоренения хвойных пород деревьев при летнем черенковании. Рассмотрены различные сроки зеленого черенкования хвойных деревьев представителей семейства Pinaceae (*Pinus sylvestris* L., *Picea obovata* Ledeb., *Picea obovata* var. *coerulea* Malyshev, *Pinus sibirica* Du Tour). Черенки заготавливали с 3-й декады июня по конец июля. Черенкование осуществляли в разных условиях: в теплице с туманной установкой и климатической камере с ручным поливом. Использовали несколько способов подготовки черенков к посадке: с удалением хвои на нижней части черенка и без удаления. Испытываемые черенки перед посадкой обрабатывали препаратом корнеобразования «Корневин» (контрольный вариант – без обработки). В результате исследования определены оптимальные сроки черенкования хвойных пород деревьев для Прибайкалья – 3-я декада июня и июля. Установлен минимальный период укоренения черенков – 155 дней. Отмечено, что черенки, у которых хвоя на нижней части не удалялась, укоренялись быстрее. Доля укоренения у них выше на 10 %. Наилучшая укореняемость зафиксирована у черенков, полученных от растений *Picea obovata* Ledeb., *P. obovata* var. *coerulea* Malyshev – 22–30 %. Черенки от *Pinus sylvestris* L. и *P. sibirica* Du Tour имеют очень низкую долю укоренения – менее 1 %. Для определения качества укоренения были сняты биометрические показатели образованных корней. Мощными корнями характеризуются черенки, высаженные в 3-й декаде июня в культивационные гряды с регулируемым туманообразованием.

Ключевые слова: сосна, ель, черенки, черенкование, черенкование хвойных пород, сроки корнеобразования, корневая система, полив, искусственное лесовосстановление, Иркутская область

Благодарности: Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Биоаналитика» с использованием коллекций ЦКП «Биоресурсный центр» СИФИБР СО РАН, г. Иркутск.

© Киселева Е.Н., Раченко М.А., Раченко А.М., Мокшонов И.М., 2024

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

Для цитирования: Киселева Е.Н., Раченко М.А., Раченко А.М., Мокшоновна И.М. Укореняемость черенков хвойных видов дендрофлоры Прибайкалья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 27–39. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-27-39>

Original article

Rooting of the Cuttings of Coniferous Species of Dendroflora of the Baikal Region

Elena N. Kiseleva[✉], Candidate of Agriculture; ResearcherID: [JEP-1390-2023](https://orcid.org/0000-0002-4267-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4267-5829>

*Maksim A. Rachenko*¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [J-4520-2018](https://orcid.org/0000-0001-7644-7771),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7644-7771>

*Anna M. Rachenko*², Lecturer; ResearcherID: [JYO-4456-2024](https://orcid.org/0000-0001-5568-4938),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5568-4938>

*Irina M. Mokshonova*¹, Candidate of Agriculture;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2518-9685>

¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Lermontova, 132, Irkutsk, 664033, Russian Federation; elenasolya@mail.ru[✉], bigmks73@rambler.ru, mokshonovaira@mail.ru

²Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhnyj Settlement, Irkutsk District, Irkutsk Region, 664038, Russian Federation; ann_rachenko@mail.ru

Received on January 12, 2023 / Approved after reviewing on April 19, 2023 / Accepted on April 20, 2023

Abstract. The active development of production has a negative impact on the environment. Millions of cubic meters of forest are cut down annually for production needs. These volumes need to be restored. Therefore, research in the field of reforestation is relevant and important. The aim of this study has been to evaluate the technology of rooting coniferous trees during summer grafting. Various terms of green cuttings of coniferous trees of the Pinaceae family were considered, common representatives in the region (*Pinus sylvestris* L., *Picea obovata* Ledeb., *Picea obovata* var. *coerulea* Malyshev, *Pinus sibirica* Du Tour) have been considered. The cuttings have been harvested in four terms, starting from the 3rd ten-day-period of June to the end of July. The grafting has been carried out in different conditions: in a green house with a fog plant and a climate chamber with manual watering. Several methods have been used to prepare the cuttings for planting: with and without needle removing on the lower part of the cutting. Before planting, the tested cuttings have been treated with the root formation preparation “Kornevin” (control group – without treatment). As a result of the study, the optimal time for grafting coniferous trees for the Baikal region has been determined as the 3rd ten-day-period of June and July. The minimum rooting period for the cuttings has been figured out as 155 days. It has been noted that the cuttings whose lower part needles have not been removed, have taken root faster. Their rooting share is 10 % higher. The best rooting rate has been recorded in cuttings obtained from the plants *Picea obovata* Ledeb. and *P. obovata* var. *coerulea* Malyshev – 22–30%. The cuttings from *Pinus sylvestris* L. and *P. sibirica* Du Tour have a very low rooting share – less than 1 %. To determine the quality of rooting, biometric indicators of the formed roots have been obtained. The cuttings planted in the 3rd ten-day-period of June in cultivation beds with regulated fogging are characterized by powerful roots.



Keywords: pine, spruce, cuttings, grafting, coniferous species grafting, root formation time, root system, watering, artificial reforestation, the Irkutsk Region

Acknowledgements: The work was performed on the equipment of the Bioanalytics Center for Collective Use and used the collections of the Bioresource Center of Collective Use of the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

For citation: Kiseleva E.N., Rachenko M.A., Rachenko A.M., Mokshonova I.M. Rooting of the Cuttings of Coniferous Species of Dendroflora of the Baikal Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 27–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-27-39>

Введение

Среди природных экосистем лесные являются наиболее значимыми для экологии, т. к. способствуют уменьшению выбросов парниковых газов, улавливанию углерода в почве и снижению уязвимости экосистемы в целом [19]. Кроме того, они дают сырье для промышленности и вырабатывают кислород. Поэтому можно сказать, что лесная отрасль является фундаментом «зеленой» экономики, а лесоводство – основным видом землепользования [20].

По данным Агентства лесного хозяйства, 83 % территории Иркутской области покрывают леса – это 64,4 млн га (более 11 % общероссийских запасов), из которых более 97 % – земли лесного фонда, 0,62 % – земли обороны и безопасности, 2,17 % – земли особо охраняемых природных территорий и 0,07 % – городские леса.

По данным Росстата (2020 г.), лесовосстановлению в России подлежит 1,1 млн га земель, из них 0,17 млн га – искусственному восстановлению через посадку семян, саженцев и черенков. При этом, по данным Ирстата, в Иркутской области ежегодно на территории до 15 тыс. га необходимо проводить искусственное лесовосстановление.

В связи с ростом объемов лесозаготовительных мероприятий, регулярными пожарами, особенно на дальних и охраняемых территориях, возрастает спрос на качественный и оздоровленный посадочный материал. Наиболее распространенный способ лесовосстановления – это получение посадочного материала путем семенного размножения, но также важна технология производства высококачественного посадочного материала черенкованием. Вегетативное размножение необходимо для сохранения генотипов плюсовых деревьев, особенно на территориях с высокой антропогенной нагрузкой (вблизи городов, железных дорог и промышленных предприятий). Вегетативное размножение применимо при ведении селекционно-семеноводческой работы, для создания клоновых семенных плантаций – источника семян повышенных генетических качеств [9, 12]. Усовершенствованные системы вегетативного размножения делают вероятным накопительное размножение отдельных клонов в более широком выборе видов [21]. Один из распространенных способов вегетативного размножения – это зеленое черенкование [13]. Метод основан на естественной способности растений к регенерации утраченных органов или частей, образованию целостных растений из стеблевых черенков [2]. Корнеобразовательная способность зависит от многих факторов: от возраста материнского растения, его состояния (наличие или отсутствие повреждений, ослабленность вредителями)

до условий черенкования и укоренения [3]. При производстве посадочного материала для лесного хозяйства вегетативное размножение увеличивает выход качественных саженцев. Отбор и массовое размножение отдельных деревьев имеют преимущество для продуктивности лесовосстановления [16].

Во всем мире более ценится сырье из хвойных пород деревьев, чем из лиственных. В Иркутской области преобладающую площадь лесного фонда занимают сосновые леса (15,5 млн га), на 2-м месте – лиственничные, затем – кедровые, еловые и пихтовые. Естественный процесс возобновления хвойных пород деревьев продолжителен и сложнопрогнозируем [14]. Главный недостаток размножения семенами – в том, что у них часто наблюдается вынужденный период покоя, всходы развиваются медленно, особенно в первые несколько лет жизни [7, 8, 10, 14].

Цель исследования – оценка технологии укоренения хвойных пород деревьев при летнем черенковании.

В задачи входило определение оптимальных сроков черенкования хвойных пород деревьев, подбор благоприятных условий для укоренения черенков и эффективных способов их подготовки.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в 2019–2022 гг. на территории Сибирского института физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН (СИФИБР, г. Иркутск) в условиях защищенного грунта и станции искусственного климата «Фитотрон».

Объектами исследования были представители семейства Сосновых (Pinaceae): *Picea obovata* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Picea obovata* var. *coerulea* Malyshev, *Pinus sibirica* Du Tour, произрастающие на территории коллекционного участка Биоресурсного центра СИФИБР. Применялись методики, принятые в агрономии и лесном хозяйстве [5, 6]. Статистическая обработка результатов исследования [6] осуществлялась с использованием компьютерной программы Excel 2010. При оценке достоверности результатов рассчитывался показатель $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность для многофакторного и однофакторного опытов. В графиках применялась корреляционная линия тренда.

Укоренение черенков проводили в закрытом грунте в поликарбонатной теплице из металлического оцинкованного профиля, покрытого сотовым поликарбонатом толщиной 6 мм, с регулируемым туманообразованием в культивационные гряды (череночники); в климатической станции «Фитотрон» – в пластиковых ящиках для черенкования (30×20×15 см) с ручным поливом. В качестве грунта использовали смесь торфа и речного песка (3:1) с кислотностью от 6,0 до 6,2 (измерения проводили рН-метром). Перед посадкой грунт обрабатывали насыщенным раствором перманганата калия. Сверху посадки мульчировали 2–3 см песка. В культивационные гряды перед черенкованием на дно укладывали дренаж, затем измельченные остатки хвойных деревьев (ветви и хвоя) слоем в 40 см, потом 10–12 см подготовленного грунта. В ящиках для черенкования дренажа было не более 2 см, столько же – измельченных остатков хвойных деревьев, затем – грунтовая смесь.

Кульминационный период в сезонном приросте елей начинается при установлении среднесуточной температуры +20 °С [1], в регионе такие условия

создаются после 20 июня, к концу июля темпы роста побегов затухают. В это время и проводили черенкование (20 июня, 1, 10 и 20 июля). Сроки заготовки черенков – 2–3 дня до посадки. Согласно С.В. Talbert et al. [21], J. Riov et al. [17], вегетативное размножение, в т. ч. черенкование, от физиологически зрелых растений весьма затруднительно. Поэтому черенки брали с плюсовых растений в возрасте от 10 до 20 лет, без признаков повреждения вредителями, заболеваний («Правила создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов)», утв. приказом М-ва природн. ресурсов и экологии РФ от 20 окт. 2015 г. № 438). Черенки срезали с побегов текущего года, заготовку проводили в утренние часы, длина черенка составляла до 10–12 см. Обязательное условие при заготовке черенков – это сохранение мутовки.

Срезанные черенки помещали в сосуды с водой комнатной температуры на 18–24 ч. Замачивание черенков проводили в защищенном от света помещении при комнатной температуре [5]. Перед посадкой черенки с базальной части обрезали секатором на 0,5 см и обрабатывали препаратом «Корневин» (индолмасляная кислота в концентрации 5 г/кг). Стимуляторы корнеобразования оказывают положительное влияние на укореняемость черенков хвойных пород [10, 11, 13]. Базальную часть подготовленных черенков опускали в препарат на высоту 2 см, излишки препарата удаляли встряхиванием. Готовые черенки высаживали в грунт на глубину 3–4 см, по 100 черенков на вариант в 3-кратной повторности. Контролем стали черенки, высаженные без обработки стимулятором корнеобразования. Для защиты посадок от воздействия прямых солнечных лучей использовали кулисы из нетканого белого полотна «Агрил». Затенение положительно влияет на укоренение черенков [2, 18].

В климатических камерах на ящики надевали колпаки из пленки для создания парникового эффекта [5], применяли ручной полив, аэрозольное распыление. В теплице – автоматический с помощью тумана (это позволяло не только поддерживать необходимую влажность воздуха и почвы, но и в жаркие дни снижать температуру воздуха). Камеру и теплицу проветривали, верхний слой при уплотнении рыхлили прокалыванием, прополки проводили по мере необходимости. В конце августа года черенкования выполняли первые учеты укоренения и выживаемости черенков, убирали погибшие растения. В период с середины сентября до середины октября растения поливали под корень при высыхании грунта на глубине 1,5–2 см. В это время температура почвы падала до +10 °С и ниже, а при таких условиях интенсивность укоренения заметно уменьшается (Федеральная служба государственной статистики). На зиму, когда подмерзал верхний слой почвы (конец октября – начало ноября), черенки мульчировали 15–20 см полуперепревших опилок (имитация снега). Весной (апрель) при повышении ночных температур до –5 °С укрытие постепенно снимали.

Вторую оценку укоренения проводили в середине июня следующего после черенкования года (рис. 1). На этом этапе учитывали образование как каллюса или корней, так и наличие или отсутствие вегетативного прироста. Третью оценку укоренения осуществляли в конце августа. На укорененных черенках определяли количество и длину корней 1-го порядка, наличие корней 2-го и последующего порядков и среднюю длину корня [4], измеряли длину вегетативного прироста (если он был).



Рис. 1. Черенки *Picea obovata* (слева) и *P. obovata* var. *coerulea* (справа) в культивационных грядах

Fig. 1. The cuttings of *Picea obovata* (left), and *Picea obovata* var. *coerulea* (right) in cultivation beds

Результаты исследования и их обсуждение

Приживаемость в вариантах без применения корнестимулятора была нулевой. Черенки, обработанные «Корневином», укоренились неоднородно (табл. 1).

Дисперсионный анализ для двухфакторного опыта при условии, что 1-м фактором (А) приняли сроки черенкования растений, 2-м (В) – условия черенкования (теплица/камера), показал значимость влияния обоих факторов, т. к. расчетное значение критерия Фишера превышало табличное (для фактора А $F_{\phi} = 4,85 \geq F_{\tau} = 3,28$; для фактора В $F_{\phi} = 3,65 \geq F_{\tau} = 2,88$). Укореняемость черенков на 5,38 % зависит от фактора А и на 15,4 % от фактора В.

В опытах М.И. Докучаевой [5] у сосны обыкновенной укореняемость черенков составляла от 1 до 2 %. В наших исследованиях укореняемость растений рода *Pinus* также была низкой – менее 1 % (0,75 % – для *P. sylvestris* и 0,5 % – для *P. sibirica* в теплице с туманной установкой и 0 % в условиях климатической камеры). Укоренение наблюдалось у 1 из 100 черенков, заготовленных в 3-х декадах июня и июля. Для вариантов 1-й и 2-й декад июля укорененных черенков не отмечено. Лучшие результаты зафиксированы для представителей рода *Picea* – укореняемость черенков в теплице составила в среднем 30,9 % (*P. obovata*) и 22,3 % (*P. obovata* var. *coerulea*). В условиях климатической камеры наблюдались более низкие результаты: укоренение черенков растений *P. obovata* произошло только в варианте от 2-й декады июля – в 5 % случаев. А у *P. obovata* var. *coerulea* укоренение установлено у черенков, заготовленных в 1-ю и 2-ю декады июля – 1 и 2 % соответственно. Остальные варианты характеризовались укореняемостью 0 %. Линии тренда показывают зависимость укореняемости елей от сроков черенкования (рис. 2).

Таблица 1

Влияние сроков черенкования на укоренение черенков саженцев исследуемых пород хвойных деревьев, обработанных стимулятором корнеобразования «Корневин» в 2019–2020 гг.

The effect of the grafting timing on the rooting of the studied coniferous tree species seedling cuttings treated with the root formation stimulator “Kornevin” in 2019–2020

Дата черенкования	Культура	Условия черенкования	Выживаемость, %	Укореняемость, %	Средние*	
					количество корней, шт.	длина корней, см
20 июня	<i>Picea obovata</i> Ledeb.	Теплица	72	31,5	4,2±0,41	22,2±2,64
		Камера	0	0	0	0
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Теплица	14	1	1,0±0,40	0,5±0,08
		Камера	23	0	0	0
	<i>Picea obovata</i> var. <i>coerulea</i> Malyshev	Теплица	37	28	2,2±0,75	21,8±10,23
		Камера	0	0	0	0
	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	Теплица	31	1	1,0±0,20	0,3±0,02
		Камера	12	0	0	0
1 июля	<i>Picea obovata</i> Ledeb.	Теплица	40	28	4,5±0,84	17,7±4,08
		Камера	9	0	0	0
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Теплица	6	0	0	0
		Камера	0	0	0	0
	<i>Picea obovata</i> var. <i>coerulea</i> Malyshev	Теплица	30	18	2,0±1,55	15,0±6,87
		Камера	18	1	1,0±0,18	0,2±0,03
	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	Теплица	13	0	0	0
		Камера	1	0	0	0
10 июля	<i>Picea obovata</i> Ledeb.	Теплица	53	30	4,2±1,72	13,3±3,08
		Камера	56	5	2,3±1,02	12,2±2,64
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Теплица	25	1	1,0±0,03	0,3±0,05
		Камера	0	0	0	0
	<i>Picea obovata</i> var. <i>coerulea</i> Malyshev	Теплица	51	17	2,8±1,60	10,2±3,82
		Камера	17	2	1,0±0,05	0,2±0,01
	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	Теплица	44	0	0	0
		Камера	0	0	0	0
20 июля	<i>Picea obovata</i> Ledeb.	Теплица	65	34	4,3±1,03	19,8±4,67
		Камера	0	0	0	0
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Теплица	46	1	1,0±0,02	0,2±0,07
		Камера	23	0	0	0
	<i>Picea obovata</i> var. <i>coerulea</i> Malyshev	Теплица	39	26	2,3±1,03	17,3±10,42
		Камера	0	0	0	0
	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	Теплица	40	1	1,0±0,02	0,2±0,01
		Камера	12	0	0	0
	Эффект фактора А			НСР ₀₅ = 3,7		$F_{\phi} \geq F_{\tau}$
	Эффект фактора В			НСР ₀₅ = 8,3		$F_{\phi} \geq F_{\tau}$

* Здесь и далее: среднее значение ± ошибка среднего.

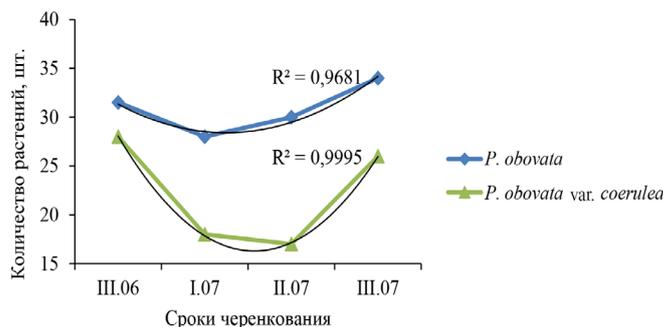


Рис. 2. Зависимость количества укорененных черенков елей в теплице в 2019–2020 гг. от сроков черенкования, $HCP_{05} = 1,37$
 Fig. 2. The dependence of the number of rooted spruce cuttings in the greenhouse in 2019–2020 on the timing of cuttings, $LSD_{05} = 1.37$

Более высокая доля укоренения отмечена для черенков, высаженных в 3-х декадах июня и июля. Наибольшее количество укорененных черенков – 34 % – было у растений *Picea obovata* в варианте 3-й декады июля. У *P. obovata* var. *coerulea* более результативное укоренение (28 %) отмечено для черенков от 3-й декады июня. В опытах Н.В. Пинаевой [10] укореняемость *P. obovata* составила 20 %, в опытах М.И. Докучаевой [5] – до 40 %. У канадских исследователей на торфяно-перегнойно-песчаной среде в теплице укоренялось до 80 % черенков [15]. Полученные нами результаты не противоречат данным проведенных ранее отечественных исследований в других регионах.

Распространены 2 способа подготовки черенка к посадке: освобождение от хвои в базальной части и без него [5]. В исследованиях были заложены варианты с черенками разной подготовки. В результате показано, что укоренение черенков с сохраненной хвоей выше на 10 % и занимает времени на 20 дней меньше (табл. 2). Укоренение черенков с удаленной хвоей проходит более длительно, они чаще гибнут. По результатам однофакторного дисперсионного анализа было установлено достоверное влияние способа подготовки черенков на их укореняемость: расчетный критерий Фишера превышал табличный ($F_{\phi} = 28,5 \geq F_{\tau} = 21,25$ – для *Picea obovata*; $F_{\phi} = 29,42 \geq F_{\tau} = 27,12$ – для *P. obovata* var. *coerulea*).

Таблица 2

Влияние способа подготовки черенков ели на их укоренение в 2019–2020 гг.
The influence of the method of preparing spruce cuttings on their rooting in 2019–2020

Культура	Вариант подготовки	Укорененные черенки, %			Средняя укореняемость, %	HCP ₀₅	Сроки укоренения, дн.
		1	2	3			
<i>Picea obovata</i>	Без хвои	10	6	8	8,0±2,0	12,25	186
	С хвоей	17	22	16	18,3±3,2		155
<i>P. obovata</i> var. <i>coerulea</i>	Без хвои	2	3	4	3,0±1,0	7,98	186
	С хвоей	8	14	16	12,7±4,2		155

Примечание: 1, 2, 3 – повторности опыта.

В ходе первой оценки укоренения был зафиксирован основной выпад растений – более 90 %, ни корней, ни каллюсной ткани не наблюдалось. На основании подсчетов характеризовали выживаемость, т. е. устанавливали количество черенков, которые сохранили живые и здоровые части. В августе, при третьей оценке, выявлены растения с развитой корневой системой. В результате

можно сказать, что в Прибайкалье для укоренения хвойных растений семейства Pinaceae требуется более 155 дней. Для получения саженцев хорошего качества с высокой долей выхода черенки перед посадкой лучше не зачищать от хвои. Эта манипуляция требует дополнительных энерго- и трудовых затрат, при этом излишне травмированные черенки больше подвержены поражению инфекциями и чаще погибают. При ранневесеннем черенковании в Томской области [10] у растений рода *Picea* корни начинают образовываться спустя 75–80 дней. При летнем черенковании [5] в Московской области корни появляются через 66–80 дней после высадки в грунт. По результатам исследования, для Прибайкалья этот период более длительный – 155–186 дней.

Для определения качества укоренения были сняты биометрические показатели образованных корней. На момент учета у всех сохранившихся черенков сформировались корни хорошего качества и у большинства черенков виден прирост вегетативной части (рис. 3).



Рис. 3. Укоренившийся черенок *Picea obovata* с удалением хвои (слева), без удаления хвои (по центру) и укоренившийся черенок *P. obovata* var. *coerulea* без удаления хвои (справа)
 Fig. 3. The rooted cutting of *Picea obovata* with the needles removed (left), without the needles removed (center), and the rooted cutting of *P. obovata* var. *coerulea* without the needles removed (right)

Корни образовывались чаще в области мутовки и реже – по линии нижнего среза черенка из его центральной части. Они были коричневого цвета с белыми шиловидными кончиками и в большинстве имели небольшие корни 2-го порядка, реже – 3-го. Начало прироста вегетативной части наблюдалось в конце мая – начале июня (корнеобразования в этот период не отмечено), что соответствовало началу сезонного вегетативного роста у растений в открытом грунте. К моменту учета (август) прирост составлял от $6 \pm 0,13$ до $11 \pm 1,02$ см. Независимо от сроков черенкования количество корней у *Picea obovata* варьировало от 1 до 5. У саженцев, полученных в череночнике, преобладали растения с 4 корнями ($4,3 \pm 0,14$ шт.), у *P. obovata* var. *coerulea* количество корней также варьировало от 1 до 5, но большинство черенков имели по 2 корня ($2,33 \pm 0,34$ шт.) (рис. 4). У саженцев, укорененных в ящиках, отмечено меньшее количество корней, но они были более разветвленные и характеризовались превосходящим количеством вторичных корней. Центральные корни имели изогнутую форму. Их среднее количество составило у *P. obovata* $2,35 \pm 0,38$ шт., а у *P. obovata* var. *coerulea* – $1,3 \pm 0,22$ шт.

Результаты многофакторного дисперсионного анализа показали, что условия черенкования не влияют на количество корней у черенков: $F_{\phi} = 2,85 \leq F_{\tau} = 3,36$. Сроки черенкования мало воздействуют на укоренение – 1,17 %, $F_{\phi} = 4,55 \geq F_{\tau} = 4,45$.

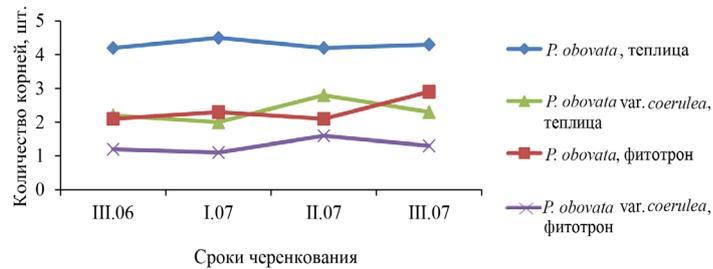


Рис. 4. Изменение количества корней у елей за вегетационные периоды 2019–2022 гг. в зависимости от сроков черенкования.

НСР₀₅ для фактора А равно 2,77; для фактора В – 2,26

Fig. 4. The change in the root number of spruce trees during the vegetation periods of 2019–2022 depending on the timing of grafting. LSD₀₅ for factor A is 2.77; for factor B – 2.26

В череночнике корневая система свободно располагается в грунте, что дает возможность для более интенсивного роста. Качество корневой системы саженцев, полученных в ящиках для черенкования, отличалось от качества корней, сформированных в череночнике. В таких условиях более длинные корни отмечены у черенков, высаженных в 3-й декаде июня, – в среднем 22,2 см у *Picea obovata* и 21,9 см у *P. obovata* var. *coerulea* (рис. 5). Наименьшая длина корней отмечена у черенков, укорененных во 2-й декаде июля, – 13,3 и 10,2 см соответственно.

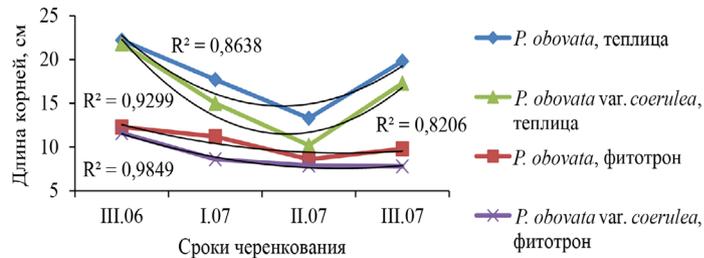


Рис. 5. Изменение длины корней у елей за вегетационные периоды 2019–2022 гг. в зависимости от сроков черенкования.

НСР₀₅ фактора А – 17,91; фактора В – 14,62

Fig. 5. The change in the root length of spruce trees during the vegetation periods of 2019–2022 depending on the timing of grafting. LSD₀₅ for factor A is 17.91; for factor B – 14.62

В ящиках более длинные корни отмечены у черенков, высаженных в 3-й декаде июня, – в среднем $12,3 \pm 1,61$ см у *Picea obovata* и $11,6 \pm 1,79$ см у *P. obovata* var. *coerulea*. Наименьшая длина корней у *P. obovata* зафиксирована у черенков, укорененных во 2-й декаде июля – $8,6 \pm 1,25$ см. У черенков *P. obovata* var. *coerulea* – во 2-й и 3-й декадах июля – $7,8 \pm 1,06$ см. Результаты многофак-

торного дисперсионного анализа показали, что условия черенкования слабо влияют на длину корней у черенков. Более существенное воздействие отмечено для сроков черенкования – 26,81 % ($F_{\phi} = 4,25 \geq F_{\tau} = 0,39$).

Заключение

Черенки, обработанные стимулятором корнеобразования «Корневин», имеют высокую долю укоренения по сравнению с необработанными черенками.

Условия, созданные для черенков в теплице с туманной установкой, лучше условий в климатической камере с ручным поливом.

Наихудшие результаты показали растения рода *Pinus*: укореняемость зеленых черенков составила менее 1 % (0,75 % – для *P. sylvestris* и 0,5 % – для *P. sibirica*). Лучшая картина наблюдалась у представителей рода *Picea* – укореняемость черенков в теплице была в среднем 30,9 % у *P. obovata* и 22,3 % у *P. obovata* var. *coerulea*.

В условиях Прибайкалья оптимальным сроком заготовки черенков для *P. obovata* и *P. obovata* var. *coerulea* являются 3-и декады июня и июля.

При подготовке черенков к посадке наихудшим оказался вариант, где удалась хвоя с черенков: доля укоренения таких черенков ниже на 10 %, а период укоренения дольше на 30 дней.

В Прибайкалье для укоренения хвойных растений *P. obovata* и *P. obovata* var. *coerulea* требуется более 155 дней.

Мощными корнями характеризуются черенки, высаженные в 3-й декаде июня в культивационные гряды с регулируемым туманообразованием, их длина составила в среднем 22,2 см у *P. obovata* и 21,9 см у *P. obovata* var. *coerulea*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авдеева Е.В., Извеков А.А. Исследование фенологического цикла ели сибирской и колючей в условиях сибирского города // Хвойные бореал. зоны. 2021. Т. XXXIX, № 2. С. 81–89.

Avdeeva E.V., Izvekov A.A. Study of the Phenological Cycle of Spires of Siberian and Keys in the Conditions of the Siberian City. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2021, vol. XXXIX, no. 2, pp. 81–89. (In Russ.).

2. Аладина О.Н. Новые элементы в технологии размножения садовых растений зелеными черенками // Сб. докл. V ежегод. конф. Ассоциации Производителей Посадочного Материала. М.: АППМ, 2012. С. 51–58.

Aladina O.N. New Elements in the Technology of Propagation of Garden Plants by Green Cuttings. *Collection of Reports of the V Annual Conference of the Association of Planting Material Manufacturers*. Moscow, Association of Planting Material Manufacturers, 2012, pp. 51–58. (In Russ.).

3. Аладина О.Н. Оптимизация технологии зеленого черенкования садовых растений // Изв. ТСХА. 2013. Вып. 4. С. 5–22.

Aladina O.N. Optimization of Propagation Technology of Garden Plants by Herbaceous Cuttings. *Izvestiya Timiryazevskoj sel'skokhosyaystvennoj akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2013, iss. 4, pp. 5–22. (In Russ.).

4. Барайшук Г.В., Казакова А.С., Батурина С.Е., Симаков Е.С., Орлов Ю.В. Технологические решения получения адаптивного посадочного материала в условиях южной лесостепи Омской области // Политемат. сетевой электрон. науч. журн. КубГАУ. 2014. № 101(07). С. 2349–2360. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/158.pdf> (дата обращения: 28.08.24).

Barayshchuk G.V., Kazakova A.S., Baturina S.E., Simakov E.S., Orlov Yu.V. Technological Decisions of Getting Adaptive Planting Stock in the Conditions of South Forest-Steppe of the Omsk Region. *Nauchnyj zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2014, no. 101(07), pp. 2349–2360. (In Russ.).

5. Докучаева М.И. Вегетативное размножение хвойных пород. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 105 с.

Dokuchaeva M.I. *Vegetative Propagation of Conifers*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 105 p. (In Russ.).

6. 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.).

7. Маркова И.А. Современные проблемы лесовыращивания (Лесокультурное производство). СПб.: СПбГЛТА, 2008. 152 с.

Markova I.A. *Modern Problems of Forest Cultivation (Forestry Production)*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Technical Academy Publ., 2008. 152 p. (In Russ.).

8. Нимаджанова К., Султонова М.С., Холов З.Н., Худойкулов Б.С. Поиски перспективных методов вегетативного размножении некоторых хвойных пород *in vivo* // Кишоварз. 2014. № 2. С. 23–25.

Nimadzhanova K., Sultonova M.S., Kholov Z.N., Khudojkulov B.S. The Search for Promising Methods of Vegetative Propagation of Some Coniferous Species *in vivo*. *Kishovarz*, 2014, no. 2, pp. 23–25. (In Russ.).

9. Нурманбетова А.Т., Ахматов М.К. Влияние стимуляторов роста CLONEX и VITROCLON ROOTING COMPLEX на укоренение и каллюсообразование черенков *Picea pungens* 'glauca' // Междунар. журн. приклад. и фундам. исследований. 2021. № 2. С. 11–15.

Nurmanbetova A.T., Akhmatov M.K. The Effect of Growth Stimulants CLONEX and VITROCLON ROOTING COMPLEX on Rooting and Callus Formation of *Picea pungens* 'glauca' Cuttings. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Researches*, 2021, no. 2, pp. 11–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/mjpf.13174>

10. Пинаева Н.В., Дорохова А.И. Опыт вегетативного размножения некоторых видов и сортов хвойных пород // Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири: материалы VII Междунар. науч. интернет-конф. Томск, 2015. С. 121–128.

Pinaeva N.V., Dorokhova A.I. The Experience of Vegetative Propagation of Some Species and Varieties of Conifers. *Forestry and Green Building in Western Siberia: Materials of the VII International Scientific Internet Conference*. Tomsk, 2015, pp. 121–128. (In Russ.).

11. Резвякова С.В., Гурин А.Г., Резвякова Е.С. Размножение хвойных пород зелеными черенками с использованием новых биопрепаратов // Вестн. ОрелГАУ. 2017. № 2(65). С. 9–14.

Rezvyakova S.V., Gurin A.G., Rezvyakova E.S. Propagation of Coniferous Species by Green Cuttings Using New Biopreparations. *Vestnik OrelGAU*, 2017, no. 2(65), pp. 9–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.15217/issn1990-3618.2017.2.9>

12. Севастьянов В.Е. Изучение элементов технологии размножения хвойных пород методом черенкования в условиях степного Крыма // Изв. с.-х. науки Тавриды. 2018. № 16(179). С. 30–39.

Sevast'yanov V.E. The Study of the Elements of the Technology of Propagation of Coniferous Species by Cuttings in the Conditions of the Steppe Crimea. *Izvestiya sel'skokozyajstvennoj nauki Tavridy*, 2018, no. 16(179), pp. 30–39. (In Russ.).

13. Цепляев А.Н., Трещевская Э.И. Синергический эффект применения стимуляторов ризогенеза и подогрева субстрата при зеленом черенковании хвойных пород // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 2(34). С. 14–21.

Tseplyaev A.N., Treschevskaya E.I. Synergistic Effect of Rhysogenesis Stimulator Application and Substrate Heating during Propagation by Herbaceous Cuttings of Coniferous Species. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 2(34), pp. 14–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/2>

14. Шукин Р.А., Заволока И.П., Рязанов Г.С., Рязанова В.В. Укореняемость видов хвойных растений в зависимости от состава почвенной смеси в тепличных условиях с использованием системы туманообразования // Вестн. Мичурин. гос. аграр. ун-та. 2016. № 4. С. 30–36.

Shchukin R.A., Zavaloka I.P., Ryazanov G.S., Ryazanova V.V. Rooting Ability of Coniferous Species Depending on the Potting Soil Composition under Greenhouse Conditions Using Misting System. *Vestnik Michurinskogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*, 2016, no. 4, pp. 30–36. (In Russ.).

15. Grace N.H., Farrar J.L. Vegetative Propagation of Conifers: XIII. Rooting of Norway Spruce Cuttings in the Greenhouse. *Canadian Journal of Research*, 1945, vol. 23c, no. 5, pp. 150–165. <https://doi.org/10.1139/cjr45c-013>

16. Gupta S., Sahoo G., Wani A.M. Propagation of Forest Tree Species by Vegetative Propagation. *Recent Trends in Propagation of Forest and Horticultural Crops*, 2022, pp. 26–42.

17. Riov J., Fox H., Attias R., Shklar G., Farkash-Haim L., Sitbon R., Moshe Y., Abu-Abied M., Sadot E., David-Schwartz R. Improved Method for Vegetative Propagation of Mature *Pinus halepensis* and its Hybrids by Cuttings. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2020, vol. 67, iss. 1–2, pp. 5–15. <https://doi.org/10.1163/22238980-20191118>

18. Pacholczak A., Szydło W. The Effect of Stock Plant Shading on Rhizogenesis in Stem Cuttings of *Cornus alba* L. Cultivars. *Propagation of Ornamental Plants*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 37–41.

19. Sahoo G., Wani A.M. Forest Management in Relation to Climate Change. *Bioingene PSJ*, 2021, art. no. D24MLY20R13, pp. 1–10.

20. Sahoo G., Wani A.M. Multifunctional Agroforestry Systems in India for Livelihoods. *Annals of Horticulture*, 2019, vol. 12, iss. 2, pp. 139–149. <https://doi.org/10.5958/0976-4623.2019.00022.7>

21. Talbert C.B., Ritchie G.A., Gupta P. Conifer Vegetative Propagation: an Overview from a Commercialization Perspective. *Clonal Forestry I: Genetics and Biochemistry*, 1993, no. 1, pp. 145–181. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84175-0_11

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*181.62:630*531
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-40-50

Особенности роста сосны обыкновенной в условиях Красноярской лесостепи

В.В. Иванов, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [N-6755-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-0716>

А.Н. Борисов , канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AHI-4929-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-5043>

О.А. Шапченкова, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [F-7590-2017](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1392-5171>

А.Е. Петренко, канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-5411-2021](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>

Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – Красноярский научный центр СО РАН, Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, Россия, 660036; viktor_ivanov@ksc.krasn.ru, alnik_borisov@mail.ru , shapchenkova@mail.ru, alcorsci@bk.ru

Поступила в редакцию 17.08.22 / Одобрена после рецензирования 10.11.22 / Принята к печати 15.11.22

Аннотация. Изучены особенности роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на примере одновозрастного соснового насаждения с высокой полнотой. Многолетние исследования проведены на постоянной пробной площади. Данные по объекту собраны начиная с его 37-летнего возраста и заканчивая возрастом 55 лет. Проанализированы характеристики отдельных деревьев и всего насаждения за период роста в отсутствие внешних воздействий (рубок, ветровалов, повреждений вредителями и др.) и после проведения рубок ухода. Рассмотрено влияние величины доступного для дерева ресурса на формирование крон, корневой системы и стволовой древесины. Величиной доступного ресурса служила площадь области доминирования. Корневая система сосны изучаемых насаждений имеет компактные размеры и, несмотря на высокую полноту древостоя, благодаря значительному содержанию питательных веществ в почве и отсутствию дефицита влаги в достаточной мере обеспечивает интенсивный рост деревьев, соответствующий условиям I класса бонитета. Установлено, что в данных условиях средняя площадь корневой системы соразмерна средней площади области доминирования. Показано, что диаметр ствола на высоте 1,3 м в отсутствие внешних воздействий существенно зависит от площади области доминирования. Коэффициент корреляционной связи этих показателей для изучаемого насаждения в его 37-летнем возрасте составляет 0,89. Методами дендрохронологии изучено влияние рубок на годичный радиальный прирост. Выявлено, что на следующий после рубки год он повысился в 1,3–2,0 раза в зависимости от увеличения площади области доминирования. Предложен метод расчета коэффициента конкуренции как доли ресурса, необходимого для свободного роста дерева, которая перераспределяется между его ближайшими соседями. Многолетние наблюдения показали, что при коэффициентах конкуренции, превышающих 0,6–0,7, темпы роста по диаметру ствола существенно снижаются, у деревьев формируется разреженная крона протяженностью менее 40 % от высоты дерева. Это, в свою очередь, приводит к отставанию в росте и переходу к угнетенному состоянию. Данные о коэффициентах конкуренции могут быть использованы для своевременного принятия решений о рубке и ее интенсивности.

© Иванов В.В., Борисов А.Н., Шапченкова О.А., Петренко А.Е., 2024

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

Ключевые слова: сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., конкуренция, доступный ресурс, кроны, корневая система, рост по диаметру, Красноярская лесостепь

Для цитирования: Иванов В.В., Борисов А.Н., Шапченкова О.А., Петренко А.Е. Особенности роста сосны обыкновенной в условиях Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 40–50. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-40-50>

Original article

The Peculiarities of Scots Pine Growth in the Conditions of the Krasnoyarsk Forest-Steppe

Viktor V. Ivanov, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [N-6755-2019](https://orcid.org/0000-0003-0799-0716), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-0716>

Aleksandr N. Borisov[✉], Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AHI-4929-2022](https://orcid.org/0000-0002-7837-5043), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-5043>

Olga A. Shapchenkova, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [F-7590-2017](https://orcid.org/0000-0002-1392-5171), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1392-5171>

Alexey E. Petrenko, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5411-2021](https://orcid.org/0000-0003-3444-5297), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>

Sukachev 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; viktor_ivanov@ksc.krasn.ru, alnik_borisov@mail.ru[✉], shapchenkova@mail.ru, alcorsci@bk.ru

Received on August 17, 2022 / Approved after reviewing on November 10, 2022 / Accepted on November 15, 2022

Abstract. The growth peculiarities of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) have been studied by the example of an even-aged pine stand of high density. A long-term research has been conducted on a permanent sample plot. The data has been collected from the stand aged from 37 to 55 years. The characteristics of individual trees and the entire stand during the growth period in the absence of external influences (cutting, windfalls, pest damage, etc.) and after improvement cuttings have been analyzed. The influence of the amount of resource available to a tree on the formation of crowns, root systems and stem wood has been investigated. The size of the available resource has been the square of the dominance area. The root system of the pine trees of the studied stands is compact in size and, despite the high stand density, due to the high content of nutrients in the soil and the absence of moisture deficiency, it sufficiently ensures intensive tree growth corresponding to the conditions of the I quality class. It has been found that under these conditions, the average area of the root system is proportional to the average square of the dominance area. It has been shown that the stem diameter at a height of 1.3 m in the absence of external influences significantly depends on the square of the dominance area. The correlation coefficient of these indicators for the studied stand at the age of 37 is 0.89. The influence of cuttings on annual radial increment has been studied using dendrochronology methods. It has been revealed that in the year following the cutting, it has increased by 1.3–2.0 times, depending on the increase in the square of the dominance area. A method has been proposed for calculating the competition coefficient as a share of the resource required for the free growth of a tree, which is redistributed between its closest neighbours. Long-term observations have shown that with competition coefficients



exceeding 0.6–0.7, the stem diameter increment rate decreases significantly, and the trees develop a sparse crown extending less than 40 % of the tree height. This, in turn, leads to growth retardation and a transition to a depressed state. This, in turn, leads to growth retardation and a transition to a depressed state.

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris* L., competition, available resource, crowns, root system, diameter increment, the Krasnoyarsk forest-steppe

For citation: Ivanov V.V., Borisov A.N., Shapchenkova O.A., Petrenko A.E. The Peculiarities of Scots Pine Growth in the Conditions of the Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 40–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-40-50>

Введение

Сосновые боры лесостепной зоны широко распространены в Западной и Восточной Сибири. Они сформированы в результате пожаров и интенсивного освоения территории подзоны южной тайги в конце XIX – начале XX вв. Сосняки лесостепных боров в основном представлены 100–140-летними древостоями, выполняющими водоохранно-защитные, рекреационные и другие полезные функции. При существующем уровне ведения лесного хозяйства в Сибири степень использования потенциальной продуктивности сосняков невелика. Применение системных рубок ухода на разных возрастных этапах формирования сосновых древостоев позволяет значительно увеличить общую продуктивность использования лесных ресурсов и его рациональность.

Рост всех компонентов дерева происходит соразмерно, в соответствии с законами аллометрии, что подтверждается исследованиями [7, 22]. Корневая система дерева является основным источником поступления влаги, макро- и микроэлементов, в связи с этим размеры и рост всех структур дерева коррелируют с размерами корневой системы [7, 9]. Темпы роста деревьев по высоте и диаметру ствола значительно меняются в зависимости от густоты древостоя [5, 6, 20]. Эффективным инструментом для изучения закономерностей роста деревьев служит моделирование [9, 15, 18, 19, 21, 22]. Многие исследователи отмечают, что площадь роста в значительной мере определяет как рост отдельных деревьев, так и динамику характеристик древостоя в целом [3, 4, 10]. Существует ряд методов оценки площади роста дерева, показавших свою эффективность при моделировании их роста [3, 9]. Особую значимость приобретают научные изыскания в области закономерностей формирования и роста сосновых насаждений, выполняющих защитные функции в условиях лесостепной зоны.

Цель данной работы – изучение особенностей роста (ствола, кроны и корневой системы) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от величины доступного ресурса в условиях конкуренции.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является сосняк мелкотравно-зеленомошный, произрастающий в условиях Красноярской лесостепи (рис. 1). На постоянной пробной площади (ПП) и на контрольном участке без рубок ухода, заложенном в пределах того же таксационного выдела, определены координаты всех деревьев и основные таксационные показатели древостоя (табл. 1).

Рис. 1. Сосновый древостой в возрасте 55 лет на ПП
в пределах исследуемого таксационного выдела

Fig. 1. The pine stand aged 55 years on the SP within
the studied survey plot



Таблица 1

Основные таксационные показатели древостоя на ПП и контрольном участке
The main inventory indicators of the stand on the SP and the control plot

Состояние	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма площадей сечения, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
До рубки	37	5460	10,5	15,7	47,3	1,4	369
После рубки		2730	13,2	17,6	37,5	1,1	333
До рубки	51	2420	15,8	19,0	47,4	1,3	430
После рубки		1280	18,0	19,7	32,5	0,9	304
После рубки (через 4 года)	55	1250	20,3	21,0	40,4	1,0	396
Контроль	55	1950	18,6	20,7	53,0	1,3	513

Данные по объекту исследования собраны с 37-летнего возраста древостоя до его возраста 55 лет. За этот период на ПП 2 раза проводились рубки ухода по низовому методу (прочистки и прореживание). Низовой метод чаще всего применяется в чистых 1-ярусных хвойных насаждениях. При этом в рубку преимущественно назначались угнетенные деревья, относящиеся к 4-му и 5-му классам роста и развития по шкале Крафта. На базе трактора МТЗ-82.1 и бензопилы осуществлялось равномерное разреживание, направленное на регулирование густоты древостоя и создание благоприятных условий для формирования стволов и крон лучших деревьев.

Интенсивность рубки по запасу составила 10 и 29 % в возрасте 37 лет и 51 года соответственно. Густота после рубки была 2730 и 1280 шт./га соответственно. Через 4 года после рубки, в возрасте 55 лет, древостой имел средние диаметр 20,3 см и высоту 21,0 м. Относительная полнота равнялась 1,0, запас древесины – 396 м³/га и сумма площадей поперечного сечения стволов – 40,4 м²/га.

Почвенный покров сосняка мелкотравно-зеленомошного представлен серыми лесными почвами. Данные по их физико-химическим свойствам, полученные с использованием агрохимических методов [1, 2], описаны нами ранее [16]. В частности, по гранулометрическому составу почвы относятся к легкосуглинистым, реакция среды кислая в органогенном горизонте и слабокислая в минеральной части профиля, содержание гумуса высокое.

Методы изучения корневых систем отличаются большой трудоемкостью. Поскольку в данной работе не стояло задачи описания фракционной структуры корней, то наиболее рациональным было использование метода подкопа и вывала. Этим методом были обследованы корневые системы 7 модельных деревьев.

Радиальный прирост стволов по диаметру устанавливался дендрохронологическим методом по кернам, для чего в 47-летнем возрасте на ПП с помощью возрастного бурава на высоте 1,3 м было взято 250 кернов, а в 55-летнем возрасте – 15. Высоты деревьев и протяженность крон измерялись лазерным высотомером-дальномером TruPulse 200 не менее чем для 15 деревьев разных ступеней толщины. Радиусы крон определялись по 8 азимутальным направлениям. Площадь проекции крон устанавливалась по материалам фотосъемки, проведенной с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro с высоты 150 м, что обеспечило разрешение на местности около 25 см. Обработка снимков выполнена в программе ArcGIS. По этим снимкам в программе ArcMap все кроны на исследуемом участке были околтурены с вычислением их площади проекции.

Величина доступного ресурса для деревьев сосны оценивалась методом областей доминирования (ОД) [3], где этой областью считается участок, в пределах которого дерево оказывает доминирующее влияние с точки зрения использования доступных ресурсов. Для количественной оценки напряженности конкуренции за доступный ресурс между деревом и его ближайшими соседями предложен коэффициент конкуренции (КК), который зависит от площади ОД ($S_{од}$).

Статистическая обработка данных и регрессионный анализ выполнены в программе Excel. Вычисление $S_{од}$ в соответствии с предложенным методом, графическая визуализация ОД и их границ выполнены с помощью программы, написанной на языке Object Pascal в Delphi.

Результаты исследования и их обсуждение

Подземная часть сосны – сложная биологическая система, которая объединяет корни различного функционального назначения, строения и организации. Доля общей массы абсолютно сухого вещества корней варьирует от 17 % для I класса бонитета до 27 % для IV [8]. При изучении особенностей роста фитомассы сосняков практический интерес представляет использование отношения массы корней к запасу стволовой древесины ($M_{корн}/M_{ств}$). Оно зависит от возраста, породного состава и региональных особенностей насаждения.

По данным М.Г. Семечкиной [12], в условиях Красноярской лесостепи у сосен с диаметром ствола на высоте 1,3 м (d) 12 см фитомасса корней в возрасте 23 года составляет 19,2 % от массы всей надземной части дерева. При увеличении диаметра ствола доля корней уменьшается – 14,1 % при диаметре ствола 20 см. Исследованиями В.Д. Стаканова [13] в условиях Погорельского бора установлено, что доля фитомассы корней от общей массы ($M_{общ}$) у сосны в 35 лет – в среднем 16,6 % (от 10,3 до 25,3 %), в 39 лет – 14,5 % и в 90 лет – 18,1 %. По методике, приведенной в [17], для ПП и контрольного участка рассчитана фитомасса фракций в абсолютно сухом состоянии (табл. 2). На ПП в возрасте 37 лет и 51 года отношение $M_{корн}/M_{общ}$ равно 0,20 и 0,18 соответственно, для крон – 0,12 и 0,10 соответственно. На контрольном участке – 0,18 и 0,10 соответственно для корней и крон.

Таблица 2

**Фитомасса фракций сосны обыкновенной в абсолютно сухом состоянии
для III и контрольного участка**
**The phytomass of Scots pine fractions in a completely dry state for the SP
and the control plot**

Возраст, лет	Состояние	Запас, м ³ /га	Фитомасса фракции, т/га			
			Ствол	Крона	Корни	Всего
37	До рубки	369	144,2	25,6	42,9	212,6
51	До рубки	430	167,7	23,9	43,2	234,8
55	Контроль	513	200,7	26,8	49,6	277,1

В исследованиях, посвященных динамике роста корневых систем, отмечается, что у сосны обыкновенной площадь проекции корневых систем наиболее интенсивно увеличивается в возрасте 18–30 лет, после чего скорость роста существенно уменьшается, а дальнейшее развитие корневой системы происходит за счет увеличения корнезаселенности [11]. По форме и строению у сосны, в соответствии с классификацией М.Е. Ткаченко [14], выделяется 4 типа корневых систем: глубокостержневая, якорная, поверхностная и густая щетковидная. Условия высокой конкуренции при густоте древостоя 1250 шт./га и относительной полноте 1,0 отразились на формировании корневых систем деревьев. В данных почвенных условиях у сосны преобладают 2 типа корневых систем: неглубокая, но густая щетковидная без хорошо выраженных горизонтальных и вертикальных скелетных корней, характерная для сосен на глинистых почвах; якорная – со слабо развитым стержневым корнем, но развитыми горизонтальными корнями, от которых отходят якорные (рис. 2). Основная часть корней (до 80 %) проникает в почву на глубину до 70 см. Радиус распространения корней 1-го, 2-го и 3-го порядка в поверхностном слое почвы (до 20 см) в среднем составил 1,75 м. В работе по моделированию горизонтальной структуры корней на основе регрессионного анализа установлена зависимость ($R^2 = 0,82$) от диаметра ствола дерева средней дальности распространения корней и их максимальной длины [15]. Выявлено, что максимальная длина корней может в 2 раза превосходить среднюю. Из этого следует, что при используемом методе подкопа и вывала, несмотря на обрыв некоторых корней, обеспечивается корректная оценка области основной массы корневой системы.

Полученные данные показывают, что при среднем диаметре стволов модельных деревьев 27,8 см средняя площадь корневой системы составляет 9,6 м², что соразмерно средней $S_{од}$ для этих деревьев – 14,1 м². Таким образом, корневая система в данном древостое имеет компактные размеры, и конкуренция за почвенные ресурсы выражена слабо. Благодаря высокому содержанию питательных веществ в верхнем слое почвы (0–20 см) и отсутствию дефицита влаги в достаточной мере обеспечивается интенсивный рост деревьев, соответствующий условиям I класса бонитета. С другой стороны, высокая полнота древостоя обостряет световую конкуренцию, что отражается на формировании крон деревьев.

В соответствии с законом аллометрии [7], в процессе онтогенеза происходит соразмерный рост всех компонентов дерева: корней, кроны и ствола. Темпы роста этих компонентов меняются с возрастом и зависят от доступного дереву ресурса на каждом этапе развития этого дерева. Поставщиками питательных веществ выступают корни и фотосинтетический аппарат кроны.



Рис. 2. Корневые системы сосны в возрасте 55 лет: *а* – щетковидная; *б* – якорная

Fig. 2. The root systems of pine trees aged 55 years: *a* – brush-like; *b* – anchor

Крона формируется в условиях конкуренции за световой поток фотосинтетически активной радиации, и ее размеры связаны с развитием других компонентов дерева [22]. С целью изучения характеристик крон для соснового древостоя была проведена крупномасштабная съемка с использованием квадрокоптера. Получены данные о расположении деревьев на ПП, контуры крон и границы ОД (рис. 3). Проекция крон практически не выходит за пределы ОД. Об этом говорят средняя площадь крон ($S_{кр}$) и $S_{о.д}$, которые составляют $4,6 \pm 1,6$ и $6,3 \pm 1,9$ м² соответственно.

Регрессионный анализ показал наличие тесной связи между $S_{кр}$ и $S_{о.д}$:

$$S_{кр} = 0,655 + 0,345S_{о.д} \text{ при } R = 0,84.$$

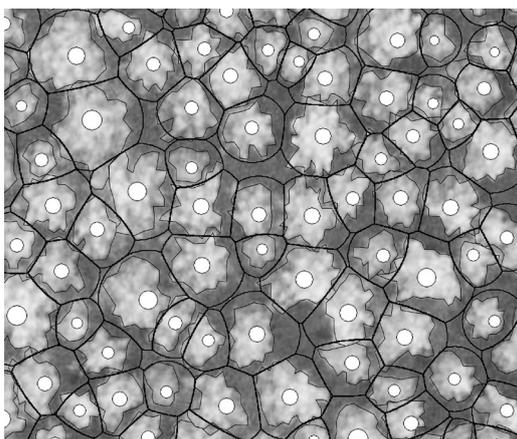


Рис. 3. Фрагмент ПП в возрасте 51 год (черные тонкие линии – контуры крон; жирные – границы областей доминирования; белые круги – стволы деревьев)

Fig. 3. The fragment of the SP aged 51 years (the black thin lines mark the contours of the crowns; the black bold lines mark the boundaries of the dominance areas; the white circles mark the tree stems)

До 37-летнего возраста деревья на ПП росли в отсутствие экзогенных воздействий. Ресурс между особями распределялся в условиях напряженных конкурентных взаимодействий и до этого возраста мало менялся. Поэтому выявление связи диаметра стволов с величиной доступного ресурса обоснованно. С помощью регрессионного анализа установлена связь диаметров ствола в 37 лет с $S_{о.д}$:

$$d = 5,63 + 1,94S_{о.д} \text{ при } R = 0,89.$$

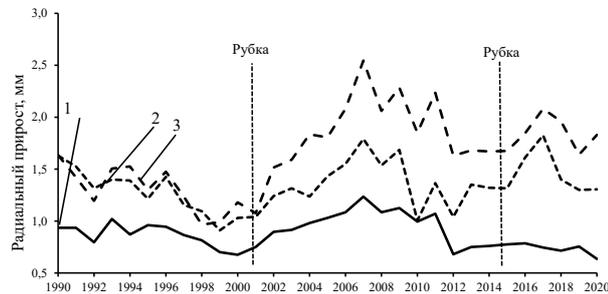
Проведение рубки в 37-летнем возрасте снизило конкурентную напряженность, а освободившийся ресурс перераспределился между остальными особями. Были изучены данные 250 кернов, взятых на ПП. Эти данные разбиты на 3 группы: в 1-ю вошли деревья, для которых $S_{o,d}$ возросла на 2 м^2 и более; во 2-ю – деревья с увеличением $S_{o,d}$ от 1 до 2 м^2 и в 3-ю – с повышением $S_{o,d}$ менее 1 м^2 . Число деревьев в этих группах составляет 40, 72 и 138 шт. соответственно. Выявлено, что уже на следующий после рубки год годичный радиальный прирост стал увеличиваться и через 6 лет у деревьев в 1-й группе повысился на $0,85 \pm 0,15 \text{ мм}$, во 2-й – на $0,67 \pm 0,37 \text{ мм}$, а в 3-й – уменьшился на $0,02 \pm 0,30 \text{ мм}$.

Повторное обследование ПП в 47-летнем возрасте показало, что полнота древостоя достигла 1,5, что привело к появлению значительного числа угнетенных деревьев (более 58 % имели диаметр ствола менее среднего). Высокая полнота обусловила формирование разреженных крон с небольшой протяженностью. Так, при среднем диаметре ствола 16 см она была около 30 % от высоты дерева. Поэтому в 2015 г. на ПП проведена рубка ухода (прореживание) в возрасте 51 год таким образом, чтобы остались деревья с более высокими $S_{o,d}$. Интенсивность рубки по числу стволов составила 47 %, а по запасу – 29 %. В результате рубки средняя $S_{o,d}$ выросла с 3,8 до $6,7 \text{ м}^2$.

В возрасте 55 лет на ПП были взяты керны 15 модельных деревьев. На рис. 4 показана динамика прироста по диаметру для модельного дерева с контрольного участка (модель 1) и для 2 деревьев, типичных для 1-й и 2-й групп (модели 2 и 3 соответственно).

Рис. 4. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной на ПП и контрольном участке (1, 2, 3 – номера моделей)

Fig. 4. The dynamics of radial increment of Scots pine on the SP and the control plot (1, 2, 3 – model numbers)



Рубки привели к более равномерному распределению ресурсов между оставшимися деревьями, что подтверждается снижением стандартного отклонения величины $S_{o,d}$ с $2,2 \text{ м}^2$ до рубки до $1,9 \text{ м}^2$ – после. В 2001 и 2015 гг. после рубки $S_{o,d}$ увеличилась для модели 2 на 1,2 и $3,8 \text{ м}^2$ соответственно, а для модели 3 – на 3,6 и $5,2 \text{ м}^2$ соответственно. Пример перераспределения доступного ресурса в результате рубок приведен на рис. 5, где показана динамика области доминирования для модели 3.

Для количественной оценки напряженности конкуренции за доступный ресурс между деревом и его ближайшими соседями предлагается использовать КК в соответствии с выражением

$$\text{КК} = 1 - S_{o,d} / S_f,$$

где S_f – площадь свободного роста дерева (м^2), рассчитанная по методике, описанной в работе [4].

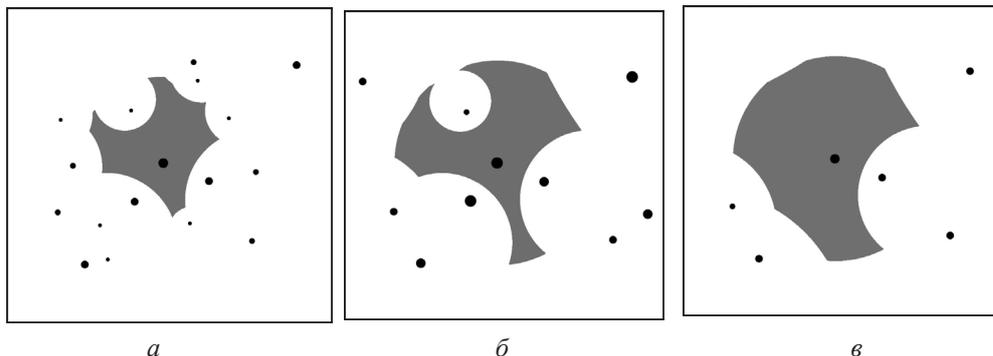


Рис. 5. Область доминирования дерева для модели 3: *a* – в 37 лет до рубки; *б* – в 37 лет после рубки; *в* – в 51 год после рубки (черные круги – стволы деревьев)

Fig. 5. The dominance area of the tree for the model: *a* – at 37 years before cutting; *б* – at 37 years after cutting; *в* – at 51 years after cutting (black circles mark the tree stems)

КК меняется в пределах от 0 до 1 и показывает, какая доля ресурса, необходимого для свободного роста дерева, перераспределяется между его ближайшими соседями. Для модели 3 КК составляет в возрасте 37 лет до рубки, 37 лет после рубки и 51 года после рубки 0,64, 0,56 и 0,50 соответственно, что говорит о существенном снижении конкуренции между деревьями в результате проведенных прореживаний.

Ранее отмечалось, что у деревьев с $S_{o,d}$ менее 40 % от S_f (что соответствует КК > 0,6) темпы роста по диаметру ствола существенно снижаются [4]. У таких деревьев формируется разреженная крона протяженностью менее 40 % от высоты дерева. Это, в свою очередь, приводит к отставанию в росте и переходу к угнетенному состоянию.

Заключение

Между таксационными характеристиками и компонентами фитомассы деревьев существует тесная связь. Проведенные исследования показывают, что коэффициент корреляции площади проекции кроны сосны обыкновенной с площадью области доминирования в рассматриваемых средневозрастных сосновых древостоях составляет 0,84. Проекция кроны практически не выходит за пределы области доминирования. Об этом говорят и средние площади кроны и областей доминирования, которые составляют $4,6 \pm 1,6$ и $6,3 \pm 1,9$ м² соответственно.

Корневая система деревьев сосны изучаемых насаждений имеет компактные размеры и, несмотря на высокую полноту древостоя, благодаря достаточности питательных веществ в почве и отсутствию дефицита влаги обеспечивает интенсивный рост деревьев, соответствующий условиям I класса бонитета. В данных условиях средняя площадь корневой системы соразмерна средней площади области доминирования.

Предложенный коэффициент конкуренции основан на оценке доли доступного ресурса, отчуждаемого от дерева в пользу ближайших соседей. Информация о достижении древостоем критических значений данного коэффициента может быть использована для своевременного принятия решений о рубке и ее интенсивности, что позволит повысить продуктивность древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агрохимические методы исследования почв / отв. ред. А.В. Соколов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1975. 656 с.
Agrochemical Methods of Soil Research. Ed.-in-chief A.V. Sokolov. 5th ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1975. 656 p. (In Russ.).
2. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Моск. ун-т, 1970. 487 с.
Arinushkina E.V. Manual of Chemical Analysis of Soils. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Moscow University Publ., 1970. 487 p. (In Russ.).
3. Борисов А.Н. Метод оценки распределения ресурса между деревьями в древостое // Состояние лесов и актуальные проблемы лесоуправления: материалы Всерос. конф. с междунар. участием / отв. ред. А.П. Ковалев. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 293–296.
Borisov A.N. The Method of an Estimation of Sharing of a Resource between Trees in a Forest Stand. *State of the Forests, Actual Problems of Forestry and Forest Management: Proceedings of All-Russian Conference with International Participation*. Exec. ed. A.P. Kovalev. Khabarovsk, Far East Forestry Research Institute. Press, 2013, pp. 293–296. (In Russ.).
4. Борисов А.Н., Иванов В.В., Петренко А.Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 7–18.
Borisov A.N., Ivanov V.V., Petrenko A.E. Spatial Structure of Pine Stands Formed by Improvement Cuttings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2019, no. 1, pp. 7–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010042>
5. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С., Собачкин Д.С., Собачкин Р.С. Естественное изреживание разногустотных молодняков в экспериментальных посадках сосны // Хвойные бореал. зоны. 2008. Т. XXV, № 3–4. С. 244–249.
Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Sobachkin D.S., Sobachkin R.S. Natural Thinning of Young Stands of Different Density in Experimental Pine Plantations. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2008, vol. XXV, no. 3–4, pp. 244–249. (In Russ.).
6. Вайс А.А. Оптимизация горизонтальной структуры смешанных разновозрастных пихтовых древостоев // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 2(35). С. 17–21.
Vajs A.A. Optimization of the Horizontal Structure of Mixed Uneven-Aged Fir Stands. *Lesnaya taksatsiya i lesoustrojstvo = Forest Inventory and Forest Planning*, 2005, no. 2(35), pp. 17–21. (In Russ.).
7. Вайс А.А. Аллометрические закономерности соотношения фитомассы хвои и диаметров деревьев в сосновых разнополнотных древостоях Приангарского района // Междунар. журн. эксперим. образования. 2015. № 11, ч. 2. С. 303–304.
Vajs A.A. Allometric Patterns of the Ratio of the Phytomass of Needles and Tree Diameters in Pine Stands of Different Sizes in the Priangarskiy Region. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of Experimental Education*, 2015, no. 11-2, pp. 303–304. (In Russ.).
8. Ильинский В.В. Биомасса сосны в насаждениях различных бонитетов // Лесн. хоз-во. 1968. № 3. С. 34.
Il'inskij V.V. Pine Biomass in Stands of Different Quality Levels. *Lesnoe khozyajstvo*, 1968, no. 3, p. 34. (In Russ.).
9. Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2013. 207 с.
Kuz'michev V.V. *Patterns of Tree Stand Dynamics: Principles and Models*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Sib. branch), 2013. 207 p. (In Russ.).
10. Нагимов З.Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2000. 40 с.
Nagimov Z.Ya. *Patterns of Growth and Formation of Aboveground Phytomass of Pine Stands: Doc. of Agric. Sci. Diss. Abs.* Yekaterinburg, 2000. 40 p. (In Russ.).

11. Рахтеенко И.Н. Корневые системы древесных и кустарниковых пород. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 107 с.
Rakhteenko I.N. *Root Systems of Trees and Shrubs*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 107 p. (In Russ.).
12. Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 165 с.
Semechkina M.G. *The Structure of the Phytomass of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Sib. Branch), 1978. 165 p. (In Russ.).
13. Стаканов В.Д. Распределение органического вещества в различных частях деревьев сосны обыкновенной // Лесоведение. 1990. № 4. С. 25–33.
Stakanov V.D. Distribution of Organic Matter in Different Parts of Scots Pine Trees. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1990, no. 4, pp. 25–33. (In Russ.).
14. Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 600 с.
Tkachenko M.E. *General Forestry*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 600 p. (In Russ.).
15. Шанин В.Н. Моделирование горизонтального распространения корней деревьев в различных условиях местообитания // Лесоведение. 2015. № 2. С. 130–139.
Shanin V.N. Modeling of Lateral Distribution of Tree Roots of Various Forest Types. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 130–139. (In Russ.).
16. Шапченкова О.А., Ковалева Н.М., Иванов В.В., Собачкин Р.С., Собачкин Д.С., Петренко А.Е. Влияние азотных удобрений на свойства подстилки и живой напочвенный покров в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 1. С. 44–51.
Shapchenkova O.A., Kovaleva N.M., Ivanov V.V., Sobachkin R.S., Sobachkin D.S., Petrenko A.E. Effect of Nitrogen Fertilizers on the Ground Cover and the Properties of a Forest Floor in Pine Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 1, pp. 44–51. (In Russ.).
17. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / Федер. агентство лесн. хоз-ва, Междунар. ин-т приклад. систем. анализа. 2-е изд., доп. М., 2008. 886 с.
Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Nilsson S., Buluy Yu.I. *Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia (Standard and Reference Materials)*. Federal Agency of Forest Management, International Institute for Applied Systems Analysis. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, 2008. 886 p. (In Russ.).
18. Costa E.A., Finger C.A.G., Fleig F.D. Modelagem do Espaço de Crescimento para Araucária = Modelling Growing Space for Araucaria. *Ciência Florestal*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 725–734. (In Port.). <https://doi.org/10.5902/1980509832085>
19. Krejza J., Světlík J., Pokorný R. Spatially Explicit Basal Area Growth of Norway Spruce. *Trees*, 2015, vol. 29, pp. 1545–1558. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1236-x>
20. Linkevičius E., Kuliešis A., Röhle H., Schröder J., Aleinikovas M. The Impact of Competition for Growing Space on Diameter, Basal Area and Height Growth in Pine Trees. *Baltic Forestry*, 2014, vol. 20, no. 2(39), pp. 301–313.
21. O'Rourke S., Kelly G.E. Spatio-temporal Modelling of Forest Growth Spanning 50 Years – the Effects of Different Thinning Strategies. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, vol. 26, pp. 101–104. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.05.008>
22. Sharma R.P., Bílek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling Crown Width–Diameter Relationship for Scots Pine in the Central Europe. *Trees*, 2017, vol. 31, pp. 1875–1889. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1593-8>

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 582.475:581.45:57.087

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-51-63

Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть II. Моделирование площади поверхности иглы

С.И. Тарасов, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [A-7112-2016](https://orcid.org/0000-0003-2081-5090),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-5090>

Н.В. Герлинг[✉], канд. биол. наук; *ResearcherID*: [Q-2273-2015](https://orcid.org/0000-0001-5224-8452),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8452>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28,
г. Сыктывкар, Россия, 167982; tarasov@ib.komisc.ru, gerling@ib.komisc.ru[✉]

Поступила в редакцию 14.07.22 / Одобрена после рецензирования 10.10.22 / Принята к печати 12.10.22

Аннотация. В эколого-физиологических исследованиях растительного покрова преобладающее участие листьев в процессах фотосинтеза, транспирации и дыхания определяет ключевую роль такого морфометрического параметра, как площадь поверхности листа. Оценка площади иглоподобных листовых органов хвойных часто требует индивидуального подхода. Многообразие форм игл хвои детерминируется видовой принадлежностью, морфологической структурой, экологическими условиями и возрастом и, в свою очередь, определяет многообразие методов оценки площади поверхности хвои. Поэтому поиск простых стандартных методов установления площади поверхности листовых органов хвойных для физиологов растений является актуальной задачей. Цель работы – создать универсальную модель оценки площади поверхности иглы (хвоинки), не зависящую от видовой принадлежности. Для достижения цели использовалась предложенная авторами модель поперечного сечения иглы, основанная на трансформации периметра поперечного сечения в эквивалентную окружность, периметр которой связан с параметрами поперечного сечения иглы до трансформации. Для оценки площади поверхности иглы возможно аппроксимировать хвоинку геометрическим телом, представляющим собой комбинацию эллипсоида вращения, конуса и цилиндра, при этом радиус цилиндра оценивается с использованием модели поперечного сечения иглы. Модель позволяет оценивать площадь поверхности иглы по 4 ее морфометрическим параметрам: толщине, ширине, длине средней части и общей длине. Полная верификация предлагаемой в статье модели оказалась неосуществимой из-за того, что нет методов точной оценки площади поверхности иглы. На хвое пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) и можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.), а также плодах банана (*Musa paradisiaca* L.) проведено сравнение разработанного метода с другими методами оценки площади поверхности иглоподобных образцов, показана хорошая предсказательная способность модели. Ее можно охарактеризовать как универсальную с теоретической относительной погрешностью не более 5 %.

Ключевые слова: хвойные, площадь поверхности иглы, периметр поперечного сечения иглы, эквивалентный радиус, моделирование

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем Европейского Северо-Востока России» (регистрационный номер темы – 122040100031-8).

Для цитирования: Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть II. Моделирование площади поверхности иглы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 51–63. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-51-63>

Original article

Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part II. Modeling the Needle Surface Area

Sergei I. Tarasov, Candidate of Biology; ResearcherID: [A-7112-2016](https://orcid.org/0000-0003-2081-5090),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-5090>

Natalya V. Gerling[✉], Candidate of Biology; ResearcherID: [Q-2273-2015](https://orcid.org/0000-0001-5224-8452),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8452>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Komi Republic, Russian Federation; tarasov@ib.komisc.ru, gerling@ib.komisc.ru[✉]

Received on July 14, 2022 / Approved after reviewing on October 10, 2022 / Accepted on October 12, 2022

Abstract. In ecological and physiological studies of plant cover, the predominant participation of leaves in the processes of photosynthesis, transpiration and respiration determines the key role of such a morphometric parameter as leaf surface area. The estimation of the area of needle-like leaf organs of conifers often requires an individual approach. The diversity of needle shapes is determined by species affiliation, morphological structure, ecological conditions and age, and, in turn, determines the diversity of methods for estimating the needle surface area. Therefore, the search for simple standard methods for determining the surface area of leaf organs of conifers is an urgent task for plant physiologists. The aim of this work has been to create a universal model for estimating the needle surface area, independent of species. To achieve it, the needle cross-section model proposed by the authors has been used, based on the transformation of the perimeter of the cross-section into an equivalent circle, the perimeter of which is associated with the parameters of the needle cross-section before the transformation. To estimate the surface area of the needle, it is possible to approximate the needle with a geometric body, which is a combination of an ellipsoid of revolution, a cone and a cylinder, with the radius of the cylinder being estimated using the needle cross-section model. The model allows to estimate the surface area of the needle by its 4 morphometric parameters: thickness, width, length of the middle part and total length. Full verification of the model proposed in the article has turned out to be impossible due to the lack of methods for accurate estimation of the needle surface area. The developed method has been compared to other methods for estimating the surface area of needle-like samples by the examples of the needles of Siberian fir (*Abies sibirica* L.) and common juniper (*Juniperus communis* L.), as well as banana fruits (*Musa paradisiaca* L.), and the good predictive ability of the model has been demonstrated. It can be characterized as universal with a theoretical relative error of no more than 5 %.

Keywords: conifers, needle surface area, needle cross-section perimeter, equivalent radius, modeling

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the research topic “Zonal Patterns of the Dynamics of the Structure and Productivity of Primary and Anthropogenically Modified Phytocenoses of Forest and March Ecosystems of the European North-East of Russia” (state registration no. 122040100031-8).



For citation: Tarasov S.I., Gerling N.V. Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part II. Modeling the Needle Surface Area. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-51-63>

Введение

Любая система, в т. ч. биологическая, обменивается веществом и энергией с окружающей средой через граничные поверхности. Поверхность листьев, стеблей и корней является естественным барьером высших растений, через который реализуется и контролируется связь со средой обитания, поэтому площадь поверхности раздела является важным параметром в эколого-физиологических исследованиях растительных сообществ. Доминирующее участие листьев в процессах ассимиляции [12], транспирации [15] и дыхания, эмиссии летучих органических соединений [2] определяет повышенное внимание к такому морфометрическому параметру, как площадь поверхности листа. Ее точная оценка важна для биогеохимических моделей, приложений дистанционного зондирования и деятельности лесных экологов [4]. Адекватность установления площади поверхности листа определяет и верность оценки связанных с ней физиологических показателей.

В некоторых работах, в которых выполняется оценка физиологических параметров, зависящих от площади поверхности листовых органов, площадь поверхности не указывается [6, 8, 22] или не приводится методика ее оценки [11, 23]. Это затрудняет сравнение результатов. В настоящее время существует тенденция использования для оценки площади поверхности листовых органов оптических сканеров, например измерителя площади поверхности LI-3100C [7, 20], систем анализа изображений WinSEEDLE [26] и WinRHIZO [27]. Однако сканирование чувствительно к ошибкам в предположениях о геометрии поперечного сечения, поэтому рассчитанная площадь поверхности листьев может значительно отличаться от фактической, что в превосходящей степени характерно для листовых органов хвойных [4]. Оценки площади поверхности листовых органов растений на основе аллометрических моделей обычно являются наиболее точными, особенно для голосеменных [10]. Таким образом, разработка простых стандартных методов определения площади поверхности листьев остается для физиологов растений одной из важных задач.

Методы определения площади поверхности листовых органов высших растений разнообразны. Выбор конкретного метода определяется морфологическими особенностями листа, требуемой точностью измерения, оборудованием и временем, которыми располагает исследователь.

Установление площади поверхности листьев покрытосеменных растений не вызывает затруднений: есть большое количество методов оценки площади поверхности плоских листовых пластинок [9], которые не являются видоспецифичными.

Геометрия поверхности иглоподобных листовых органов хвойных, самых многочисленных представителей отдела голосеменных растений, значительно отличается от геометрии плоской поверхности листьев покрытосеменных. Определение площади поверхности игл хвойных часто требует индивидуального подхода [3–5, 13, 14, 17, 18, 24].

При всем разнообразии методы определения площади поверхности листовых органов хвойных остаются в рамках одной концепции: каждая иглолка конкретного вида рассматривается как независимый морфологический элемент, для которого разрабатывается индивидуальная модель. Однако значительная вариабельность формы игл хвойных делает такой подход непродуктивным, что обуславливает актуальность разработки общего метода оценки востребованных параметров листовых органов хвойных. Искомый метод может быть основан на общих для игл всех видов хвойных морфологических особенностях, в этом случае они будут применены для оценки интересующих исследователя параметров.

Цель данной работы – создать универсальную модель оценки площади поверхности иглы, опирающуюся на общие морфологические особенности листовых органов хвойных. Более конкретно данная цель может быть сформулирована так: используя относительно легко измеряемые параметры хвоинки (ширину, толщину и длину), оценить ее менее легко измеряемые параметры (площадь поверхности) независимо от видовой принадлежности.

Объекты и методы исследования

Отбор образцов хвои с целью оценки площади поверхности листовой пластинки проводили в чернично-сфагновом ельнике, расположенном в бореальной зоне Северо-Востока европейской части России (Республика Коми, Княжпогостский район, $62^{\circ}16'03''$ с. ш. $50^{\circ}41'07''$ в. д.). Из побегов 1–3-го годов развития было отобрано 30 экземпляров хвои пихты сибирской и 31 – можжевельника обыкновенного. Побеги пихты выбирались из средней части кроны 10 деревьев, входящих в 1-й ярус древостоя, можжевельника – из средней части кроны 10 здоровых кустов вида.

В рамках разработанной методики для оценки площади поверхности одной хвоинки измеряли ширину в средней части (W), толщину и длину (L) хвоинки. Ширину устанавливали измерительной лупой ЛИ-3-10× (ГОСТ 25706–83) с погрешностью $\pm 0,05$ мм, длину – измерительной линейкой (ГОСТ 427–75) с погрешностью $\pm 0,5$ мм.

В связи с отсутствием специализированных приборов для измерения площади поверхности листовых органов растений для проверки применимости методики дополнительно было рассмотрено 37 плодов растения рода банан, форма которых близка к форме листовых органов хвойных и легко поддается измерению. Оценку площади поверхности плодов банана осуществляли методом линейной аппроксимации: плод очищали, шкурку распрямляли, затем ее площадь приближали к геометрическим фигурам (прямоугольникам и треугольникам), площадь которых вычисляется по известным формулам, площади суммировали. Линейные размеры геометрических фигур устанавливались измерительной линейкой с погрешностью $\pm 0,5$ мм.

Если известен средний периметр иглы, то площадь поверхности иглы оценивается как произведение этого показателя на длину иглы. Однако в силу того, что форма иглы отличается от цилиндра и, как правило, имеет сужения на концах, определение среднего периметра связано с очевидными трудностями.

Напротив, максимальные ширину и толщину иглы определить просто. Зная максимальную ширину и толщину поперечного сечения иглы, можно найти максимальный эквивалентный радиус $R_{\max cs}$. Так как теория,

развитая при моделировании периметра поперечного сечения иглы, справедлива и для ее продольного сечения, естественно применить ее для оценки площади поверхности иглы, используя максимальный эквивалентный радиус.

Однако анализ показал, что непосредственное применение данного подхода к оценке площади поверхности иглы и уравнение, получающееся в результате, не очень удобны с практической точки зрения. Поэтому для оценки площади поверхности иглы был разработан другой метод, в основу которого положен эквивалентный радиус в среднем сечении иглы.

Как правило, у иглы всегда можно выделить в средней части участок, на протяжении которого средний эквивалентный радиус остается постоянным (или почти постоянным). Для данного участка средний эквивалентный радиус R_{cs} любого поперечного сечения будет приблизительно равен эквивалентному радиусу в середине участка. При трансформации каждого поперечного сечения иглы в окружность со средним эквивалентным радиусом данный участок трансформируется в цилиндр. Рассмотрим, какие формы примут при этом части иглы, прилегающие к этому цилиндру – вершухка и основание.

Формы вершухек и оснований иголок разнообразны [16], однако, как и форма поперечного сечения иглы, они могут быть сведены к нескольким простым фигурам. Будем рассматривать эллипсоид вращения и конус в качестве предельных форм всего разнообразия форм оснований и вершухек игл. При описании вершухки и основания иглы с помощью эллипсоида вращения и конуса возможны 3 модели формы иглы: 1) эллипсоид–цилиндр–эллипсоид (рис. 1); 2) конус–цилиндр–конус (рис. 2); 3) эллипсоид–цилиндр–конус (рис. 3).

В первом случае (модель 1) площадь поверхности иглы может быть найдена как сумма 1/2 площади поверхности эллипсоида вращения с полуосями h_1 и R_{cs} , 1/2 площади поверхности эллипсоида вращения с полуосями h_2 и R_{cs} и площади цилиндра длиной l и радиусом R_{cs} (рис. 1).

Рис. 1. Эллипсоид вращения как основа модели иглы (l – длина цилиндрической части иглы; h_1 – длина вершины иглы; h_2 – длина основания иглы)

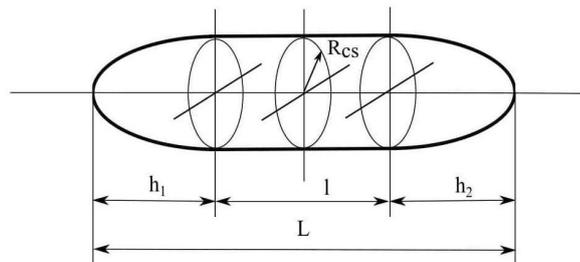


Fig. 1. The ellipsoid of revolution as the basis of the needle model (l – length of the cylindrical part of the needle; h_1 – length of the needle apex; h_2 – length of the needle base)

Уравнение для расчета общей площади поверхности иглы имеет вид

$$S_{total1} = \frac{1}{2} S_{ell1} + \frac{1}{2} S_{ell2} + S_{cyl} = \pi R_{cs} \left(R_{cs} + \frac{h_1^2}{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}} \arcsin \frac{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}}{h_1} \right) + \pi R_{cs} \left(R_{cs} + \frac{h_2^2}{\sqrt{h_2^2 - R_{cs}^2}} \arcsin \frac{\sqrt{h_2^2 - R_{cs}^2}}{h_2} \right) + 2\pi R_{cs} l,$$

где S_{ell1} , S_{ell2} – площади поверхности эллипсоидов вращения; S_{cyl} – площадь поверхности цилиндра.

Соответственно, во втором случае (модель 2) площадь поверхности может быть найдена как сумма площадей 2 конусов с радиусами основания R_{cs} и образующими $\sqrt{h_1^2 + R_{cs}^2}$ и $\sqrt{h_2^2 + R_{cs}^2}$ и площади цилиндра длиной l и радиусом R_{cs} (рис. 2).

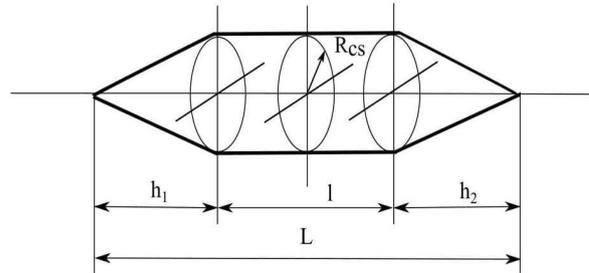


Рис. 2. Конус как основа модели иглы

Fig. 2. The cone as the basis of the needle model

Уравнение для расчета общей площади поверхности иглы в этом случае примет вид

$$S_{total2} = S_{cone1} + S_{cone2} + S_{cyl} = \pi R_{cs} \sqrt{h_1^2 + R_{cs}^2} + \pi R_{cs} \sqrt{h_2^2 + R_{cs}^2} + 2\pi R_{cs} l,$$

где S_{cone1} , S_{cone2} – площади поверхности конусов.

Возможен 3-й вариант модели формы иглы (модель 3), включающий элементы эллипсоида вращения и конуса (рис. 3).

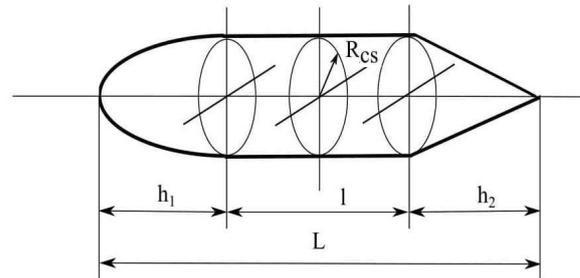


Рис. 3. Комбинация эллипсоида вращения и конуса как основа модели иглы

Fig. 3. The combination of an ellipsoid of revolution and a cone as the basis of the needle model

Уравнение для расчета общей площади поверхности иглы в этом случае будет следующим:

$$S_{total3} = \frac{1}{2} S_{ell1} + S_{cone2} + S_{cyl} = \pi R_{cs} \left(R_{cs} + \frac{h_1^2}{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}} \arcsin \frac{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}}{h_1} \right) + \pi R_{cs} \sqrt{h_2^2 + R_{cs}^2} + 2\pi R_{cs} l.$$

Модели 1 и 2 являются гипотетическими, найти в природе формы игл на основе только эллипсоида вращения или только конуса маловероятно. Форма иглы на основе эллипсоида вращения и конуса (модель 3) занимает промежуточное положение между первыми двумя формами. По аналогии с поперечным сечением иглы введем ограничение: будем считать, что большинство возможных форм игл являются промежуточными между формами моделей 1 и 2 и, соответственно, рассмотрим только те иглы, форма которых занимает промежуточное положение между этими моделями. По данному ограничению в качестве универсальной модели формы иглы примем модель 3. Площадь поверхности, рассчитанная по уравнению для этой модели, занимает промежуточное

положение между площадью поверхности моделей 1 и 2 и равна среднему этих площадей. То есть площадь поверхности для модели 3 может быть принята в качестве оценки площади поверхности иглы любой (или почти любой) формы, удовлетворяющей принятому ограничению.

Оценим ошибку при расчете площади поверхности иглы с использованием модели 3. Максимальная ошибка будет получена, если форма иглы соответствует модели 1 или 2, но площадь поверхности иглы рассчитывается как для модели 3:

$$\delta_{\max 1} = \frac{S_{total1} - S_{total3}}{S_{total3}};$$

$$\delta_{\max 2} = \frac{S_{total2} - S_{total3}}{S_{total3}}.$$

Очевидно, $\delta_{\max 1} = \delta_{\max 2} = \delta_{\max}$. Если $l = 0$, то $\delta_{\max} = 22\%$, что неприемлемо для научных исследований.

Однако у реальных игл l всегда больше 0. Рассмотрим, как будет меняться δ_{\max} в зависимости от l , h_1 , h_2 и R_{cs} .

Анализ формы и размеров 78 игл из родов *Abies*, *Pinus*, *Picea*, *Larix*, *Cedrus* и *Juniperus* [16, 21, 25], которые не являются плоскими и могут рассматриваться как многогранники произвольной формы, показал, что максимальная длина иглы составляет 450 мм, минимальная – 6 мм; максимальная ширина – 2,5 мм, минимальная – 0,5 мм; максимальная толщина – 0,6 мм, минимальная – 0,3 мм. Максимальный R_{cs} , соответствующий максимальной ширине и толщине иглы, равен 0,9 мм, минимальный, соответствующий минимальным ширине и толщине, – 0,2 мм. Далее мы предположили, что у большинства игл $h_1 = h_2 = h$ и что h может принимать значения от $2R_{cs}$ до $4R_{cs}$, соответственно, l определяли как $l = L - 2h$. Нужно отметить, что точные h_1 и h_2 у реальных игл установить сложно или даже невозможно, т. к. не существует явно выраженной границы перехода верхушки (или основания) в цилиндрическую часть. Взяв минимальный и максимальный R_{cs} , рассматривали зависимость относительной ошибки оценки площади поверхности иглы δ_{\max} от h и L , при изменении последних от минимального до максимального значений. Полученные зависимости в графическом виде представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что в диапазоне допустимых (т. е. встречающихся в природе) соотношений L , h , l и R_{cs} относительная погрешность результата оценки площади поверхности не превышает 5%, при увеличении длины иглы ошибка уменьшается.

Таким образом, с учетом принятых допущений при оценке площади поверхности иглы с использованием модели 3 относительная ошибка составляет не более 5%. Следует отметить, что при практическом применении формулы для модели 3 единицы измерения h_1 , h_2 и R_{cs} необходимо выбирать так, чтобы аргумент арксинуса был меньше 1.

Результаты исследования и их обсуждение

Отсутствие возможности определить площадь поверхности иглы с точностью, которая соответствовала бы эталонным измерениям, исключает оценку практической применимости метода оценки площади поверхности иглы с использованием модели 3. Однако мы располагаем данными о площадях поверхности хвой пихты и можжевельника, полученными нами в ходе других исследований.

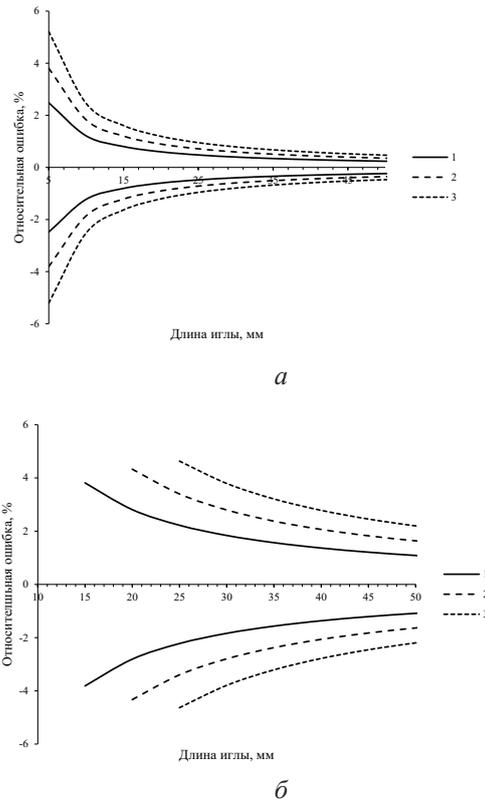


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки результата оценки площади поверхности иглы от L и h при R_{cs}^- , равном: $a - 0,2$ мм; $b - 0,9$ мм ($1 - h = 2R_{cs}^-$; $2 - h = R_{cs}^-$; $3 - h = 4R_{cs}^-$)

Fig. 4. The dependence of the relative error of the needle surface area estimation result on L and h at R_{cs}^- equal to: $a - 0.2$ mm; $b - 0.9$ mm ($1 - h = 2R_{cs}^-$; $2 - h = 3R_{cs}^-$; $3 - h = 4R_{cs}^-$)

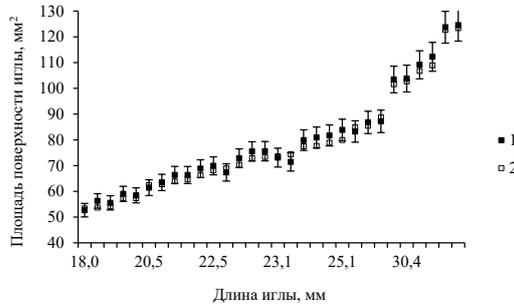
Мы оценили площади поверхности 30 хвоинок пихты и 31 хвоинки можжевельника, рассчитывая их как произведение среднего периметра сечения иглы и ее длины. Для игл пихты средний периметр устанавливался по ширине хвоинки в ее средней части на основе корреляционного соотношения $\bar{P} = 304,02 + 2,29W$ [1], для можжевельника – $\bar{P} = 197,6 + 2,2W$ (неопубликованные данные).

При сравнении метод, основанный на модели 3, обозначали как метод 1, с которым сравнивали, – метод 2. Сопоставление абсолютных площадей поверхности хвои пихты приведено на рис. 5, а. Из него видно, что порядок величин совпадает, разница между оценками площади поверхности иглы, полученными разными методами, для пихты в среднем составляет 1,7 %. Площади поверхности, рассчитанные по методу 2, находятся внутри 5%-го интервала, определяющего относительную погрешность метода 1. Средние значения $h_1 = 2,1 R_{cs}^-$, $h_2 = 2,8 R_{cs}^-$.

Регрессионный анализ Пассинга–Баблока [19], выполненный для двух методов оценки площади поверхности хвои пихты при уровне значимости 0,05, показал следующий результат. CUSUM-тест подтвердил линейную зависимость между оценками площади поверхности хвои, полученными разными методами ($h_{\text{стат}} = 1,25$; $p = 0,08787$), что указывает на возможность применения данного вида анализа к исходным данным. Диаграмма рассеяния приведена на рис. 5, б. Уравнение регрессии: $y = -0,67468 + 0,98603x$; 95%-е доверительные интервалы для пересечения $(-2,83675; 2,40345)$ и для наклона $(0,94599; 1,01514)$ указывают на хорошее согласие методов. 95%-й доверительный интервал для пересечения включает значение 0, следовательно, можно полагать, что нет существенной

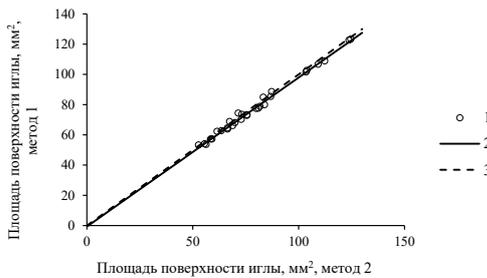
разницы между полученным значением пересечения и 0, а также систематического смещения между двумя методами. 95%-й доверительный интервал для наклона включает 1, т. е., вероятно, нет существенной разницы между полученным наклоном и 1, как и пропорционального смещения между двумя методами. В целом можно предположить, что методы не имеют существенных различий.

Рис. 5. Сравнение методов оценки площади поверхности хвои пихты: *a* – зависимость площади поверхности иглы от ее длины (1, 2 – методы 1 и 2 соответственно); *б* – регрессионный анализ Пассинга–Баблока для двух методов (1 – исходные данные; 2 – линия регрессии; 3 – линия идентичности)



a

Fig. 5. The comparison of the methods for estimating the surface area of fir needles: *a* – dependence of the needle surface area on its length (1, 2 – methods 1 and 2, respectively); *б* – Passing–Bablok regression analysis for two methods (1 – initial data; 2 – regression line; 3 – identity line)

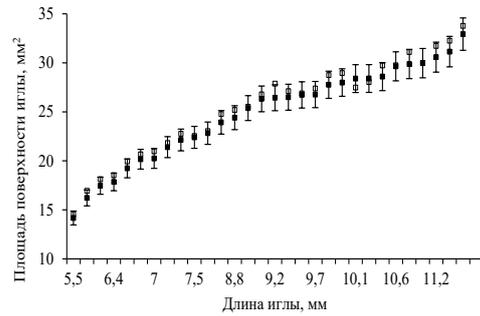


б

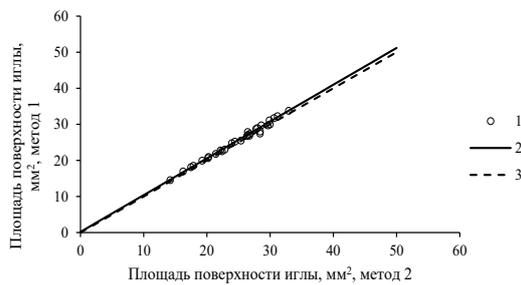
Сравнение абсолютных значений площади поверхности хвои можжевельника приведено на рис. 6, *a*. Порядок величин совпадает, разница между оценками площади поверхности иглы, полученными разными методами, для можжевельника в среднем составляет 2,4 %. Площади поверхности, определенные по методу 2, находятся внутри 5%-го интервала. Средние значения $h_1 = 1,2 R_{cs}$, $h_2 = 2,2 R_{cs}$. Подстановка средних значений h_1 и h_2 в расчетное уравнение дает значительное расхождение оценок.

Регрессионный анализ Пассинга–Баблока двух методов оценки площади поверхности хвои для можжевельника при уровне значимости 0,05 дал такие результаты. CUSUM-тест: $h_{\text{стат}} = 1,25$; $p = 0,08787$; зависимость между оценками площади поверхности хвои можжевельника линейна. Диаграмма рассеяния приведена на рис. 6, *б*. Уравнение регрессии: $y = 0,19136 + 1,0198x$; 95%-е доверительные интервалы для пересечения $(-0,38742; 1,06253)$ и для наклона $(0,97986; 1,04732)$ указывают на хорошее согласие методов. Отсюда следует вывод, что между методами нет существенной разницы.

Эксперимент по оценке площади поверхности 37 плодов банана показал, что $h_1 \approx h_2 = h$, в среднем $h = 2,065 R_{cs}$. Результаты оценки площади поверхности плодов банана двумя методами приведены на рис. 7, *a*.



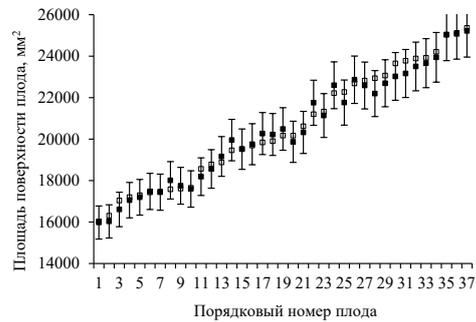
а



б

- 1 Рис. 6. Сравнение методов оценки площади поверхности хвои можжевельника: а – зависимость площади поверхности хвоинки от ее длины; б – регрессионный анализ Пассинга–Баблока для двух методов (условные обозначения 1–3 – см. рис. 5)

Fig. 6. The comparison of the methods for estimating the surface area of juniper needles: а – dependence of the needle surface area on its length; б – Passing–Bablok regression analysis for two methods (for symbols 1–3 see fig. 5)



а



б

- 1 Рис. 7. Сравнение методов оценки площади поверхности плодов банана: а – зависимость площади поверхности плода банана от его геометрии; б – регрессионный анализ Пассинга–Баблока для двух методов (условные обозначения 1–3 – см. рис. 5)

Fig. 7. The comparison of the methods for estimating the surface area of banana fruits: а – dependence of the banana fruit surface area on the geometry of a particular fruit; б – Passing–Bablok regression analysis for two methods (for symbols 1–3 see fig. 5)

Средняя разница между оценками площади поверхности плода, полученными разными методами, в среднем составляет 0,4 %. Площади поверхности по данным непосредственных измерений (метод 2) находятся внутри 5%-го интервала, определяющего относительную погрешность метода 1.

Регрессионный анализ Пассинга–Баблока двух методов при уровне значимости 0,05 дал следующий результат: $h_{\text{стат}} = 1,147$; $p = 0,143836$, зависимость между оценками площади поверхности плодов линейна. Диаграмма рассеяния приведена на рис. 7, б. Уравнение регрессии: $y = 257,7316 + 0,98034x$; 95%-е доверительные интервалы для пересечения (1048,0024; –679,354) и для наклона (0,94249; 1,028613) указывают на хорошее согласие методов. Таким образом, между методами нет существенной разницы.

Поскольку альтернативные методы не верифицировались с помощью эталонных, только на основании проведенного анализа нельзя определить практическую точность оценки площади поверхности с помощью метода 1. Тем не менее очевидно, что предсказательная способность метода на основе модели 3 соответствует требованиям поставленной задачи. Возможность адекватной оценки площади поверхности образцов, отличных от хвои, является аргументом в пользу универсальности метода 1.

Заключение

На основе модели поперечного сечения иглы для хвойных разработана модель, позволяющая оценивать площадь поверхности иглы по 4 ее морфометрическим параметрам: толщине, ширине, длине средней части и общей длине. Модель показала хороший результат при сравнении с другими методами оценки площади поверхности игл. Сопоставление оценок площади поверхности игл, полученных с использованием модели, с эталонными оценками площади поверхности не проводилось. С учетом принятых при разработке модели допущений при оценке площади поверхности иглы с помощью предлагаемой модели теоретическая относительная ошибка составляет не более 5 %. Основное преимущество предлагаемой модели – универсальность, т. к. она разработана для игл, форма которых меняется в широких пределах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Новый подход к оценке площади поверхности хвои пихты сибирской // Лесоведение. 2021. № 2. С. 217–224.
Tarasov S.I., Gerling N.V. A New Approach to the Assessment of the Surface Area of the Siberian Fir Needles. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2021, no. 2, pp. 217–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020078>
2. Bäck J., Hari P., Hakola H., Juurola E., Kulmala M. Dynamics of Monoterpene Emissions in *Pinus sylvestris* During Early Spring. *Boreal Environment Research*, 2005, vol. 10, no. 5, pp. 409–424.
3. Benecke U. Surface Area of Needles in *Pinus radiata* – Variation with Respect to Age and Crown Position. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1979, vol. 9, no. 3, pp. 267–271.
4. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. The Use of Multiple Measurement Techniques to Refine Estimates of Conifer Needle Geometry. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 1, pp. 101–105. <https://doi.org/10.1139/x02-166>
5. Brand D.G. Estimating the Surface Area of Spruce and Pine Foliage from Displaced Volume and Length. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 17, no. 10, pp. 1305–1308. <https://doi.org/10.1139/x87-203>

6. Carter G.A., Smith W.K. Influence of Shoot Structure on Light Interception and Photosynthesis in Conifers. *Plant Physiology*, 1985, vol. 79, iss. 4, pp. 1038–1043. <https://doi.org/10.1104/pp.79.4.1038>
7. Černý J., Pokorný R., Haninec P., Bednář P. Leaf Area Index Estimation Using Three Distinct Methods in Pure Deciduous Stands. *Journal of Visualized Experiments*, 2019, vol. 150, art. no. e59757. <https://doi.org/10.3791/59757>
8. Coursolle C., Prud'homme G.O., Lamothe M., Isabel N. Measuring Rapid A–Ci Curves in Boreal Conifers: Black Spruce and Balsam Fir. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01276>
9. Daughtry C.S.T. Direct Measurements of Canopy Structure. *Remote Sensing Reviews*, 1990, vol. 5, iss. 1, pp. 45–60. <https://doi.org/10.1080/02757259009532121>
10. Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, f_{APAR} , and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing Environment*, 1999, vol. 70, iss. 1, pp. 29–51. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
11. Hari P., Nöjd P. The Effect of Temperature and PAR on the Annual Photosynthetic Production of Scots Pine in Northern Finland During 1906–2002. *Boreal Environment Research*, 2009, vol. 14 (suppl. A), pp. 5–18.
12. Ishii H., Hamada Y., Utsugi H. Variation in Light-Intercepting Area and Photosynthetic Rate of Sun and Shade Shoots of Two *Picea* Species in Relation to the Angle of Incoming Light. *Tree Physiology*, 2012, vol. 32, iss. 10, pp. 1227–1236. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps090>
13. Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. Review of Methods for *in situ* Leaf Area Index Determination. Part I. Theories, Sensors and Hemispherical Photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, vol. 121, iss. 1–2, pp. 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
14. Kerner H., Gross E., Koch W. Structure of the Assimilation System of a Dominating Spruce Tree (*Picea abies* (L.) Karst.) of Closed Stand: Computation of Needle Surface Area by Means of a Variable Geometric Needle Model. *Flora*, 1977, vol. 166, iss. 5, pp. 449–459. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)32165-5](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)32165-5)
15. Kozłowski T.T. Transpiration Rates of Some Forest Tree Species During the Dormant Season. *Plant Physiology*, 1943, vol. 18, iss. 2, pp. 252–260. <https://doi.org/10.1104/pp.18.2.252>
16. Krüssmann G. *Die Nadelgehölze: Eine Nadelholzkunde für die Praxis, auf. 3, neubearb.* Berlin, Hamburg, Parey Publ., 1979. 264 p. (In Germ.).
17. Lin J., Sampson D.A., Deckmyn G., Ceulemans R. Significant Overestimation of Needle Surface Area Estimates Based on Needle Dimensions in Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Canadian Journal of Botany*, 2002, vol. 80, no. 9, pp. 927–932. <https://doi.org/10.1139/b02-081>
18. Madgwick H.A.I. Estimation of Surface Area of Pine Needles with Special Reference to *Pinus resinosa*. *Journal of Forestry*, 1964, vol. 62, art. no. 636.
19. NCSS, *Statistical Software*. Available at: <https://www.ncss.com/software/ncss/ncss-documentation/#Regression> (accessed 24.01.22).
20. Pepin S., Livingston N.J., Whitehead D. Responses of Transpiration and Photosynthesis to Reversible Changes in Photosynthetic Foliage Area in Western Red Cedar (*Thuja plicata*) Seedlings. *Tree Physiology*, 2002, vol. 22, iss. 6, pp. 363–371. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.6.363>
21. *PLANTS Database*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Available at: <https://plants.sc.egov.usda.gov/home> (accessed 24.01.22).
22. Pliura A., Jankauskiene J., Lygis V., Suchockas V., Bajerkevičienė G., Verbylaite R. Response of Juvenile Progeny of Seven Forest Tree Species and Their Populations to Si-

culated Climate Change-Related Stressors, Heat, Elevated Humidity and Drought. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2018, vol. 11, iss. 3, pp. 374–388. <https://doi.org/10.3832/ifer2340-011>

23. Rayment M.B., Loustau D., Jarvi P.G. Measuring and Modeling Conductances of Black Spruce at Three Organizational Scales: Shoot, Branch and Canopy. *Tree Physiology*, 2000, vol. 20, iss. 11, pp. 713–723. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.11.713>

24. Swank W.T., Schreuder H.T. Comparison of Three Methods of Estimating Surface Area and Biomass for a Forest of Young Eastern White Pine. *Forest Science*, 1974, vol. 20, pp. 91–100.

25. *The Gymnosperm Database*. Available at: <https://www.conifers.org/zz/gymnosperms.php> (accessed 24.01.22).

26. Wyka T.P., Zytkowskiak R., Oleksyn J. Seasonal Dynamics of Nitrogen Level and Gas Exchange in Different Cohorts of Scots Pine Needles: a Conflict Between Nitrogen Mobilization and Photosynthesis? *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 483–493. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0947-x>

27. Yang F.O., Ou Y., Zhu T., Ma J., An S., Zhao J., Wang J., Kong L., Zhang H., Tigabu M. Growth and Physiological Responses of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) Supplemented with Monochromatic Red, Blue and Far-Red Light. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 2, art. no. 164. <https://doi.org/10.3390/f12020164>

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*5/6

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-64-75

Обобщенные модели фитомассы деревьев ивы (род *Salix* L.): мета-анализ

*А.А. Парамонов*¹, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABH-7242-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

В.А. Усольцев^{2,4}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [M-8253-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

С.В. Третьяков^{1,3}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

И.В. Цветков^{1,3}, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAU-6441-2021](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

*И.С. Цепордей*⁴, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-5377-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Usoltsev50@mail.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

⁴Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.22 / Одобрена после рецензирования 23.02.23 / Принята к печати 26.02.23

Аннотация. Изменение климата оказывает негативное воздействие на окружающую среду, в т. ч. на лесные экосистемы. Однако леса не только являются пассивными объектами, на которые направлено влияние изменения климата, но и благодаря своей способности поглощать и накапливать углерод могут сами существенно воздействовать на этот процесс. Связывание углерода лесными экосистемами играет важную роль в смягчении последствий изменения климата. Поэтому необходимо знание о количестве углерода, запасенного в лесной фитомассе, и все более актуальным становится точное определение фитомассы лесных деревьев. Вследствие поглощения углекислого газа в процессе роста растений и его высвобождения при сжигании древесины лес является источником углеродно-нейтральной энергии. Идея использования фитомассы в качестве источника энергии для замены ископаемого топлива наиболее перспективна в отношении быстрорастущих пород. К ним относятся ивы (род *Salix* L.), произрастающие в Европе, Азии, Америке и Африке и встречающиеся от тундры до тропиков. Ива успешно применяется как топливо во многих странах, она показывает превосходные рост и продуктивность даже на ювенильных стадиях и при определенных климатических условиях среди древесных растений характеризуется самой высокой способностью преобразовывать солнечное излучение в фитомассу. Короткоротационные план-

тации ив представляют собой экологически перспективный энергетический ресурс для снижения уровня парниковых газов. Поскольку разработка моделей фитомассы – трудоемкий процесс, применяются так называемые обобщенные мета-модели. Цель настоящего исследования состоит в построении обобщенных моделей надземной фитомассы и фитомассы фракций (листва, ветви, ствол, корни) деревьев ивы на основе мета-анализа данных. В ходе работы построены модели для оценки надземной фитомассы деревьев как по диаметру у основания ствола, так и по диаметру на высоте груди, информативность которых близка к функциональной, а смещения составляют лишь около 2 %. Поскольку каждая фракция фитомассы обладает специфичной углероддепонирующей способностью и вносит разный вклад в углеродный баланс, разработаны обобщенные модели для оценки массы листвы, ветвей, стволов и корней в связи с надземной фитомассой деревьев, объясняющие от 82 % (для листвы) до 99 % (для стволов и корней) общей изменчивости фитомассы.

Ключевые слова: *Salix* L., фитомасса ствола, надземная фитомасса, фитомасса фракций, обобщенная модель, мета-анализ, регрессионный анализ

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы – 123022800113-9).

Для цитирования: Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Цветков И.В., Цепордей И.С. Обобщенные модели фитомассы деревьев ивы (род *Salix* L.): мета-анализ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 64–75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-64-75>

Original article

Generic Models of Willow (genus *Salix* L.) Tree Phytomass: a Meta-Analysis

*Andrey A. Paramonov*¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Vladimir A. Usoltsev^{2,4}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Sergey V. Tretyakov^{1,3}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Ilya V. Tsvetkov^{1,3}, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAV-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

*Ivan S. Tsepordey*¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

²Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

⁴Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Received on November 28, 2022 / Approved after reviewing on February 23, 2023 / Accepted on February 26, 2023

Abstract. Climate change has a negative impact on the environment, including forest ecosystems. However, forests are not only passive objects affected by climate change, but also, due to their ability to absorb and accumulate carbon, they themselves can significantly influence this process. Carbon sequestration by forest ecosystems plays an important role in mitigating the effects of climate change. Therefore, it is necessary to know about the amount of carbon stored in forest phytomass, and it is becoming increasingly important to accurately determine the phytomass of forest trees. Due to the absorption of carbon dioxide during plant growth and its release during wood burning, forests are a carbon-neutral energy source. The idea of using phytomass as an energy source to replace fossil fuels is most promising for fast-growing species. These include willows (genus *Salix* L.), native to Europe, Asia, America and Africa and found from the tundra to the tropics. Willow is successfully used as fuel in many countries, showing excellent growth and productivity even at juvenile stages and, under certain climatic conditions, having the highest capacity among woody plants to convert solar radiation into phytomass. Short-rotation willow plantations represent an ecologically promising energy resource for reducing greenhouse gas levels. Since the development of phytomass models is a laborious process, so-called “generic meta-models” are used. The aim of this study has been to construct generic models of both aboveground phytomass and phytomass fractions (foliage, branches, stem, roots) of willow trees based on meta-analysis of data. In the course of the work, the models have been constructed for assessing the aboveground phytomass of trees both in diameter at the stem base and in diameter at breast height, the information content of which is close to functional, and the biases are only about 2 %. Since each fraction of phytomass has a specific carbon-sequestering capacity and makes a different contribution to the carbon balance, generic models have been developed to estimate the mass of foliage, branches, stems and roots in relation to the aboveground phytomass of trees, explaining from 82 % (for foliage) to 99 % (for stems and roots) of the total variability of phytomass.

Keywords: *Salix* L., stem phytomass, aboveground phytomass, phytomass fractions, generic model, meta-analysis, regression analysis

Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of the research effort carried out within the framework of the state assignment of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency (the topic registration no. 123022800113-9).

For citation: Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Tsvetkov I.V., Tsepordey I.S. Generic Models of Willow (genus *Salix* L.) Tree Phytomass: a Meta-Analysis. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 64–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-64-75>

Введение

Климатические изменения негативно влияют на окружающую среду, в т. ч. на лесные экосистемы. Однако леса не являются только пассивными объектами, подверженными влиянию изменения климата, – благодаря своей способности к поглощению и накоплению углерода они могут существенно воздействовать на этот процесс. Связывание углерода лесными экосистемами способно помочь в смягчении последствий изменения климата. Поэтому необходимо точное знание о количестве углерода, содержащегося в лесной фитомассе, и актуальность этого вопроса все возрастает [23].

Лес является источником углеродно-нейтральной энергии благодаря поглощению углекислого газа в процессе роста растений и его высвобождению при сжигании древесины [19]. Идея использования фитомассы в качестве альтернативного источника энергии наиболее перспективна в отношении быстрорастущих пород. К ним относится ива (красотал, тальник, лоза, ветла, лозина, верба, шелюга, ракита) – род *Salix* L. Ивы составляют довольно многочисленную группу растений в Европе, Азии, Америке и Африке и встречаются от тундры до тропиков [1]. Ива является одним из наиболее многообещающих видов топлива из фитомассы во многих странах. Она демонстрирует превосходные рост и продуктивность даже на ювенильных стадиях и при определенных климатических условиях обладает самой высокой среди древесных растений способностью преобразовывать солнечное излучение в фитомассу [31]. Короткоротационные плантации ив – это экологически перспективный энергетический ресурс, который мог бы позволить снизить количество парниковых газов в атмосфере [29].

При оценке фитомассы деревьев в мировой литературе получила распространение степенная (аллометрическая) функция [30], в логарифмированной форме имеющая вид

$$\ln P_i = a + b \ln D, \quad (1)$$

где P_i – масса в абсолютно сухом состоянии i -й фракции (ствол, ветви, хвоя, листва, корни), кг; a , b – коэффициенты уравнения; D – диаметр ствола, см.

Надежность текущих оценок запасов углерода в лесах и понимание динамики углерода в экосистемах могут быть улучшены путем использования существующих знаний об аллометрии деревьев в виде моделей (1), которые применимы непосредственно к данным таксации древостоев на пробных площадях [18]. Поскольку разработка моделей фитомассы является трудоемким процессом, существуют обобщенные (generic) модели, принцип построения которых был изложен ранее [28].

Для многовидовых тропических и субтропических лесов практически невозможно предложить аллометрическую модель оценки надземной фитомассы каждого вида [32]. Поэтому на обширном экспериментальном материале получают универсальные (обобщенные) многовидовые аллометрические модели [13]. Для более точных оценок надземной фитомассы конкретных видов предпочтительнее использовать видоспецифические модели [16]. При этом обобщенные модели дают приемлемую точность и небольшие смещения, главным образом для надземной фитомассы, поскольку масса кроны очень чувствительна к условиям среды [14].

В частности, изучение обобщенных моделей, разработанных на основе результатов моделирования надземной фитомассы для 6 видов растений Северной Америки, показало, что средние различия между значениями, предсказанными с помощью обобщенных моделей, и оценками по исходным моделям, как правило, находились в пределах погрешностей оценок, полученных по исходным моделям [24]. Исследование нескольких древесных и кустарниковых видов Австралии выявило, что линии регрессии надземной фитомассы для конкретного местообитания и вида находились в пределах 95%-го доверительного интервала ее прогнозирования на основе обобщенной модели [25].

Наш опыт построения обобщенных моделей для древесных родов показал перспективность использования мета-анализа в целях получения устойчивых оценок надземной фитомассы. Например, модель для рода *Betula* L., включающая данные 10 видов из 16 стран, объяснила 97 % изменчивости надземной фитомассы при среднем смещении 2,6 % [9]. Был также выполнен сравнительный мета-анализ аллометрических моделей фитомассы быстрорастущих лиственных пород [8]. Он включал данные 6 видов *Salix* L. из 3 стран, 4 видов *Populus* L. из 7 стран и 7 видов *Alnus* L. из 9 стран, и для каждого рода получены аллометрические модели, объясняющие 99 % изменчивости надземной фитомассы деревьев с средними смещениями от 1,7 до 2,2 %. Для каждого из 10 родов подлесочных растений (*Crataegus* Tourn. ex L., *Cornus* L., *Lonicera* L., *Salix* L., *Viburnum* L., *Corylus* L., *Rubus* L., *Sorbus* L., *Prunus* L., *Rosa* L.), представленных разными видами в количестве от 2 (*Crataegus*) до 17 (*Prunus*), были рассчитаны аллометрические мета-модели надземной фитомассы, объясняющие от 94,2 до 99,5 % ее изменчивости при смещениях в диапазоне от 0,02 до 1,4 % [7]. Построенная обобщенная модель для оценки объема ствола рода *Salix* L. методом мета-анализа данных объясняет 99,9 % варьирования региональных псевдо-данных при среднем смещении около 2 % [5].

Обобщенные модели для оценки отдельных фракций фитомассы показывают менее надежные результаты. Например, для 7 древесных видов Европы были разработаны обобщенные модели фитомассы на основе синтеза данных, полученных в ходе нескольких исследований. Обнаружено, что обобщенные модели для надземной фитомассы объясняют от 98,3 до 99,7 % ее изменчивости, в то время как для листвы и хвои – от 63,5 до 92,8 % и для ветвей – от 84,5 до 96,6 % [22]. Аллометрическая всеобщая модель для рода *Prunus* L., включающая данные 6 видов из 5 стран, объяснила 98 % изменчивости фитомассы ствола и надземной фитомассы, но лишь 91 % изменчивости фитомассы листвы и ветвей [6].

Цель настоящего исследования состоит в построении обобщенных моделей как надземной фитомассы, так и фитомассы фракций (листва, ветви, ствол, корни) деревьев ивы (род *Salix* L.) на основе мета-анализа данных.

Объекты и методы исследования

Поскольку за рубежом многочисленные исследования фитомассы ивы проводятся на плантациях с 2–4-летней ротацией, в соответствующих работах измеряют диаметр ствола у его основания [20], и он используется в качестве независимой переменной в моделях [23]. Наш мета-анализ фитомассы выполнен по данным диаметров как у основания ствола, так и на высоте груди (табл. 1).

Мы использовали опубликованные данные [4] и неопубликованные собственные материалы по Архангельской области, полученные с 2018 по 2021 гг. по методике И.И. Гусева [2]. Все данные о фитомассе приведены к абсолютно сухому состоянию. За исключением названных двух источников, в качестве исходных данных фитомассы использованы восстановленные мета-данные.

Таблица 1

**Исходные данные надземной фитомассы ивы,
включенные в мета-анализ**
**The initial data of the aboveground willow phytomass included
in the meta-analysis**

Виды	Страна или регион	Источник данных	Форма представления данных	Диапазон		
				надземной фитомассы дерева, кг	диаметра ствола, см	
					у основания	на высоте груди
<i>Salix carpea</i> L., <i>S. borealis</i> Fries, <i>S. triandra</i> L.	Архангельская область, РФ	Н/о*	Фактические	1,6...40,3	5,5...19,2	3,3...12,7
<i>S. carpea</i> L.	Вологодская и Новгородская области, РФ	[4]	Фактические	0,1...102,1	1,4...29,1**	1,0...23,7
	Словакия	[22]	Модель	0,01...3,1	0,5...7,0	–
<i>S. nigra</i> Marsh.	Шт. Мэн, США	[33]	Модель	1,3...128,0	4,1...29,5**	3,0...24,0
<i>S. bebbiana</i> Sarg.	Великие Озера, США	[26]	Модель	2,0...113,3	5,4...24,8**	4,0...20,0
<i>Salix</i> L.	Шт. Мэн, США	[27]	Модель	0,6...11,5	2,8...10,4**	2,0...8,0
		[18]	Модель	0,6...1925,0	2,8...70,4**	2,0...60,0
<i>S. nigra</i> Marsh.	Долина Миссисипи, США	[17]	Модель	2,7...23,5	5,4...15,3**	4,0...12,0
<i>S. discolor</i> Muhl., <i>S. alba</i> L., <i>S. dasycladoides</i> Wimm., <i>S. sachalinensis</i> F. Schmidt	Шт. Нью-Йорк, США	[11]	Модель	0,5...2953,0	2,8...81,5**	2,0...70,0

*Н/о – неопубликованные данные авторов статьи. **Значения D_0 получены расчетным способом по уравнению $\ln D_0 = 0,36738 + 0,94932 \ln D_{1,3}$; $R^2 = 0,99$ [15], где D_0 и $D_{1,3}$ – диаметры ствола соответственно у его основания и на высоте груди, см.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа исходных данных предлагаются модели надземной фитомассы (P_a , кг), объясняющие 99 % ее изменчивости:

$$\ln P_a = -3,5856 + 2,6118 \ln D_0, \text{ adj}R^2 = 0,992; \text{ SE} = 0,22; n = 185; \quad (2)$$

$$\ln P_a = -2,4863 + 2,4461 \ln D_{1,3}, \text{ adj}R^2 = 0,994; \text{ SE} = 0,18; n = 177, \quad (3)$$

где n – число деревьев, по которым взяты данные; $\text{adj}R^2$ и SE – см. в [5].

Регрессионный коэффициент при независимой переменной $\ln D_0$ составил 2,61, при $\ln D_{1,3}$ – 2,45, т. е. показатели лежали в диапазоне между соответствующими значениями теоретической [30] и эмпирической [34] аллометрических моделей.

Графическое выражение мета-моделей (2) и (3) показано на рис. 1, а соотношение исходных и расчетных данных – на рис. 2.

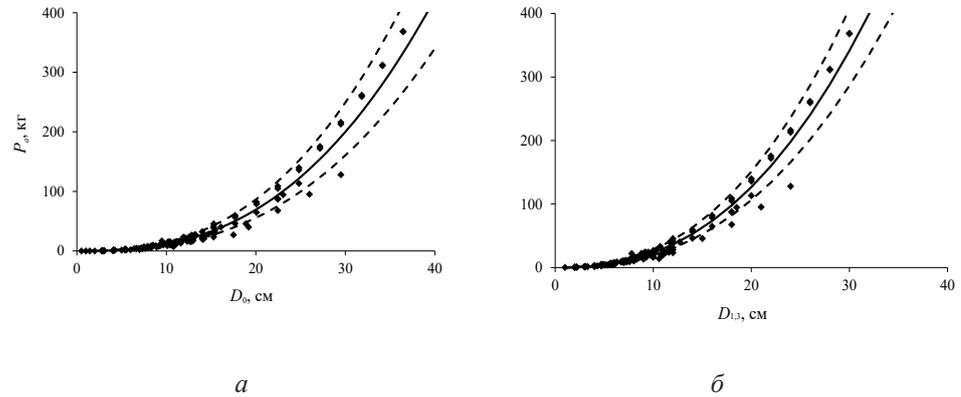


Рис. 1. Графические интерпретации мета-моделей на фоне исходных данных (показаны точками): *a* – (2); *б* – (3)

Fig. 1. The graphical interpretations of meta-models against the background of the initial data (shown with dots): *a* – (2); *б* – (3)

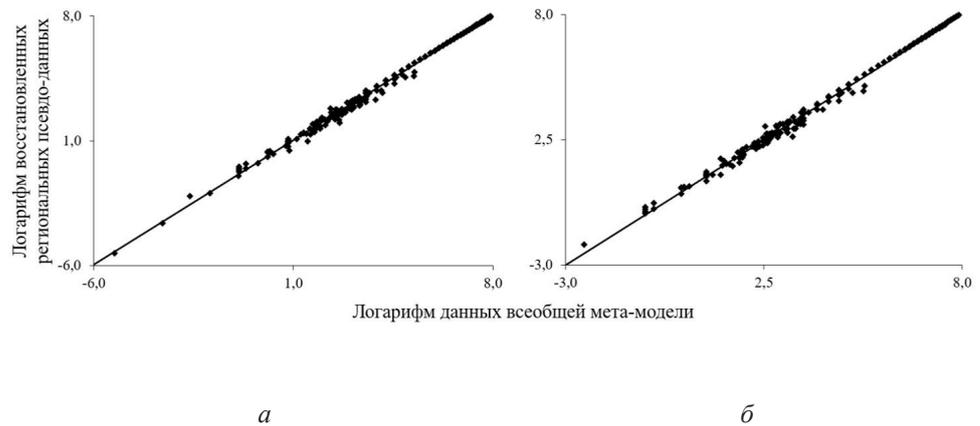


Рис. 2. Соотношение восстановленных региональных псевдо-данных фитомассы деревьев и данных обобщенной мета-модели: *a* – (2); *б* – (3)

Fig. 2. The ratio of the restored regional pseudo-data of tree phytomass and the data of the generic meta-model: *a* – (2); *б* – (3)

Данные табл. 2 свидетельствуют, что смещения, как и в предыдущих исследованиях [5, 7–9], составили около 2 %.

Поскольку каждая фракция фитомассы обладает специфичной углероддепонирующей способностью и вносит разный вклад в углеродный баланс [21], разработаны обобщенные модели для оценки массы листьев, ветвей, стволов и корней, использующие данные о надземной фитомассе деревьев и объясняющие от 82 (для листьев) до 99 (для стволов и корней) % общей изменчивости фитомассы. Был применен рекурсивный принцип последовательного совмещения моделей [10]. Характеристика исходных данных о фракционном составе фитомассы деревьев, включенных в наш мета-анализ, дана в табл. 3.

Таблица 2

Средние смещения региональных псевдо-данных надземной фитомассы ивы относительно значений, полученных табулированием мета-моделей
The average biases of the regional pseudo-data of the aboveground willow phytomass relative to the values obtained by tabulating meta-models

Показатель	Источник данных									В целом
	Н/о	[4]	[23]	[33]	[26]	[27]	[18]	[17]	[11]	
Для модели (2)										
Среднее систематическое смещение	-5,68	10,84	-19,16	-13,54	-8,59	14,78	11,80	-10,88	11,02	2,21
Ошибка среднего	±3,42	±5,01	±5,24	±8,08	±0,49	±8,87	±1,59	±6,01	±0,38	±1,50
Для модели (3)										
Среднее систематическое смещение	0,99	1,75	–	-18,90	-13,94	4,69	8,40	-17,28	7,84	1,46
Ошибка среднего	±2,89	±4,22	–	±6,78	±0,96	±7,38	±0,97	±5,22	±0,16	±1,27

Таблица 3

Исходные данные о фракционном составе фитомассы ивы, включенные в мета-анализ
The initial data on the fractional composition of willow phytomass included in the meta-analysis

Виды	Страна или регион	Источник данных	Форма представления данных	Диапазон, кг				
				фитомассы фракций				надземной фитомассы
				P_f	P_b	P_s	P_r	
<i>Salix carpea</i> L., <i>S. borealis</i> Fries, <i>S. triandra</i> L.	Архангельская область, РФ	Н/о	Фактические	0,06...1,1	0,18...9,3	1,30...20,0	–	1,60...40,3
<i>S. carpea</i> L.	Вологодская и Новгородская области, РФ	[4]	Фактические	0,02...4,4	0,02...27,8	0,09...74,6	0,03...5,9	0,10...102,1
<i>S. carpea</i> L.	Словакия	[23]	Модель	0,002...0,5	0,001...1,0	0,002...1,6	0,001...0,6	0,01...3,1
<i>S. nigra</i> Marsh.	Шт. Мэн, США	[33]	Фактические	0,20...6,5	0,40...12,5	0,90...109,0	0,50...38,0	1,30...128,0
<i>S. bebbiana</i> Sarg.	Великие Озера, США	[26]	Модель	0,16...4,4	–	1,50...81,1	–	2,03...113,3
<i>Salix</i> L.	Шт. Мэн, США	[27]	Модель	0,10...1,0	0,20...2,0	0,33...8,5	–	0,60...11,5
<i>Salix</i> L.	Румыния	[12]	Модель	0,06...1,5	0,26...3,5	0,34...4,7	0,30...3,1	0,68...9,7

Примечание: P_f , P_b , P_s и P_r – соответственно фитомасса листвы, ветвей, ствола и корней.

Общий вид модели для фракционного состава фитомассы:

$$\ln P_i = a + b \ln P_a. \quad (4)$$

Характеристика полученных расчетом моделей дана в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика мета-моделей (4)
The characteristics of meta-models (4)

Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты мета-моделей		adjR ²	SE	n
	a	b			
$\ln P_f$	-2,1869	0,6706	0,819	0,55	100
$\ln P_b$	-1,6355	0,9668	0,949	0,39	90
$\ln P_s$	-0,4667	1,0616	0,993	0,15	100
$\ln P_r$	-1,2750	1,0304	0,991	0,22	40

Полученные коэффициенты детерминации близки к литературным данным [22]. Для расчета углерододепонирующей способности ив предложены показатели содержания углерода в фитомассе стволов, ветвей, листья и корней – соответственно 46,1; 48,9; 47,5 и 47,9 % [3].

Графическое изображение моделей для фракций фитомассы дано на рис. 3.

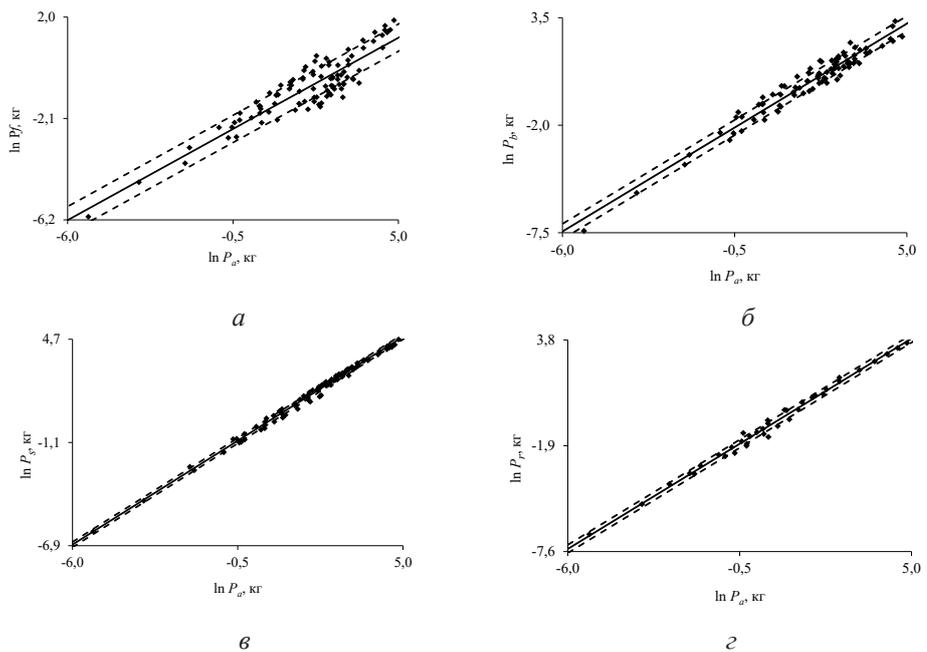


Рис. 3. Графические интерпретации мета-моделей (4) на фоне исходных данных (показаны точками): а, б, в, г – соответственно листья, ветви, ствол и корни

Fig. 3. The graphical interpretations of meta-models (4) against the background of the initial data (shown with dots): a, b, v, z – foliage, branches, stem and roots, respectively

Заключение

Таким образом, на основе мета-данных предложены обобщенные модели для оценки надземной фитомассы ивы по диаметру у основания ствола и по

диаметру на высоте груди, обладающие информативностью, близкой к функциональной. Их смещения составили около 2 %.

Разработаны обобщенные модели для оценки массы листвы, ветвей, стволов и корней по данным о надземной фитомассе деревьев, также характеризующиеся высокой адекватностью.

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. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: АГТУ, 2002. 112 с.
Gusev I.I. *Ecosystem Modeling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p. (In Russ.).
3. Пристова Т.А. Запасы углерода в древесных растениях березово-елового молодняка послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 1. С. 72–82.
Pristova T.A. Carbon Reserves in Woody Plants of Birch-Spruce Young Stock of Post-Harvest Origin of the Middle Taiga of the Komi Republic. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2022, no. 1, pp. 72–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.1.72>
4. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах Европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 359 с.
Smirnov V.V. *Organic Mass in Some Forest Phytocenoses of the European Part of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 359 p. (In Russ.).
5. Усольцев В.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Цепордей И.С. Модель объема ствола ивы: мета-анализ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 49–58.
Usoltsev V.A., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Tsepordey I.S. Generic Model of Willow Stem Volume: A Meta-Analysis. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 3, pp. 49–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-49-58>
6. Усольцев В.А., Уразова А.Ф., Борников А.В., Цепордей И.С. Видоспецифичная аллометрия и «всеобщая» модель структуры надземной биомассы рода *Prunus* L.: мета-анализ // Леса России и хоз-во в них. 2019. № 3(70). С. 4–15.
Usoltsev V.A., Urazova A.F., Bornikov A.V., Tsepordey I.S. Species-Specific Allometry and a Generic Model of the Aboveground Biomass Structure of the Genus *Prunus* L.: a Meta-Analysis. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2019, no. 3(70), pp. 4–15. (In Russ.).
7. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Азаренок В.А., Кох Е.В. Всеобщие аллометрические модели фитомассы подлесочных видов: мета-анализ // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1(57). С. 5–20.
Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Azarenok V.A., Kokh E.V. Generic Allometric Models of Understory Species BioMASS: Meta-Analysis. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 1(57), pp. 5–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.5>
8. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Часовских В.П. Сравнительный мета-анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород // Биосфера. 2023. Т. 15, № 1. С. 7–20.
Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Chasovskikh V.P. Comparative Meta-Analysis of Allometric Models of Fast-Growing Hardwood Biomass. *Biosfera*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i1.789>

9. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Часовских В.П. Всеобщие аллометрические модели фитомассы берез (род *Betula* L.): мета-анализ // Тр. СПбНИИЛХ. 2023. № 4. С. 4–15.
- Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Generic Models of Birch (Genus *Betula* L.) Tree Biomass: a Meta-Analysis. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2023, no. 4, pp. 4–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.4.4>
10. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.
- Chetyrkin E.M. *Statistical Methods of Forecasting*. Moscow, Statistika Publ., 1977. 200 p. (In Russ.).
11. Arevalo C.B.M., Volk T.A., Bevilacqua E., Abrahamson L. Development and Validation of Aboveground Biomass Estimations for Four *Salix* Clones in Central New York. *Biomass and Bioenergy*, 2007, vol. 31, iss. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.012>
12. Blujdea V.B.N., Pilli R., Dutca I., Ciuvat L., Abrudan I.V. Allometric Biomass Equations for Young Broadleaved Trees in Plantations in Romania. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 264, pp. 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042>
13. Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martínez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Péliissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G., Vieilledent G. Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees. *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, iss. 10, pp. 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
14. Chen J., Fang X., Wu A., Xiang W., Lei P., Ouyang S. Allometric Equations for Estimating Biomass of Natural Shrubs and Young Trees of Subtropical Forests. *New Forests*, 2024, vol. 55, pp.15–46. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09963-z>
15. Chojnacky D.C., Heath L.S., Jenkins J.C. Updated Generalized Biomass Equations for North American Tree Species. *Forestry*, 2014, vol. 87, iss. 1, pp. 129–151. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt053>
16. Conti G., Gorné L.D., Zeballos S.R., Lipoma M.L., Gatica G., Kowaljew E., Whitworth-Hulse J.I., Cuchiatti A., Poca M., Pestoni S., Fernandes P.M. Developing Allometric Models to Predict the Individual Aboveground Biomass of Shrubs Worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, vol. 28, iss. 7, pp. 961–975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>
17. Dahal B., Poudel K.P., Renninger H.J., Granger J.J., Leininger T.D., Gardiner E.S., Souter R.A., Rousseau R.J. Aboveground Biomass Equations for Black Willow (*Salix nigra* Marsh.) and Eastern Cottonwood (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh.). *Trees, Forests and People*, 2022, vol. 7, art. no. 100195. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100195>
18. Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. *Forest Science*, 2003, vol. 49, iss. 1, pp. 12–35. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.12>
19. Marchetti M. Forest Biomass for Bioenergy: Opportunities and Constraints for Governance Context. *Forest Biomass Conference 2013*, 2013, pp. 37–38.
20. Mleczek M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Strazyńska K., Stachowiak A. Biomass Productivity and Phytoremediation Potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, 2010, vol. 34, iss. 9, pp. 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.012>
21. Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G.A., Schulze E.-D. Growth and Carbon Stocks of a Spruce Forest Chronosequence in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 171, iss. 3, pp. 275–296. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00788-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00788-5)

22. Muukkonen P. Generalized Allometric Volume and Biomass Equations for Some Tree Species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 2007, vol. 126, pp. 157–166. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0168-4>
23. Pajtik J., Konôpka B., Šebeň V. *Mathematical Biomass Models for Young Individuals of Forest Tree Species in the Region of the Western Carpathians*. Zvolen, National Forest Centre – Forest Research Institute Zvolen, 2018. 89 p.
24. Pastor J., Aber J.D., Melillo J.M. Biomass Prediction Using Generalized Allometric Regressions for Some Northeast Tree Species. *Forest Ecology and Management*, 1984, vol. 7, iss. 4, pp. 265–274. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(84\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0378-1127(84)90003-3)
25. Paul K.I., Roxburgh S.H., England J.R., Ritson P., Hobbs T., Brooksbank K., Raison R.J., Larmour J.S., Murphy S., Norris J., Neumann C., Lewis T., Jonson J., Carter J.L., McArthur G., Barton C., Rose B. Development and Testing of Allometric Equations for Estimating Aboveground Biomass of Mixed-Species Environmental Plantings. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 310, pp. 483–494. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.054>
26. Perala D.A., Alban D. Allometric Biomass Estimators for Aspen-Dominated Ecosystems in the Upper Great Lakes. *Research Paper NC-314*. St. Paul, MN, US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1993. 38 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-314>
27. Ribe J.H. Puckerbrush Weight Tables. *Miscellaneous Report 152*. Orono, ME, University of Maine, Life Sciences and Agriculture Experiment Station, 1973. 92 p.
28. Urban D.L., Acevedo M.F., Garman S.L. Scaling Fine-Scale Processes to Large-Scale Patterns Using Models Derived from Models: Meta-Models. *Spatial Modeling of Forest Landscape Change: Approaches and Applications*, 1999, chapt. 4, pp. 70–98.
29. Volk T.A., Luzadis V. Willow Biomass Production for Bioenergy, Biofuels and Bioproducts in New York. *Renewable Energy from Forest Resources in the United States*, 2009, pp. 238–260. <https://doi.org/10.4324/9780203888421-22>
30. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A General Model for the Structure and Allometry of Plant Vascular System. *Nature*, 1999, vol. 400, pp. 664–667. <https://doi.org/10.1038/23251>
31. Wilkinson A.G. Poplars and Willows for Soil Erosion Control in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 1999, vol. 16, iss. 4, pp. 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00007-0)
32. Yang T.H., Song K., Da L.J., Li X.P., Wu J.P. The Biomass and AboveGround Net Primary Productivity of *Schima superba-Castanopsis carlesii* Forests in East China. *Science China Life Sciences*, 2010, vol. 53, pp. 811–821. <https://doi.org/10.1007/s11427-010-4021-5>
33. Young H.E., Ribe J.H., Wainwright K. *MR 230: Weight Tables for Tree and Shrub Species in Maine*. Life Sciences & Agriculture Experiment Station Miscellaneous Report 230, 1980. 84 p.
34. Zianis D., Mencuccini M. On Simplifying Allometric Analyses of Forest Biomass. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 187, iss. 2–3, pp. 311–332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>

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*581.573.4+581.192

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-76-90

Концентрация химических элементов в хвое *Larix gmelinii* и листьях *Betula pendula*

В.П. Макаров[✉], канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAZ-3029-2020](https://orcid.org/0000-0001-8882-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8882-9339>

Ю.В. Зима, канд. геогр. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-1385-2022](https://orcid.org/0000-0002-0689-0855),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0689-0855>

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова, д. 16а, г. Чита, Россия, 672014; vm2853@mail.ru[✉], zima.yura@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.23 / Одобрена после рецензирования 04.05.23 / Принята к печати 06.05.23

Аннотация. В Забайкальском крае предприятия горнодобывающей промышленности существенно загрязняют окружающую среду химическими элементами. В этих условиях большое значение имеет мониторинг состояния окружающей среды, в т. ч. с помощью растений-индикаторов. Из числа древесных растений наиболее распространены в крае лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и береза повислая (*Betula pendula* Roth.). На примере Быстринского Cu–Au–Fe скарново-порфирового месторождения исследована концентрация 46 химических элементов в хвое лиственницы Гмелина и листьях березы повислой, а также содержание этих элементов в почве. Цель исследования – выявить видовые различия растений в накоплении элементов и перспективу использования растений как индикаторов загрязнения окружающей среды. Научные работы проведены на 11 пробных площадях в природных растительных сообществах вблизи объектов предприятия в августе 2022 г. Образцы почвы и растений отбирали в одно время, на одних и тех же участках. Химический анализ образцов проведен с использованием «Методики выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой» (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98). Установлены различия концентрации элементов в растениях по отношению к кларку наземных растений. Статистически значимо большая по сравнению с хвоей лиственницы концентрация K, Ca, P, Mg, Fe, Ba, Zn, Na, Rb, Ni, Co, Ga, Sn, Y, Zr, Cd и Nb обнаружена в листьях березы, и, напротив, большая, чем в листьях березы, концентрация Sc, W и Hg – в хвое лиственницы. Установлены достоверные различия растений по коэффициенту биологического поглощения Se, P, Sn, Ca, Mn, Sr, Cd, Mg, K, W, Ni, Zn, Sc, Rb, Na и Nb. Знания об особенностях накопления химических элементов в органах растений могут быть использованы для биомониторинга загрязнения окружающей среды и, возможно, для фиторемедиации загрязненных грунтов.

Ключевые слова: месторождение металлов, *Larix gmelinii*, *Betula pendula*, химические элементы, загрязнение окружающей среды, загрязнение химическими элементами, мониторинг загрязнения, Забайкальский край

Благодарности: Химический анализ образцов растений и почвы выполнен в лаборатории физико-химических исследований Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (г. Хабаровск). Аналитики: мл. науч. сотр. В.О. Крутикова, ст. инж. А.Ю. Петрова.

Для цитирования: Макаров В.П., Зима Ю.В. Концентрация химических элементов в хвое *Larix gmelinii* и листьях *Betula pendula* // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 76–90. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-76-90>

Original article

Concentration of Chemical Elements in *Larix gmelinii* Needles and *Betula pendula* Leaves

Vladimir P. Makarov[✉], Candidate of Biology, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [AAZ-3029-2020](https://orcid.org/0000-0001-8882-9339), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8882-9339>

Yurij V. Zima, Candidate of Geography, Research Scientist; ResearcherID: [AAC-1385-2022](https://orcid.org/0000-0002-0689-0855),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0689-0855>

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Nedorezova, 16a, Chita, 672014, Russian Federation; vm2853@mail.ru[✉], zima.yura@mail.ru

Received on January 18, 2023 / Approved after reviewing on May 4, 2023 / Accepted on May 6, 2023

Abstract. In the Trans-Baikal Territory, mining enterprises significantly pollute the environment with chemical elements. In these conditions, monitoring the state of the environment, including with the help of indicator plants, is of great importance. Among the woody plants, Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) and silver birch (*Betula pendula* Roth.) are the most common in the region. Using the example of the Bystrinskoe Cu–Au–Fe skarn-porphry deposit, the concentration of 46 chemical elements in the needles of Gmelin larch and the leaves of silver birch, as well as the content of these elements in the soil, has been studied. The aim of the study is to identify plant species differences in the accumulation of elements and the prospect for using plants as indicators of environmental pollution. Scientific work has been carried out on 11 sample plots in natural plant communities near the enterprise’s facilities in August 2022. Soil and plant samples have been collected at the same time, at the same sites. The chemical analysis of the samples has been carried out using the “Methodology for measuring the metal content in solid objects by inductively coupled spectrometry” (FER 16.1:2.3:3.11–98). Differences in the concentration of elements in plants in relation to the Clarke of terrestrial plants have been established. A statistically significant higher concentration of K, Ca, P, Mg, Fe, Ba, Zn, Na, Rb, Ni, Co, Ga, Sn, Y, Zr, Cd and Nb has been found in birch leaves compared to larch needles, and, conversely, a higher concentration of Sc, W and Hg – in larch needles than in birch leaves. Significant differences between plants have been established in the biological absorption coefficient of Se, P, Sn, Ca, Mn, Sr, Cd, Mg, K, W, Ni, Zn, Sc, Rb, Na and Nb. Knowledge about the peculiarities of accumulation of chemical elements in plant organs can be used for biomonitoring environmental pollution and, possibly, for phytoremediation of contaminated soils.

Keywords: metal deposit, *Larix gmelinii*, *Betula pendula*, chemical elements, environment pollution, chemical pollution, pollution monitoring, the Trans-Baikal Territory

Acknowledgements: Chemical analysis of plant and soil samples was performed in the laboratory of physical and chemical research of the Institute of Tectonics and Geophysics named after Yu.A. Kosygin (Khabarovsk). The analysts: junior research scientist V. Krutikova, senior engineer A. Petrova.



For citation: Makarov V.P., Zima Yu.V. Concentration of Chemical Elements in *Larix gmelinii* Needles and *Betula pendula* Leaves. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 76–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-76-90>

Введение

В Забайкальском крае основными предприятиями, загрязняющими окружающую среду, являются горнодобывающие. В России существуют нормативные документы, определяющие предельно допустимые уровни содержания ряда химических элементов в почве и растениях, продуктах питания человека и животных, лекарственном сырье (ГОСТ 17.4.4.02–2017, 21; ОФС.1.5.3.0009.15), некоторых химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных (временный максимально-допустимый уровень). В этих условиях важен комплексный подход к контролю состояния окружающей среды, в т. ч. и с помощью растений. Известно, что они способны концентрировать в различных органах химические элементы в зависимости от условий окружающей среды и собственных биологических особенностей.

Наибольшие площади земель лесного фонда из числа древесных растений в крае занимают лиственница Гмелина и береза повислая – соответственно 63,3 и 20,4 % (Министерство природных ресурсов Забайкальского края. Государственный лесной реестр). Растения являются пионерными при зарастании нарушенных в результате добычи полезных ископаемых земель и поэтому могут стать удобными объектами для контроля загрязнения воздуха, почвы и растений в районе промышленных объектов.

Есть множество примеров использования лиственницы и березы для биомониторинга окружающей среды. В Польше в качестве биоиндикатора загрязнения воздуха Co, Cu, Ni и Pb коксовой промышленностью предлагается применять лиственницу европейскую (*Larix decidua* Mill.) [23]. В Германии хорошими фитоиндикаторами при мониторинге сильно загрязненных территорий наряду с другими растениями признаны береза повислая и лиственница европейская. Береза повислая являлась лучшим биоаккумулятором Cd [22]. В Китае, в провинции Ляонин, в районе добычи полезных ископаемых Хунтоушань на хвостохранилище в хвое лиственницы ольгинской (*Larix olgensis* Henry) наблюдалось более высокое содержание Cu, Hg, Mo, Pb и Zn, чем в фоновой зоне [24]. Исследования, проведенные в зоне воздействия Джидинского вольфрамо-молибденового горно-обогатительного комбината в г. Закаменске (Республика Бурятия, Россия), показали повышенное накопление в хвое и коре лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), а также в листьях и коре березы повислой W, Mo, V, Pb, Bi, Cd и Co. Наблюдалась тесная корреляция между концентрациями в почвах и растениях для элементов с сильным и умеренным биологическим захватом [18]. На урбанизированной территории (г. Иркутск, Россия) было изучено содержание Pb, Cd, Cu, Zn в горизонтах почвенного профиля и листьях (хвое) лиственницы сибирской и березы повислой. Показано, что концентрация элементов в листьях (хвое) тесно связана с их содержанием в почвенных горизонтах [20]. Научные изыскания на бывшем утилизированном угольном месторождении, разработка которого велась открытым способом, в Вартеге Хиллс (Южный Уэльс, Великобритания) показали постоянное накопление в

листьях березы повислой Cd и Zn, в то время как в хвое молодой лиственницы европейской отмечались высокие концентрации Mn и Pb. Исследования фиторе медиационного потенциала лиственницы европейской и березы повислой на концентрацию металлов в почве выявили, что уровни металлов значительно снизились даже на недавно засеянных испытательных площадках. На участках 4-летней давности наблюдалось снижение концентрации Mn на 14–18 % и концентраций Cd и Zn примерно на 8 %. Береза повислая и лиственница европейская обычно используются в мелиорации земель Великобритании для извлечения Zn, Cd, Mn, Pb и Cu из отходов рудников [16]. В условиях Стерлитамакского промышленного центра (Республика Башкортостан, Россия) изучены особенности накопления и распределения Cd и Ni в надземных и подземных органах лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.). Выявлено, что повышение концентрации металлов в почве приводит к увеличению их содержания в хвое, ветвях и корневой системе деревьев. Ni и Cd в основном аккумулируются поглощающими корнями. В надземной части концентрация металлов в ветвях выше, чем в хвое [4]. В Чешской Республике кольца деревьев лиственницы европейской предлагается использовать как инструмент надежного геохимического архива локальных и региональных изменений атмосферной ртути [21]. Определено содержание Cd, Pb, Cu, Ni, Mn, Zn и Fe в листьях березы повислой (Нижняя Силезия, Польша), которые особенно подвержены промышленному загрязнению. Обнаруженные значительные положительные корреляции между содержанием Cu и Pb в листьях березы и уровнями этих элементов в соответствующих почвах указывают на ее потенциал для использования в биомониторинге загрязнения окружающей среды Cu и Pb [19]. Для Забайкальского края есть несколько примеров применения в этих целях лиственницы Гмелина и березы повислой [5–7, 13].

Быстринский горно-обогатительный комбинат (ГОК) – сравнительно молодое предприятие, запуск производства которого проведен в 2017 г. Специфические природные климатические и геохимические условия района размещения предприятия, а также технологии обогащения полезных ископаемых обуславливают особенности элементного состава произрастающих здесь растений. Ранее элементный состав древесных растений в районе предприятия не исследовался.

Цель данной работы – дать сравнительную оценку концентраций химических элементов в хвое лиственницы Гмелина и листьях березы повислой в районе Быстринского ГОКа, а также определить возможность использования растений для контроля загрязнения окружающей среды.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено на территории Быстринского ГОКа. Это крупное Cu–Au–Fe скарново-порфировое месторождение. Оно находится на территории Газимуро-Заводского района Забайкальского края, в 25 км к северо-западу от районного центра, пос. Газимурский Завод (51,482° с. ш. 118,538° в. д.). Минеральный состав руд разнообразный – более 90 гипогенных минералов. Наиболее широко распространен магнетит, а среди сульфидов – пирит, халькопирит, пир-

ротин. В меньших количествах, но постоянно встречаются арсенопирит, Co-Ni-F арсениды и сульфоарсениды, галенит, сфалерит, валлериит, блеклые руды. Особое место, хотя и без образования крупных скоплений, занимают Mo-W и редкоземельная минерализация [10]. Наиболее широко развита Mo -минерализация скарнового типа, в которой содержание Mo может достигать высоких значений. Молибденовая минерализация в скарнах характеризуется изменчивыми, но, как правило, высокими концентрациями Fe, Cu, Co, S, As [11].

На территории месторождения были выделены горные дерновые лесные, дерновые лесные насыщенные, темно-серые лесные, лугово-черноземные, луговые, лугово-болотные типы почв. Среднее содержание гумуса находилось в пределах 4,2–15,3 %, рН – 5,9–6,9, среднее содержание фосфора – 1,9–14,0 мг/100 г, калия – 11,0–29,0 мг/100 г. По механическому составу все типы почв тяжелосуглинистые. Для почв характерно увеличенное относительно кларка содержание Sc . В горных дерновых лесных почвах наблюдалось повышенное количество Cu, Cr, W, As . В темно-серых лесных почвах зафиксировано небольшое превышение Cu (и во всех пробах высокая доля As). Основными тяжелыми металлами, выявленными в концентрациях больше нормы, являлись Cu, Cr, As, W . В подвижных формах тяжелые металлы не имели значений выше допустимых [12].

В августе 2022 г. с 4 пробных площадей (ПП 2, 6, 10, 11) было взято по одной пробе почвы путем смешивания 5 точечных проб почвы методом конверта в слое 20 см. Пробы упаковывались в полиэтиленовые пакеты. Масса проб, условия их транспортировки и хранения соответствовали нормативным документам (ГОСТ 17.4.3.01–2017, ГОСТ 17.4.4.02–2017, ПНД Ф 12.1:2.2.2.3:3.2–03).

Одновременно с почвой на высоте около 2 м в кроне 5–6 деревьев было отобрано 9 объединенных образцов хвои лиственницы (ПП 1–7, 9, 10) и 10 объединенных образцов листьев березы (ПП 1–7, 9–11).

Пробные площади располагались в природных сообществах, преимущественно в лиственнично-березовых лесах, а также прирусловых древесно-кустарниковых сообществах и на пойменном лугу. Абсолютная высота ПП была в пределах 752–925 м над ур. м. Возраст лиственницы составлял около 60–70 лет, березы – 10–30 лет. Сомкнутость крон в большинстве насаждений – около 70 %, на ПП 2 произрастали отдельно стоящие деревья, на ПП 6 сомкнутость крон равнялась около 20 %. ПП находились в радиусе 7–8 км от карьеров и обогатительной фабрики предприятия (см. рисунок).

При пробоподготовке для определения концентраций микроэлементов в пробах за основу была взята методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98). В качестве стандартных образцов для проверки и калибровки прибора применялись ДВА, ДВБ (Дальний восток, Россия), ВНВО-1, STM-1 (США), JG-1a, JR-1 (Япония) и др. Учитывая, что наиболее корректной оценкой предела обнаружения в аналитических методах является экспериментальное нахождение такого значения [15], данные по Se, Sb, Pb, Be приведены ниже порога в соответствии с методикой ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98.



Расположение пробных площадей

The location of sample plots

Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью программы Microsoft Excel 2010, определены средние арифметические значения с ошибкой ($M_{cp} \pm m$), среднеквадратичное отклонение (CV), минимальное и максимальное значения (Min–max).

Результаты исследования и их обсуждение

Среднее валовое содержание химических элементов в почве (ПП 2, 6, 10, 11) представлено в табл. 1.

Таблица 1

Валовое содержание химических элементов в почве, мг/кг
The gross content of chemical elements in the soil, mg/kg

Элемент	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку земной коры, %	Min–max	CV, %
Fe	31615±370	68	30346–32389	3
K	14618±302	58	13479–15293	5
Na	8108±1751	32	2841–12662	48
Mg	6767±1131	36	4730–11140	37
Ca	4460±208	15	3742–5008	10
Ti	2310±165	51	1928–2883	16
Mn	1146±258	115	568–2036	50
P	840±183	90	541–1562	49
Ba	532±55	82	363–644	23
Sr	134,4±10,4	40	100–160	17

Окончание табл. 1

Элемент	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку земной коры, %	Min–max	CV, %
Rb	91,4±7,9	61	66,0–108,0	19
Cr	78,7±29,5	95	44,7–196,0	84
V	72,3±2,8	80	63,8–80,9	9
Zn	69,2±2,2	83	65,1–75,4	7
Ce	59,3±6,1	85	47,6–80,7	23
Zr	52,4±5,0	31	38,9–69,2	21
Li	39,2±4,7	123	28,3–50,6	27
Ni	31,4±6,7	54	17,0–56,5	48
La	28,8±2,7	99	24,2–39,3	21
Cu	22,7±1,6	48	18,3–28,3	16
As	21,5±3,3	1267	13,8–31,3	35
Pb	20,4±1,4	127	17,4–25,6	16
B	18,1±4,1	151	12,6–34,3	51
Ga	15,9±0,2	84	15,4–16,6	3
Y	13,9±2,4	48	8,7–22,9	38
Co	11,4±1,0	63	9,0–14,4	19
Th	9,9±0,4	76	9,0–11,3	9
Sc	9,4±0,3	94	8,6–10,4	8
Cs	8,3±0,5	225	6,8–9,5	13
Nb	7,1±0,6	35	5,8–9,3	19
Pr	6,9±0,8	77	5,6–9,9	26
Sb	2,6±0,6	513	1,2–4,4	53
W	2,4±0,6	181	1,3–4,8	59
U	2,1±0,3	85	1,6–3,3	32
Be	1,7±0,05	45	1,6–1,8	6
Ge	1,4±0,1	97	1,2–1,5	9
Mo	1,2±0,2	111	0,8–1,8	36
Sn	1,2±0,1	49	1,0–1,6	19
Ta	0,7±0,1	28	0,6–0,9	21
Tl	0,6±0,05	57	0,5–0,7	19
Ag	0,30±0,04	420	0,17–0,43	33
Hg	0,1±0,02	133	0,05–0,20	51
Cd	0,08±0,01	65	0,04–0,13	40
Bi	0,02±0,02	187	0,001–0,080	210
Se	0,001±0	2	0,001–0,001	0
Te	0,001±0	100	0,001–0,001	0

Относительно кларка земной коры [2] среднее валовое содержание химических элементов в почве находилось в такой последовательности: As > Sb > Ag > > Cs > Bi > W > B > Hg > Pb > Li > Mn > Mo > Te = Кларк > La > Ge > Cr > Sc > >P > Ce > U > Ga > Zn > Ba > V > Pr > Th > Fe > Cd > Co > Rb > K > Tl > Ni > Ti > > Sn > Cu > Y > Be > Sr > Mg > Nb > Na > Zr > Ta > Ca > Se.

Средняя концентрация химических элементов в хвое лиственницы: $K > Ca > P > Mg > Mn > Fe > Ba > Sr > B > Zn > Cu > Na > Ti > Rb > Cr > As > Ni > Pb > V > Mo > Ce > W > Co > Sc > Li > La > Cs > Ga > Se > Sn > Y > Zr > Sb > Th > Cd > Pr > Hg > Bi > U > Be > Ag > Ge > Ta > Tl > Nb > Te$; в листьях березы: $> K > Ca > Mg > P > Mn > Fe > Zn > Ba > Sr > Na > B > Cu > Ti > Rb > Ni > Cr > As > Co > Mo > V > Ce > Pb > Cd > Li > W > Zr > La > Sn > Ga > Y > Cs > Sb > Se > Th > Pr > U > Be > Hg > Ge > Nb > Sc > Ta > Ag > Bi > Te > Tl$.

Средняя концентрация в листьях березы повислой K, Ca, P, Mg, Fe, Ba, Zn, Na, Rb, Ni, Co, Ga, Sn, Y, Zr, Cd и Nb была статистически достоверно выше, чем в хвое лиственницы Гмелина. В хвое лиственницы средняя концентрация Sc, Hg и Tl достоверно выше, чем в листьях березы (табл. 2). Между концентрациями других исследованных элементов в листьях и хвое растений статистически достоверных различий не обнаружено.

Таблица 2

**Концентрации химических элементов в хвое лиственницы Гмелина
и листьях березы повислой, мг/кг
The concentrations of chemical elements in Gmelin larch needles
and silver birch leaves, mg/kg**

Элемент	Лиственница Гмелина				Береза повислая			
	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %
Ag	0,004±0,001	67	0,001–0,010	99	0,002±0,001	33	0,001–0,010	125
As	0,74±0,26	370	0,05–2,02	107	0,42±0,21	210	0–2,21	159
B	19,5±2,6	39	9,8–34,1	39	21,0±1,2	42	15,5–26,7	18
Ba**	67±11	479	23–117	49	101±16	721	15–161	51
Be	0,006±0,001	6	0,002–0,010	57	0,010±0,003	10	0,001–0,030	77
Bi	0,013±0,012	22	0,001–0,110	277	0,001±0	2	0,001–0,001	0
Ca**	1952±133	11	1446–2463	20	4636±378	26	2767–7078	26
Cd**	0,021±0,003	4	0,010–0,040	44	0,141±0,031	24	0,020–0,280	70
Ce	0,17±0,07	84	0,001–0,640	123	0,22±0,07	110	0,04–0,66	99
Co**	0,160±0,052	32	0,04–0,53	98	0,32±0,08	64	0,10–0,75	76
Cr	0,81±0,23	352	0,26–2,27	84	1,10±0,27	478	0,26–2,62	76
Cs	0,041±0,014	205	0,003–0,110	99	0,039±0,014	195	0,004–0,150	114
Cu	6,2±1,8	44	2,2–18,3	87	6,3±1,2	45	2,8–13,6	61
Fe**	135±49	96	22–462	109	325±87	232	50–830	85
Ga**	0,04±0,01	667	0,01–0,12	88	0,07±0,02	1167	0,02–0,16	67
Ge	0,003±0,001	–	0,002–0,010	81	0,005±0,001	–	0,002–0,010	69
Hg*	0,016±0,004	107	0,001–0,040	71	0,008±0,002	53	0,001–0,020	90
K**	3788±162	27	2936–4501	13	6274±483	45	4638–9445	24
La	0,10±0,04	118	0,01–0,35	112	0,12±0,03	141	0,03–0,33	91
Li	0,107±0,048	107	0,001–0,440	135	0,14±0,05	140	0,02–0,40	106
Mg**	1255±56	39	978–1454	13	3770±164	118	3024–4676	14

Окончание табл. 2

Элемент	Лиственница Гмелина				Береза повислая			
	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %
Mn	583±158	93	16–1553	81	662±171	105	74–1725	81
Mo	0,20±0,08	22	0,02–0,69	120	0,303±0,097	34	0,060–0,900	101
Na**	3,13±2,24	0	0,001–20,500	215	41,6±12,1	3	0,001–130,100	92
Nb**	0,0013±0,0003	65	0,001–0,004	75	0,005±0,003	250	0,001–0,020	163
Ni**	0,717±0,179	24	0,001–1,690	75	2,2±0,4	73	0,4–4,4	55
P**	1644±186	71	847–2559	34	2356±239	102	1277–4133	32
Pb	0,50±0,20	19	0,09–2,02	123	0,22±0,08	8	0,001–0,690	109
Pr	0,019±0,007	–	0,001–0,070	112	0,022±0,007	–	0,003–0,070	101
Rb**	1,5±0,2	8	0,5–2,7	51	3,9±0,6	20	1,9–6,9	47
Sb	0,034±0,011	57	0,004–0,090	99	0,033±0,010	55	0,010–0,110	95
Sc*	0,11±0,01	13750	0,05–0,17	38	0,005±0,003	625	0,001–0,030	194
Se	0,04±0,01	20	0,01–0,09	71	0,030±0,004	15	0,001–0,050	49
Sn**	0,04±0,01	13	0,01–0,13	100	0,107±0,014	36	0,050–0,210	42
Sr	45±5	173	29–77	35	56,7±5,4	218	33,7–86,1	30
Ta	0,002±0,001	–	0,001–0,010	150	0,003±0,001	–	0,001–0,010	136
Te	0,001±0	–	0,001–0,001	0	0,001±0	–	0,001–0,001	0
Th	0,029±0,012	–	0,003–0,110	129	0,026±0,012	–	0,001–0,120	143
Ti	2,813±1,782	281	0,001–16,100	190	5,3±1,8	530	0,001–14,900	106
Tl*	0,0016±0,0003	–	0,001–0,003	57	0,001±0	–	0,001–0,003	53
U	0,011±0,005	289	0,001–0,050	143	0,014±0,004	368	0,002–0,040	101
V	0,22±0,08	14	0,04–0,81	115	0,27±0,08	17	0,07–0,69	89
W	0,165±0,088	236	0,001–0,800	161	0,13±0,07	186	0,001–0,540	163
Y	0,04±0,02	–	0,01–0,16	109	0,059±0,016	–	0,020–0,170	88
Zn**	11,2±1,0	11	6,3–15,2	28	131±12	131	76–193	29
Zr**	0,039±0,019	6	0,001–0,170	148	0,129±0,043	20	0,001–0,440	105

*Концентрация элемента статистически достоверно выше в хвое лиственницы Гмелина.

** Концентрация элемента статистически достоверно выше в листьях березы повислой.

По отношению к кларку наземных растений [3] концентрация химических элементов в хвое лиственницы Гмелина располагалась в следующем порядке: Sc > Ga > Ba > As > Cr > U > Ti > W > Cs > Sr > La > Hg > Li > Кларк > Fe > Mn > > Ce > P > Ag > Nb > Sb > Cu > B > Mg > Co > K > Ni > Bi > Mo > Se > Pb > > V > Sn > Ca > Zn > Rb > Be > Zr > Cd > Na. Для листьев березы повислой последовательность элементов относительно кларка была такой: Ga > Ba > Sc > > Ti > Cr > U > Nb > Fe > Sr > As > Cs > W > La > Li > Zn > Mg > Ce > Mn > P > > Кларк > Ni > Co > Sb > Hg > Cu > K > B > Sn > Mo > Ag > Ca > Cd > Rb > Zr > > V > Se > Be > Pb > Na > Bi.

Коэффициенты биологического поглощения элементов растениями свидетельствовали о статистически достоверно более высоком их накоплении в листьях березы, в порядке убывания – Se, P, Zn, Ca, Cd, Mg, Mn, Ni, Sn, Rb, Na, Nb. Лиственница отличалась от березы статистически достоверно бóльшим коэффициентом поглощения Sc, Hg и W – соответственно в 35; 3,4 и 1,6 раза (табл. 3).

Таблица 3

**Коэффициенты биологического поглощения элементов хвои лиственницы
Гмелина и листьев березы повислой
The biological absorption coefficients of the elements of Gmelin larch needles
and silver birch leaves**

Элемент	Лиственница Гмелина	Береза повислая
Ag	0,02±0,01	0,006±0,002
As	0,04±0,04	0,02±0,02
B	1,2±0,1	1,4±0,2
Ba	0,17±0,02	0,26±0,03
Be	0,004±0,002	0,009±0,005
Bi	0,67±0,33	0,67±0,33
Ca*	0,48±0,08	1,3±0,2
Cd*	0,25±0,02	1,3±0,2
Ce	0,004±0,003	0,004±0,002
Co	0,02±0,01	0,03±0,01
Cr	0,02±0,01	0,03±0,02
Cs	0,006±0,005	0,005±0,003
Cu	0,37±0,23	0,30±0,12
Fe	0,006±0,004	0,01±0,01
Ga	0,003±0,002	0,005±0,002
Ge	0,004±0,002	0,004±0,002
Hg**	0,27±0,08	0,08±0,06
K	0,230±0,005	0,56±0,05
La	0,005±0,004	0,005±0,003
Li	0,006±0,005	0,006±0,004
Mg*	0,23±0,02	0,69±0,05
Mn*	0,34±0,06	0,50±0,12
Mo	0,19±0,14	0,15±0,07
Na*	0,0001±0,0001	0,006±0,002
Nb*	0,0002±0,0001	0,001±0,001
Ni*	0,03±0,02	0,10±0,04
P*	2,0±0,5	3,6±0,6
Pb	0,04±0,03	0,02±0
Pr	0,004±0,003	0,003±0,002
Rb*	0,012±0,004	0,04±0,01
Sb	0,03±0,02	0,02±0,01
Sc**	0,014±0,002	0,0004±0,0003

Окончание табл. 3

Элемент	Лиственница Гмелина	Береза повислая
Se*	16,7±6,7	33,3±6,7
Sn*	0,015±0,003	0,06±0,01
Sr	0,33±0,06	0,49±0,05
Ta	0,001±0	0,0010±0,0001
Te	1,00±0	1,0±0
Th	0,004±0,004	0,003±0,002
Ti	0,002±0,002	0,002±0,001
Tl	0,003±0,001	0,0020±0,0002
U	0,010±0,009	0,007±0,005
V	0,005±0,003	0,005±0,003
W**	0,13±0,12	0,08±0,07
Y	0,005±0,004	0,005±0,003
Zn*	0,17±0,02	1,6±0,4
Zr	0,001±0,001	0,002±0,001

*Коэффициент биологического поглощения статистически больше в листьях березы повислой. ** Коэффициент биологического поглощения статистически больше в хвое лиственницы Гмелина.

Относительно высокая концентрация Sc в хвое лиственницы может позволить использовать вид как индикатор содержания этого элемента в горных породах и загрязнения окружающей среды. Известно, что содержание Sc в почве определяется главным образом материнской породой. Его наименьшие концентрации установлены в песчаных и легких органических почвах, в то время как для почв, развитых на гранитах и вулканических породах, получены более высокие значения [9]. Концентрация Sc в растениях зависит от степени загрязнения окружающей среды. Так, вблизи Иркутского алюминиевого завода в хвое лиственницы сибирской отмечалось увеличение концентрации Sc в 2,4–5,3 раза по сравнению с фоновыми значениями [1]. В промышленной зоне ОАО «Нафтан» (Республика Беларусь) обнаружено накопление Sc в хвое туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в размере 10–20 мг/кг, при содержании в почве менее 10 мг/кг. Отмечалось, что туя западная может выступать индикатором ряда исследуемых металлов и других элементов, т. к. способна аккумулировать их в хвое [8]. В то же время более высокое содержание Sc по сравнению с другими растениями фиксировали в некоторых грибах (базидиомицеты) и мохообразных [17]. Исследование накопления микро- и макроэлементов во мхах, лишайниках, хвое кедра и лиственницы в Западно-Сибирской Арктике (Ямало-Ненецкий автономный округ) показало, что концентрация Sc в изучаемых объектах ступенчато увеличивается в следующем порядке: хвоя кедра, хвоя лиственницы, лишайники и мхи. Установлено, что количество элемента в биологических объектах обусловлено фоном твердых атмосферных осадков. По поверхности исследуемой территории (с центром в пределах г. Новый Уренгой) наблюдалось радиально-симметричное распределение содержания элементов в биологических объектах. Наиболее ярко это проявлялось для хвои лиственницы и кедра. Исследование элементного состава растений в районе Томторского месторождения ниобий-редкоземельных руд в Якутии показало, что в хвое лиственниц преобладают Р и Mn, в меньшем количестве – В и Zn. Для коры

лиственницы характерно преобладание Mn и Zn. По отношению к хвое в коре лиственницы незначительно выше содержание Cu, Ti, Ag, Pb, Li и Sc. Концентрация скандия в коре лиственницы была равной концентрации в лишайниках [14].

Коэффициенты поглощения других исследованных элементов в растениях статистически достоверно не отличались. В группу биологического накопления лиственницы входили Se, P и B, а березы – Se, P, B, Ca, Cd и Zn. По степени интенсивности накопления выделялся Se, особенно у березы.

Согласно ГОСТ 17.4.4.02–2017, ряд химических элементов отнесен к опасным для здоровья человека и животных: As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn (1-й класс); B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr (2-й класс); Ba, V, W, Mn, Sr (3-й класс).

На части ПП концентрация As в образцах лиственницы и березы превышала в 1,5–4,4 раза установленные предельно допустимые уровни для лекарственного сырья (ОФС.1.5.3.0009.15).

В хвое лиственницы на отдельных ПП концентрация Fe и Cr была больше в 2,5–4,6 и 1,5–2,3 раза соответственно, чем максимально допустимый уровень для корма животных; в листьях березы – в 1,5–5,2 и 2,0–8,3 раза соответственно.

Лиственница и береза отличались по уровню накопления элементов в хвое и листьях на ПП, находящихся вблизи производственных объектов. Сравнение количества элементов с максимальной концентрацией по ПП показало, что наибольшее количество таких элементов в хвое лиственницы было на ПП 10 (26 элементов), а в листьях березы – на ПП 4 (27 элементов). В то же время на других площадях количество элементов с максимальной концентрацией было не более 7. Это свидетельствует о возможном максимальном количестве химических элементов на этих площадях, а также о том, что растения реагируют, но по-разному, на содержание химических элементов в окружающей среде. Следует отметить, что ПП 4 находится вблизи и восточнее карьера предприятия и в пойме реки, а ПП 10 – вблизи и западнее хвостохранилища.

Для хвои лиственницы обнаружены достоверные корреляционные связи содержания ряда элементов 1-го класса опасности на 1%-м уровне значимости с уровнями других исследованных элементов. С концентрацией в хвое лиственницы мышьяка корреляционно положительно связаны концентрации Cr, Cs, Mo, Sb, Sr и Th ($r = 0,81–0,95$), ртути – Li, Ti, Ce, Cr и Ge ($r = 0,80–0,85$), цинка – Ba ($r = 0,82$). Отрицательные связи установлены между концентрациями As и P ($r = -0,84$), а также между концентрациями Zn и B ($r = -0,83$).

В листьях березы концентрация As достоверно положительно связана с концентрацией значительно большего числа элементов: Ag, Ce, Cr, Cs, Cu, Fe, La, Li, Na, Nb, Pr, Sb, Sc, Sr, Th, Tl, U, V, W, Y и Zr ($r = 0,76–0,97$). Концентрация Hg в листьях березы также корреляционно достоверно положительно связана с концентрацией большего количества элементов: Be, Ce, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, La, Li, Na, Nb, Pr, Sb, Sc, Th, Ti, U, V, W и Y ($r = 0,72–0,90$). Концентрация Cd в листьях положительно связана с концентрацией Mn ($r = 0,93$) и отрицательно – с концентрацией Rb ($r = -0,73$).

Заключение

Исследование концентрации химических элементов в хвое лиственницы Гмелина и листьях березы повислой показало значительные различия в накоплении ряда элементов представителями этих видов. Концентрация большин-

ства изученных элементов была больше в листьях березы, и только Sc, W и Hg в большей мере накапливались в хвое лиственницы, особенно Sc.

Отличались у растений также коэффициенты биологического поглощения. В группу биологического накопления лиственницы входили Se, P и B, а березы – Se, P, B, Ca, Cd и Zn. При этом коэффициенты накопления в листьях березы Zn, Cd, Se, P, B были больше, чем в хвое лиственницы в 9,4; 5,2; 2,0; 1,8 и 1,2 раза соответственно. Коэффициенты биологического поглощения Sc, Hg и W в хвое лиственницы были больше, чем в листьях березы, в 35; 3,4 и 1,6 раза соответственно.

Концентрации As, Cr и Fe превышали в ряде мест произрастания растений пределы, установленные для лекарственного сырья и грубых кормов для животных.

Корреляционный анализ выявил, что среди элементов 1-го класса опасности As и Hg характеризовались максимальным числом связей с другими элементами, причем большее число таких связей было обнаружено для листьев березы.

Различия в концентрации и накоплении химических элементов для лиственницы Гмелина и березы повислой связаны с их биологическими особенностями и могут быть использованы для мониторинга загрязнения окружающей среды, а также, возможно, для фиторемедиации загрязненных грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Афанасьева Л.В., Калугина О.В., Оскорбина М.В., Харпухаева Т.М. Особенности элементного состава и пигментного комплекса хвои лиственницы сибирской при воздействии выбросов Иркутского алюминиевого завода // Сиб. лесн. журн. 2022. № 1. С. 20–32.

Afnas'eva L.V., Kalugina O.V., Oskorbina M.V., Kharpukhaeva T.M. Features of Elemental Composition and Pigment Complex of Siberian Larch Needles under Impact of Irkutsk Aluminum Smelter Emissions. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2022, no. 1, pp. 20–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20220102>

2. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

Vinogradov A.P. Average Contents of Chemical Elements in the Main Types of Igneous Rocks of the Earth's Crust. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (In Russ.).

3. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.

Vojtkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. *Handbook of Geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p. (In Russ.).

4. Гиниятуллин Р.Х., Бактыбаева З.Б. Особенности накопления Cd и Ni лиственницей Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) в условиях техногенеза // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2020. № 51. С. 141–161.

Giniyatullin R.Kh., Baktybaeva Z.B. Features of Cd and Ni Accumulation by *Larix sukaczewii* Dyl. under Technogenesis. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2020, no. 51, pp. 141–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/51/8>

5. Замана Л.В., Лесников Ю.В. Фтор в соке березы как индикатор флюоритового оруденения // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306, № 3. С. 700–703.

Zamana L.V., Lesnikov Yu.V. Fluorine in Birch Sap as an Indicator of Fluorite Mineralization. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1989, vol. 306, no. 3, pp. 700–703. (In Russ.).

6. Звягинцев В.В., Звягинцева О.Ю. Влияние выбросов автотранспорта на защитные леса в условиях Восточного Забайкалья // *Международ. науч.-исслед. журн.* 2016. № 5(47), ч. 5. С. 69–72.

Zvyagintsev V.V., Zvyaginseva O.Yu. Effect of Emission Vehicles for Protective Forests in the Eastern Transbaikalia. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = International Research Journal, 2016, no. 5(47), pp. 69–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.165>

7. Звягинцева О.Ю. Оценка качества атмосферного воздуха по величине флуктуирующей асимметрии березы повислой (на примере урбанизированных и ООПТ Восточного Забайкалья) // *Вестн. КрасГАУ*. 2012. № 7(70). С. 78–82.

Zvyagintseva O.Yu. Atmospheric Air Quality Estimation on the *Betula Pendula* Roth Fluctuating Asymmetry Size (on the Example of the Urbanized and Spin Areas in Eastern Transbaikalia). *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2012, no. 7, pp. 78–82. (In Russ.).

8. Иванова А.В. Аккумуляция химических элементов хвоей *Thuja occidentalis* L. в урбоэкосистеме // *Весн. Віцебск. дзяржаўн. ун-та*. 2010. № 6(60). С. 48–52.

Ivanova A.V. Accumulation of Chemical Elements by Needles *Thuja occidentalis* L. in the Urban Area. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of the Vitebsk State University, 2010, no. 6(60), pp. 48–52. (In Russ.).

9. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Microelements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. (In Russ.).

10. Коваленкер В.А., Абрамов С.С., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Языкова Ю.И., Бортник Н.С. Крупное Быстринское Cu–Au–Fe-месторождение (Восточное Забайкалье) – первый в России пример ассоциированной с адакитами скарново-порфировой рудообразующей системы // *Докл. АН*. 2016. Т. 468, № 5. С. 547–552.

Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Yazykova Yu.I., Bortnikov N.S. The Large Bystrinskoe Cu–Au–Fe Deposit (Eastern Trans-Baikal Region): Russia's First Example of a Skarn–Porphyry Ore-Forming System Related to Adakite. *Doklady Akademii Nauk* = Doklady Earth Sciences, 2016, vol. 468, pp. 566–570. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1028334X1606012X>

11. Коваленкер В.А., Трубкин Н.В., Абрамова В.Д., Плотинская О.Ю., Киселева Г.Д., Борисовский С.Е., Языкова Ю.И. Типоморфные характеристики молибденита Быстринского Cu–Au-скарново-порфирового месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // *Геология руд. месторождений*. 2018. Т. 60, № 1. С. 68–90.

Kovalenker V.A., Trubkin N.V., Abramova V.D., Plotinskaya O.Yu., Kiseleva G.D., Borisovskii S.E., Yazykova Yu.I. Typomorphic Characteristics of Molybdenite from the Bystrinsky Cu–Au Porphyry–Skarn Deposit, Eastern Transbaikalia Region, Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij* = Geology of Ore Deposits, 2018, vol. 60, pp. 62–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S107570151801004X>

12. Котович А.А., Гуман О.М., Макаров А.Б., Антонова И.А. Эколого-геохимическая оценка почв на территории проектируемого Быстринского ГОКа // *Изв. Урал. гос. горн. ун-та*. 2013. № 2(30). С. 21–25.

Kotovitch A.A., Guman O.M., Makarov A.B., Antonova I.A. Ecological and Geochemical Assessment of Soils on the Territory of the Projected Bystrinsky Mining and Processing Plant. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* = News of the Ural State Mining University, 2013, no. 2(30), pp. 21–25. (In Russ.).

13. Макаров В.П., Борзенко С.В., Помазкова Н.В., Желибо Т.В. Особенности накопления химических элементов в хвое лиственницы Гмелина, произрастающей в районе Удоканского месторождения меди // *Химия растит. сырья*. 2021. № 2. С. 191–200.

Makarov V.P., Borzenko S.V., Pomazkova N.V., Zhelibo T.V. Features of the Content of Chemical Elements in the Coniferous Larch Gmelina in the Area of the Udokan Copper Deposit. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2021, no. 2, pp. 191–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028832>

14. Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестн. ВГУ. Сер.: Геология. 2001. Вып. 11. С. 144–160.

Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive Assessment of the Tomtorskoye Deposit. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologija* = Proceedings of the Voronezh State University. Series: Geology, 2001, iss. 11, pp. 144–160. (In Russ.).

15. Экспериандова Л.П., Беликов К.Н., Химченко С.В., Бланк Т.А. Еще раз о пределах обнаружения и определения // Журн. аналит. химии. 2010. Т. 65, № 3. С. 229–234.

Eksperiandova L.P., Belikov K.N., Khimchenko S.V., Blank T.A. Once Again about Determination and Detection Limits. *Zhurnal analiticheskoy khimii* = Journal of Analytical Chemistry, 2010, vol. 65, pp. 223–228. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1061934810030020>

16. Desai M.A. *Phytoremediation: a Tool for Restoring Land Degraded Due to Open-cast Coal Mining*: PhD. Oxford Brookes University, 2013. 319 p.

17. Hu Z., Richter H., Sparovek G., Schnug E. Physiological and Biochemical Effects of Rare Earth Elements on Plants and Their Agricultural Significance: a Review. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, no. 27, iss. 1, pp. 183–220. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027555>

18. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Timofeev I.V. Ecological and Geochemical Assessment of Woody Vegetation in Tungsten-Molybdenum Mining Area (Buryat Republic, Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. vol. 41, art. no. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/41/1/012026>

19. Klink A., Letachowicz B., Krawczyk J., Wisocka M. The Content of Heavy Metals in Soil and Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) from Wałbrzych and Gogow. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2006, vol. 15, no. 2a, pp. 347–350.

20. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V. Accumulation and Migration of Elements-Pollutants in “Soil-Plant” System within Urban Territory. *Natural Science*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 705–709. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.56087>

21. Navrátil T., Nováková T., Shanley J.B., Rohovec J., Matoušková S., Vaňková M., Norton S.A. Larch Tree Rings as a Tool for Reconstructing 20th Century Central European Atmospheric Mercury Trends. *Environmental Science & Technology*, 2018, no. 52(19), pp. 11060–11068. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02117>

22. Piotrowska K., Panek E. Testing of Selected Phytoindicators for the Environmental Assessment of Areas under Various Levels of Pollution. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 73–81. <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2012.6.4.73>

23. Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A.J. A Preliminary Investigation in Using *Pohlia Nutans* and *Larix Decidua* as Biomonitors of Air Pollution by the Coke Industry in Wałbrzych (SW Poland). *Polish Journal of Environmental Studies*, 2008, vol. 17, iss. 1, pp. 121–128.

24. Vosel Y., Belyanin D., Melgunov M., Vosel S., Mezina K., Kropacheva M., Shcherbov B. Accumulation of Natural Radionuclides (^7Be , ^{210}Pb) and Micro-Elements in Mosses, Lichens and Cedar and Larch Needles in the Arctic Western Siberia. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 2880–2892. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10615-4>

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 625.77:631.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-91-108

Влияние насаждений *Quercus robur* L. и *Juglans rupestris* Engelm. на свойства степных почв

О.Е. Клименко[✉], д-р биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [E-7955-2017](https://orcid.org/0000-0002-9142-521X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9142-521X>

Н.И. Клименко, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [ABG-5722-2021](https://orcid.org/0000-0002-0305-8924),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0305-8924>

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, спуск Никитский, д. 52, пгт Никита, г. Ялта, Республика Крым, Россия, 298648; olga.gnbs@mail.ru[✉], klymenko.gnbs@mail.ru

Поступила в редакцию 12.10.22 / Одобрена после рецензирования 09.01.23 / Принята к печати 12.01.23

Аннотация. Целью исследования было определить состояние *Quercus robur* L. и *Juglans rupestris* Engelm. и их влияние на свойства сегрегационных черноземов. Исследование проводили в 2020–2021 гг. в степном Крыму. Контролем служила многолетняя травянистая залежь. Для характеристики общего состояния деревьев использовали 4-балльную шкалу оценки состояния интродуцентов. Для анализа почв применяли стандартные методы. Установлены лучшая сохранность и большее количество 50-летних растений в отличном и хорошем состоянии для *Q. robur* (67 и 56 % соответственно) по сравнению с *J. rupestris* (48 и 42 % соответственно) в данных экологических условиях, что объясняется большими адаптационными возможностями дуба как аборигенного вида. Обе древесные культуры влияли на свойства почв. В их фитоценозах образовалась подстилка, более значительная под *J. rupestris*, темногумусовый горизонт также оказался более мощным под насаждением *J. rupestris* (80 см), чем под *Q. robur* и залежью (72 и 70 см соответственно). Под *Q. robur* плотность почвы ниже, чем под *J. rupestris*, на 0,02–0,18 г/см³. Под древесными растениями произошло улучшение структуры почвы: снижение количества глыбистых агрегатов, увеличение числа агрономически ценных и зернистых частиц. Максимальным коэффициент структурности был в почве под дубом (4,4–6,6), что превышало контроль в 2,5–4,9 раза. Под древесными растениями из профиля почвы значительно вымыты карбонаты, особенно под *J. rupestris*. Величина рН_{Н₂О} щелочной почвы под древесными растениями снизилась на 0,2–0,4 и была тесно связана с карбонатностью ($r = 0,83–0,91$). Содержание гумуса под обеими породами существенно выше, чем под залежью, – на 0,30–0,86 %. Облесение обусловило накопление валовых форм элементов питания, в большей степени под *J. rupestris*, снижалось соотношение С:N. Древесные породы запасали больше мобильных форм элементов питания в почве. В древесных ценозах отмечено рассоление почвы. Таким образом, *J. rupestris* и *Q. robur* экологически устойчивы в условиях центральной степи Крыма и могут быть использованы для повышения лесистости в степных районах. Это будет способствовать улучшению плодородия почвы.

Ключевые слова: лесные культуры, облесение, *Quercus robur* L., *Juglans rupestris* Engelm., чернозем, свойства почвы, степь, плодородие, Крым

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Никитского ботанического сада № 0829-2019-0031.

Для цитирования: Клименко О.Е., Клименко Н.И. Влияние насаждений *Quercus robur* L. и *Juglans rupestris* Engelm. на свойства степных почв // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 91–108. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-91-108>

Original article

The Influence of *Quercus robur* L. and *Juglans rupestris* Engelm. Plantations on the Properties of Steppe Soils

Olga E. Klimenko[✉], Doctor of Biology, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [E-7955-2017](https://orcid.org/0000-0002-9142-521X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9142-521X>

Nikolay I. Klimenko, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [ABG-5722-2021](https://orcid.org/0000-0002-0305-8924),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0305-8924>

Nikitsky Botanical Garden – National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nikitsky spusk, 52, Nikita urb. settlement, Yalta, Crimea, 298648, Russian Federation; olga.gnbs@mail.ru[✉], klymenko.gnbs@mail.ru

Received on October 12, 2022 / Approved after reviewing on January 9, 2023 / Accepted on January 12, 2023

Abstract. The aim of the study has been to determine the condition of *Quercus robur* L. and *Juglans rupestris* Engelm. and their influence on the properties of segregated chernozems. The study was conducted in 2020–2021 in the steppe Crimea. The control has been a perennial grass fallow. To characterize the general condition of the trees, a 4-point scale for assessing the condition of the introduced species has been used. Standard methods have been used for soil analysis. A better preservation and a greater number of 50-year old plants in excellent and good condition have been established for *Q. robur* (67 и 56 %, respectively) compared to *J. rupestris* (48 и 42 %, respectively) in these environmental conditions, which is explained by the greater adaptive capabilities of oak as an indigenous species. Both tree crops have influenced soil properties. In their phytocenoses, a litter has been formed, more significant under *J. rupestris*. The dark humus horizon has also turned out to be thicker under the *J. rupestris* plantation (80 cm) than under the *Q. robur* plantation and the fallow (72 and 70 cm, respectively). Under *Q. robur* the soil density has been lower than under *J. rupestris* by 0.02–0.18 g/cm³. Under the woody plants, the soil structure has improved: the number of lumpy aggregates has decreased, and the number of agronomically valuable and granular particles has increased. The maximum coefficient of structure has been in the soil under the oaks (4.4–6.6), which exceeded the control by 2.5–4.9 times. Under the woody plants, carbonates have been significantly washed out of the soil profile, especially under *J. rupestris*. The pH_{H2O} value of the alkaline soil under the woody plants has decreased by 0.2–0.4 and has been closely related to carbonate content ($r = 0.83–0.91$). The humus content under both species has been significantly higher than under the fallow – by 0.30–0.86 %. Afforestation has resulted in the accumulation of total forms of nutrients, to a greater extent under *J. rupestris*, and the C:N ratio has decreased. Tree species have stored more labile forms of nutrients in the soil. Soil desalination has been noted in the tree cenoses. Thus, *J. rupestris* and *Q. robur* are ecologically stable in the conditions of the central steppe of Crimea and can be used to increase forest cover in steppe areas. This will help improve soil fertility.

Keywords: forest plantations, afforestation, *Quercus robur* L., *Juglans rupestris* Engelm., chernozem, soil properties, steppe, fertility, Crimea

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Nikitsky Botanical Garden no. 0829-2019-0031.



For citation: Klimenko O.E., Klimenko N.I. The Influence of *Quercus robur* L. and *Juglans rupestris* Engelm. plantations on the Properties of Steppe Soils. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 91–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-91-108>

Введение

Создание лесных насаждений в степи является важным звеном в защите почв от ветровой и водной эрозии, сохранении и накоплении влаги, повышении биоразнообразия и восстановлении деградировавших почв после их длительно-интенсивного использования под пашню. В последние десятилетия в связи с изменением климата создание агролесокультурных ландшафтов приобретает все большее значение [21–23]. Для устройства лесных насаждений обычно используют аборигенные для данной местности виды или близкие с ними по экологическим потребностям к почвенно-климатическим условиям места закладки. В степи, где древесная растительность отсутствует, часто применяют интродуценты. Однако не все виды древесных растений в силу своих биологических особенностей могут приспособиться к жестким почвенно-климатическим условиям степи и существовать в них. Для создания таких насаждений необходимы длительные эксперименты по интродукции растений из разных мест земного шара, их акклиматизации и разработка ассортиментов для того или иного региона, района, города и т. д. [15, 16, 18]. При создании лесных насаждений сами древесные растения активно влияют не только на микроклимат, но и на свойства почвы (содержание и запасы органического вещества, влаги), изменяют структурное и агрегатное состояние почвы, способствуют перераспределению элементов питания по ее профилю [1, 12, 26]. Установлено также, что степень и направленность воздействия на почву зависит от вида интродуцента [9, 19, 20, 26]. Однако в большинстве случаев исследования проводят в смешанном древостое, что не позволяет выявить влияние конкретного вида древесного растения на свойства почвы [3, 22]. Таким образом, влияние многих распространенных, а также редко встречающихся интродуцентов на почвы степи изучено недостаточно.

Цель нашего исследования – определить состояние дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и ореха скального (*Juglans rupestris* Engelm.) и их влияние на физические и химические свойства сегрегационных черноземов Крыма.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2020–2021 гг. в лаборатории степного садоводства Никитского ботанического сада (с. Новый Сад Симферопольского района Республики Крым). Объектами исследования были насаждения дуба черешчатого (далее – дуб) и ореха скального (далее – орех) в дендропарке, а также почвы под этими насаждениями. Место исследования относится к центрально-степному агроклиматическому району Крыма. Климат района засушливый, умеренно жаркий с умеренно мягкой зимой [5]. Среднегодовая температура воздуха составляет 10,5 °С, среднегодовое количество осадков – 480 мм.

Дендропарк, где заложены изученные насаждения, находится в нижней части широкого ложинообразного понижения, примыкающего с севера и северо-за-

пада к с. Новый Сад (самая северная точка – $45^{\circ}09'09,15''$ с. ш. $33^{\circ}59'36,11''$ в. д. и самая южная – $45^{\circ}08'54,45''$ с. ш. $33^{\circ}59'34,98''$ в. д., высота над уровнем моря – 124–128 м). Почвенный покров территории однороден по генезису и представлен сегрегационными постагрогенными среднемошными и мощными турбированными легкоглинистыми на красно-бурых легких глинах черноземами, по классификации почв России [26]. Согласно классификации WRB–2015 [24], почвы определены как *Naptic Chernozems (Clayic)*. Перед закладкой насаждений все почвы были плантажированы на глубину 60 см.

Деревья в дендропарке высажены в 1972 г. 5-летними саженцами группами по 30–60 экз., схемы посадки – 3×3 (орех) и 4×4 (дуб) м [8].

Для оценки роста и состояния растений в 2020 г. проведен учет биометрических показателей: высоты (высотомером оптическим ВА, точность измерения – 4 %) и диаметра ствола на высоте 1,3 м (мерной вилкой, точность измерения – 0,5 см). Если у дерева наблюдалось разветвление ствола ниже высоты 1,3 м, производили замеры самого крупного ствола. Диаметр горизонтальной проекции кроны определяли путем проецирования ее краев на горизонтальную поверхность и замера рулеткой в направлениях С–Ю и З–В с последующим вычислением среднего диаметра кроны. Общее состояние характеризовали по 4-балльной шкале оценки состояния древесных интродуцентов Р.В. Галушко [7]: 1 балл – плохое состояние, прирост слабый; 2 балла – удовлетворительное состояние, прирост побегов средний, цветение и плодоношение необильное и нерегулярное, растения страдают от неблагоприятных условий среды; 3 балла – хорошее состояние, растет, цветет и плодоносит нормально; 4 балла – отличное состояние, хороший ежегодный прирост побегов, нормальное цветение и плодоношение, растения не страдают от неблагоприятных условий внешней среды.

Для анализа изменения свойств почвы в центре каждого участка лесных культур на расстоянии 1–2 м от ствола дерева на глубину 120–180 см был заложен разрез и проведено полное морфологическое описание почвы. Для оценки природного варьирования свойств почвы на расстоянии 3–5 м от каждого разреза ручным буром на глубину 100 см заложено по 3 скважины. Для сравнения на участке, не занятом древесной растительностью и не распаханном с 1970 г. (далее – залежь), был выполнен разрез и дублирующие скважины. Участки древесной растительности и залежи находились на расстоянии 100–200 м друг от друга. Поверхность исследуемой территории ровная.

Образцы почв в разрезах отбирали по генетическим горизонтам, в скважинах – послойно каждые 20 см с кратким описанием свойств почвы. В образцах определяли плотность сложения почвы – буровым методом, структурный анализ выполняли по Н.И. Саввинову, полевую влажность почвы устанавливали термостатно-весовым методом [4]. Показатель рН водной суспензии из почвы определяли потенциометрически по ГОСТ 26423–85; солевой состав водной вытяжки – по ГОСТ 26424–85–26428–85; содержание органического вещества – методом И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова, В.П. Цыпленкова (ГОСТ 26213–91); валовый азот – по Й. Кьельдалю [6]; валовые формы фосфора и калия – по ГОСТ 26261–84; нитратный азот – потенциометрически (ГОСТ 26951–86); подвижный фосфор и обменный калий – по Б.П. Мачигину (ГОСТ 26205–91).

Для оценки полевой влажности и плотности сложения почвы образцы отбирали отдельно по 10-сантиметровым слоям до глубины 100 см, для структурно-агрегатного анализа – по 20-сантиметровым слоям до глубины 60 см (в 3-кратной повторности) [4].

Результаты исследования и их обсуждение

Quercus robur L. – одна из важнейших лесообразующих пород в европейской части нашей страны, формирующая широколиственные леса (дубравы) на юге лесной и лесостепной зон [10]. При создании лесных массивов в степи на протяжении XIX в. дуб черешчатый был признан главной породой, т. к. он достаточно засухоустойчив и холодостоек [11, 14]. В Крыму этот вид распространен в предгорьях. В степной зоне встречался по оврагам и балкам, в которых почти полностью уничтожен распашкой.

В исследованном насаждении дуба деревья находятся в основном в отличном, хорошем и удовлетворительном состоянии, плодоносят, сомкнутость крон – 0,8–0,9 (рис. 1). Из элементов угнетения отмечается усыхание нижних ветвей. Травяной покров изреженный (проективное покрытие – 20–30 %) и представлен в основном злаками. В подросте у стволов деревьев встречаются единичные экземпляры бирючины обыкновенной (*Legustrum vulgare* L.) и вишни магалебской (*Prunus mahaleb* L.). Поверхность почвы достаточно уплотнена в результате антропогенной нагрузки (место отдыха местного населения).

Juglans rupestris в природе распространен в горных лесах Северной Америки (Техас, Нью-Мексико) до высоты 2000 м над ур. м. В культуре с 1868 г. Деревья очень засухоустойчивы и рекомендованы для зеленого строительства на неорошаемых участках степных почв в виде небольших групп [8].

Большинство растений ореха имеют возраст 50 лет и в условиях степи находятся в целом в удовлетворительном состоянии: проявляют суховершинность, наблюдается усыхание скелетных ветвей, ослабленный рост, многие деревья погибли, сомкнутость крон составляет 0,3–0,4 (рис. 1). Это связано с недолговечностью насаждений ореха скального в степи и необходимостью их возобновления в возрасте 50–60 лет.



Рис. 1. Насаждения дуба (слева) и ореха (справа) в возрасте 50 лет в отделе степного садоводства Никитского ботанического сада, 2021 г.

Fig. 1. The oak (left) and walnut (right) plantations aged 50 years in the steppe gardening department of the Nikitsky Botanical Garden, 2021

В насаждении ореха травяной покров представлен в основном пыреем ползучим (*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski), встречается также мятлик узколистный (*Poa angustifolia* L.), вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.), луки (*Allium* L.), проективное покрытие составляет 100 %. В подросте единично

отмечены каркас южный (*Celtis australis* L.), бирючина обыкновенная, яблоня (*Malus domestica* (Suckow) Borkh.), шелковица (*Morus alba* L.), дуб черешчатый.

Исследование выявило, что сохранный 50-летних дубов была более высокой, чем ореха (табл. 1). Дубы отличались большими по сравнению с орехом диаметрами ствола, кроны и высотой. В данных экологических условиях они находились в лучшем состоянии: деревьев, характеризовавшихся как отличные и хорошие, зафиксировано более 50 %, у ореха, наоборот, экземпляров в удовлетворительном и плохом состоянии оказалось больше 50 %.

Таблица 1

**Биоэкологические особенности исследованных древесных растений
в условиях степного Крыма, 2021 г.
The bioecological features of the studied woody plants
in the conditions of the steppe Crimea, 2021**

Вид	Количество деревьев, шт.		Сохранность, %	Средние*			Распределение, %, по общему состоянию, баллы			
	посаженных	выживших		высота, м	диаметр ствола, см	диаметр кроны, м	4	3	2	1
Дуб	24	16	67	12,8±0,7	27,1±1,5	6,9±0,5	44	12	38	6
Орех	60	29	48	9,1±0,4	20,7±2,6	4,8±0,2	28	14	34	24

*Здесь и далее: среднее арифметическое ± стандартная ошибка.

Следует отметить, что среди растений ореха, находящихся в учете, более 1/3 (38 %) и мели 2 и более стволов, т. к. основной ствол дерева усыхает из-за недостатка влаги. У дуба таких деревьев было всего 3 (19 %). Это свидетельствует о больших адаптационных возможностях дуба как аборигенного вида в экологических условиях центральной степи Крыма.

На залежи почвенный разрез был расположен в пределах ассоциации типа *Festuca rupicola* + *Poa pratensis* (+*Poa angustifolia*, *Coronilla varia*). Флористическое богатство залежи составляет порядка 50 видов с преобладанием корневищных и плотнодерновинных группировок [17].

Исследование почв показало, что на участках сформировались черноземы сегрегационные постагрогенные среднемоштные (под дубом и залежью) и мощные (под орехом). В почве под древесными насаждениями образовался органогенный горизонт – подстилка глубиной до 7 см под орехом и до 5 см под дубом, состоящая из листьев, мелких веточек, ветоши. Под дубом подстилка в нижней части обильно пронизана грибным мицелием, под орехом мицелий встречался фрагментарно. Под залежью и орехом на глубине 0(7)–12 см отмечен горизонт дернины, сформированный разнотравно-злаковой растительностью, обильно представленной под орехом. Ниже – темногомусовый горизонт мощностью 60 см под залежью и дубом и 67 см под орехом, имеющий под залежью мелкокомковато-зернистую, а под лесными культурами – комковато-мелкоореховатую структуру. Переходный гумусовый горизонт был более мощным под орехом (до глубины 80 см), под залежью и дубом распространялся до глубины 70 и 72 см соответственно. Кроме того, под насаждением ореха наблюдалось передвижение гумуса по ходам корней на глубину 120 см, что обусловлено «...наличием крупных трещин в почвенном слое, образованных корневой си-

стемой деревьев» [20, с. 37]. В нижележащих горизонтах различий в морфологии между почвами под разными угодьями не наблюдалось.

При сельскохозяйственном использовании почв под действием постоянных вспашек, применения тяжелой техники происходит уплотнение верхних слоев и разрушение структуры почвы. По мнению многих исследователей и нашим данным, при агролесомелиорации на залежи улучшается структура почвы, особенно верхних слоев [2, 9, 17, 19, 20, 22, 26]. Анализ плотности сложения почвы показал, что в слое 5–10 см под древесными культурами она была на уровне (орех) показателя под залежью или несколько ниже (дуб) (табл. 2). Ниже по профилю плотность почвы возрастала под всеми угодьями и под древесными породами была выше, чем под залежью, что также отмечается некоторыми авторами для южных черноземов под лиственными породами [20].

Таблица 2

Плотность сложения и полевая влажность почвы под залежью и древесными насаждениями, 2020 г.
The density of soil structure and field moisture under the fallow and tree plantations, 2020

Глубина, см	Объемная масса, г/см ³			Полевая влажность, %	
	Залежь	Дуб	Орех	Дуб	Орех
5–10	1,08	1,01	1,08	25,9*	19,2
10–20	1,24	1,25	1,29	16,9*	14,5
20–30	1,34	1,39*	1,49	17,6*	13,2
30–40	Нет данных	1,44*	1,55	18,7	18,0
40–50	1,40	1,49	1,57	18,5	16,9
50–60	1,40	1,57	1,59	19,2*	14,3
60–70	1,44	1,60*	1,65	11,3	12,7
70–80	1,44	1,63*	1,70	11,9*	8,4
80–90	1,48	1,63*	1,75	15,5*	7,2
90–100	1,48	1,58*	1,76	15,1*	7,8

*Разница с соответствующим слоем почвы под орехом статистически значима ($p \leq 0,05$).

Под дубом плотность сложения была ниже, чем под орехом, по всему 100-сантиметровому слою на 0,02–0,18 г/см³, существенно ниже – в слоях 20–40 и 60–100 см, по-видимому, за счет более мощной и разветвленной корневой системы дуба. Меньшая плотность сложения почвы под дубом связана также с более высокой влажностью почвы под этой породой. Показатель был максимальным под подстилкой в слое 5–10 см и имел еще 2 максимума – в слоях 50–60 и 80–100 см. Наиболее значительное превышение влажности почвы под дубом по сравнению с орехом обнаружено на глубинах 5–30, 50–60 и 70–100 см. Более высокая влажность почвы под дубом связана, на наш взгляд, со внушительными параметрами крон и их большей сомкнутостью по сравнению с орехом, что уменьшает испарение с поверхности. Установлена прямая отрицательная сильная достоверная корреляционная связь между плотностью и влажностью почвы под древесными растениями ($r = -0,70$, при числе проб – 10).

При смене типа растительности изменяется и структурное состояние почвы, которое определяет многие ее физические свойства [21]. Под залежью в почве достаточно высокой была доля глыбистой фракции, которая увеличивалась с глубиной, что является следствием многолетнего использования почвы под пашню, где содержание глыбистых частиц на тяжелых почвах

Таблица 3

Структурное состояние почвы под залежью и древесными насаждениями, 2020 г.
The structural condition of the soils under the fallow and tree plantations, 2020

Ценоз	Глубина, см	Распределение, %, фракций по размеру, мм											Распределение, %, суммы фракций по размеру, мм		K _{стр} **
		более 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	<0,25	>10 + <0,25	10–0,25			
Залежь	0–20	16,2±1,3	11,8±0,9	6,9±0,5	5,1±0,6	14,7±1,5	28,5±2,3	2,1±0,6	3,0±0,4	11,7±0,7	27,9±1,2	72,0±1,0	2,6±0,3		
	20–40	37,2±0,8	15,4±2,1	10,2±0,4	7,7±1,1	12,9±1,1	9,7±0,7	1,8±0,4	3,1±0,5	2,0±0,4	39,2±0,7	60,8±1,3	1,6±0,2		
	40–60	50,6±2,6	12,1±1,3	8,0±0,5	5,5±0,3	9,8±1,0	7,6±0,5	1,8±0,4	2,7±0,3	1,9±0,2	52,5±2,4	47,5±0,9	0,9±0,1		
Дуб	0–20	12,3±4,3	12,5±0,8	20,4±1,8*	15,3±1,1*	20,0±3,1*	11,4±2,3*	2,5±1,0*	3,0±1,5	2,6±0,7*	14,9±3,9*	85,1±3,9*	6,6±1,6		
	20–40	14,1±1,1*	16,2±1,5	16,3±1,1*	10,1±0,6*	17,6±1,1*	14,1±0,7*	3,8±0,4*	5,0±0,6	2,8±0,2*	16,9±0,9*	83,1±0,9*	4,9±0,3*		
	40–60	14,0±3,4*	11,6±2,1	11,0±0,5*	9,4±0,3*	18,5±2,0*	18,2±2,0*	4,3±0,4*	7,4±0,5*	5,7±0,3*	19,7±3,3*	80,3±3,3*	4,4±0,8*		
Орех	0–20	11,5±1,6	14,1±1,2	18,0±0,5*	24,4±1,0*	7,6±0,1*	11,7±0,4*	8,1±0,7*	2,6±0,3	2,0±0*	13,6±1,6*	86,4±1,6*	6,4±0,9*		
	20–40	29,8±0,4*	13,6±1,5	11,7±0,4	13,1±0,3*	5,6±0,3*	10,5±0,4	10,9±0,8*	3,3±0,6	1,4±0,4	31,2±0,6*	68,8±0,6*	2,2±0,1		
	40–60	16,7±1,5	12,5±1,6	11,0±1,4	8,8±0,3*	16,9±1,0*	17,5±1,8*	4,7±0,6*	6,9±1,6	5,0±1,3	21,7±0,9*	78,3±0,9*	3,6±0,2*		

* Разница с залежью значима ($p \leq 0,05$, при числе проб – 3). ** Коэффициент структурности.

иногда достигает 60–70 % [26]. Под лесными культурами содержание глыб значительно снизилось, особенно на глубине 20–60 см, в большей степени под дубом. Следует отметить, что в слое 20–40 см количество крупных частиц (>10 мм) под дубом было существенно ниже, чем под орехом (табл. 3).

Под дубом лидирующее место занимала фракция размером 2–3 мм, содержание которой максимально в слое 0–20 см и незначительно уменьшалось с глубиной. Под орехом преобладала фракция размером 3–5 мм, но только в слое 0–20 см, с глубиной ее доля резко снижалась. Сумма зернистых агрегатов размером 1–5 мм в почве под залежью была максимальной в слое 0–20 см (48,3 %), ниже по профилю она снижалась до 30,3 % (20–40 см) и 22,9 % (40–60 см). Под древесными культурами доля этой фракции в слое 0–20 см оказалась ниже, чем под залежью (46,7 и 43,7 % под дубом и орехом соответственно), а в нижележащих слоях была в основном выше, особенно под дубом, и составила 41,8–46,1 % (в слое 0–40 см различия в содержании фракций этого размера между дубом и орехом были существенными). Это свидетельствует о более значительном влиянии на формирование зернистой структуры в слое 0–20 см травянистых растений, а древесных – в более глубоких слоях за счет большего распространения корней деревьев в глубину.

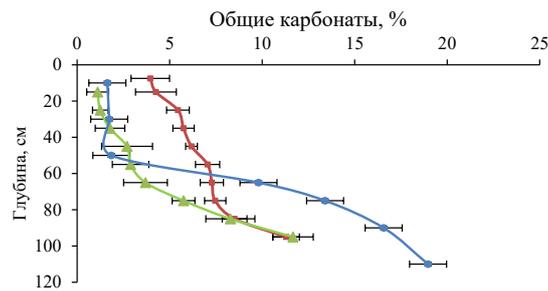
Содержание пылеватой фракции (<0,25 мм) под залежью было довольно значительным в слое 0–20 см и резко снижалось с глубиной. Под древесными породами количество этой фракции существенно меньше, чем под залежью, но имело тенденцию увеличиваться с глубиной, причем под дубом в слое 20–40 см доля частиц пыли оказалась существенно выше, чем под орехом. Это же явление наблюдали В.И. Турусов с соавт. [21] на сегрегационных черноземах Центрального Черноземья.

Почва под лесными породами была более оструктуренной, о чем свидетельствует коэффициент структурности. Состояние структуры под древесными культурами было отличным ($K_{стр} > 1,5$) по всему 60-сантиметровому слою почвы. Максимальный коэффициент отмечен для почв под дубами. Как достаточно высокий он также характеризовался для почв под растениями ореха в слое 0–20 см, что превышало показатель для почв под залежью в 2,6 раза. При этом под дубом в слое 20–40 см было существенно больше число наиболее ценных мелких фракций размером 1–3 мм – на 4–12 % – по сравнению с орехом.

Карбонатность почвы – важный генетический признак и диагностический показатель антропогенного воздействия [9]. Установлено, что наличие и содержание общих карбонатов в профиле почв под изученными ценозами было различным (рис. 2).

Рис. 2. Содержание общих карбонатов (в пересчете на CaCO_3) в почвах под залежью и древесными насаждениями, 2020 г. (— залежь; — дуб; — орех). Здесь и далее на рисунках: горизонтальные отрезки – ошибка среднего при числе проб – 4

Fig. 2. The total carbonate content (in terms of CaCO_3) in the soils under the fallow and tree plantations, 2020 (— fallow; — oak; — walnut). Hereinafter in the figures: horizontal segments – the error of mean with the number of samples equal to 4



Так, под залежью вскипание от 10 % HCl отмечалось с глубины 50 см, под растениями ореха – с 73–77 см, в биоценозе дуба – с поверхности. Содержание общих карбонатов (в пересчете на CaCO_3) в слое 0–60 см было очень низким под залежью и орехом (различия средних несущественны, $p \leq 0,05$). Под дубом их количество в этом слое существенно выше, чем под 2 другими угодьями, но также описывается как невысокое и колеблется в пределах 4–7 %. Это связано с тем, что почва перед закладкой насаждений подвергалась плантажной вспашке на глубину 60 см. Ниже указанной глубины, в слое 60–80 см, максимальное содержание общих карбонатов зафиксировано под залежью, минимальное – под орехом. В слое 80–120 см их количество было одинаковым под лесными культурами и существенно ниже, чем под залежью. Это может свидетельствовать о вымывании карбонатов из нижележащих слоев почвы за счет дренирования ее глубокой корневой системой древесных растений, что подтверждается ранее проведенными исследованиями [13].

Почвы исследуемой территории характеризовались как щелочные. Величина pH_{H_2O} была минимальная в гумусовом горизонте и увеличивалась с глубиной (рис. 3). В слое 5–10 см под залежью и орехом она оказалась практически одинаковой, под дубом – существенно выше в связи с более высоким содержанием карбонатов.

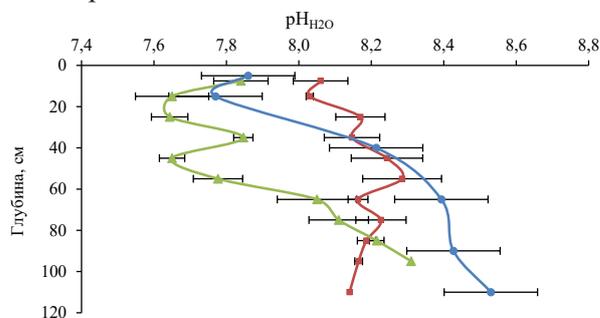


Рис. 3. Величина pH_{H_2O} почвы под залежью и древесными насаждениями, 2020 г. (—залежь; — дуб; — орех)

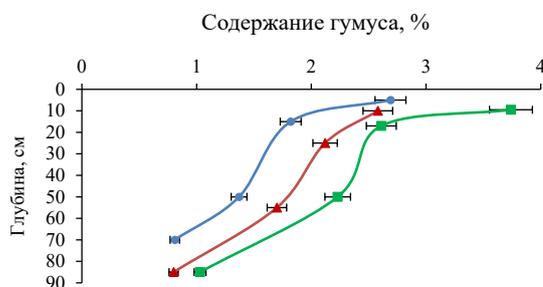
Fig. 3. The pH_{H_2O} value of the soils under the fallow and tree plantations, 2020 (—fallow; — oak; — walnut)

В слое 10–30 см pH_{H_2O} снижался под всеми ценозами в связи с перемешиванием естественных слоев почвы при вспашке. В почве под орехом pH_{H_2O} существенно ниже, чем под залежью и дубом, в слое 20–70 см. С глубины 60 см pH_{H_2O} почвы под залежью резко возрастал и под лесными культурами был ниже на 0,2–0,4, чем под залежью, за счет более глубокого проникновения корневой системы деревьев и подкисления среды корневыми экссудатами, а также большей выщелоченности карбонатов из-за высокой водопроницаемости почвы, обусловленной ходами корней. Данное явление установлено нами ранее [26] и подтверждается в ряде исследований [9, 27, 29]. В целом pH_{H_2O} в большей степени определялся содержанием карбонатов в почве под всеми ценозами ($r = 0,83–0,91$).

Содержание гумуса – основной показатель плодородия почв – в слое 0–10 см было одинаковым под залежью и дубом и значительно ниже, чем под орехом (рис. 4). Последнее, очевидно, связано с наибольшим развитием травянистой растительности в фитоценозе ореха. С глубиной содержание гумуса уменьшалось, более резко – под залежью, и с глубины 30 см там было существенно ниже, чем под лесными культурами. Зафиксировано большим содержание гумуса по всему гумусовому горизонту под орехом по сравнению с дубом, наиболее существенная разница отмечается для слоя 20–60 см, но достоверно выше показатель для почвы под древесными растениями по сравнению с залежью – на 0,30–0,86 %. Запас гумуса в слое 0–80 см был также максимальным под орехом и составил 295 т/га, под дубом и залежью он ниже – 266 и 251 т/га соответственно.

Рис. 4. Содержание гумуса в почве под залежью и древесными насаждениями, 2020 г. (—залежь; — дуб; — орех)

Fig. 4. The humus content in the soils under the fallow and tree plantations, 2020 (—fallow; — oak; — walnut)



Содержание валовых форм элементов питания в почвах характеризует их потенциальное плодородие и накопление элементов в процессе развития ценоза. Количество валового азота в гумусовом слое колебалось в пределах 0,13–0,27 % и было минимальным под залежью (табл. 4). Под орехом в слое 0–60 см его было больше, чем под дубом, – 17,8 и 13,3 т/га соответственно, что превышало показатель для почвы под залежью (8,3 т/га). В связи с этим соотношение С:N было максимально для почвы под залежью, ниже – под лесными культурами и имело тенденцию к уменьшению по профилю под орехом, под дубом оказалось более стабильным. Это характеризует относительное накопление валового азота в почве под лесными породами, что отмечено ранее [13, 26].

Таблица 4

Содержание валовых форм элементов питания в почвах под залежью и древесными насаждениями, 2021 г.
The content of total forms of nutrients in the soils under the fallow and tree plantations, 2021

Ценоз	Глубина, см	С _{орг} *	Валовые формы, %			С:N
			N	P	K	
Залежь	0–10	2,69	0,23	Нет данных		11,7
	10–20	1,82	0,15			12,1
	60–80	0,81	0,07			11,6
Дуб	5–15	1,50	0,20	0,40	1,30	7,5
	20–30	1,23	0,17	0,38	1,26	7,2
	50–60	0,99	0,13	0,35	0,87	7,6
Орех	7–12	2,17	0,27	0,45	1,48	8,0
	12–22	1,51	0,21	0,27	1,19	7,2
	40–60	1,29	0,20	0,13	0,93	6,5
	80–90	0,60	0,13	0,25	0,83	4,6

*Общий органический углерод, %.

Содержание валового фосфора в почвах под лесными культурами в верхнем слое было достаточно высоким и примерно одинаковым. С глубиной под орехом оно значительно снижалось с большим варьированием по горизонтам. Под дубом в слое 20–60 см содержание валового фосфора оставалось достаточно высоким и превышало значение для почвы под орехом на 0,1–0,2 %. Такие цифры подтверждают ранее полученные данные [28].

Количество валового калия в почвах под лесными культурами также различалось: под орехом оно было более высоким в верхнем слое и резко снижалось на глубине 12–22 см. Под дубом в этом слое оно характеризовалось как еще достаточно высокое, однако сокращалось на глубине 50–60 см. Запасы валового калия в 60-сантиметровом слое почвы под орехом составили 94 т/га, под дубом – 90 т/га. Это свидетельствует о значительном и примерно равном вкладе этих лесных пород в обогащение почвы валовым калием.

Таким образом, биотоп ореха отличался большим содержанием валовых форм элементов питания за счет как своего опада, так и более мощного травяного покрова. Однако под дубом элементы накапливались более равномерно по почвенной толще из-за более глубокой и мощной корневой системы, запасы валового калия были сопоставимыми в почвах под обеими лесными культурами.

Содержание мобильных форм элементов питания характеризует эффективное плодородие почвы. Данные показывают, что уровень нитратного азота в почвах был низким под всеми ценозами и уменьшался с глубиной (рис. 5, а).

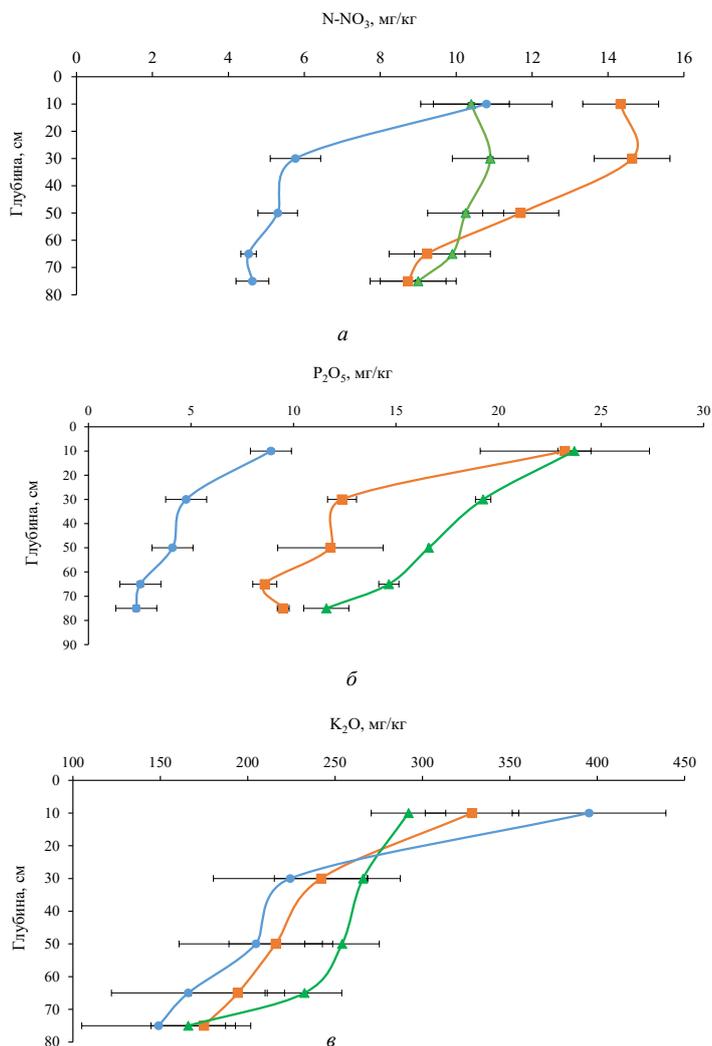


Рис. 5. Содержание в почве под залежью и древесными насаждениями, 2020 г.: а – нитратного азота; б – подвижного фосфора; в – обменного калия (— залежь; — дуб; — орех)

Fig. 5. The content in the soils under the fallow and tree plantations, 2020: а – nitrate nitrogen; б – labile phosphorous; в – exchange potassium (— fallow; — oak; — walnut)

Под лесными ценозами показатель был выше по сравнению с залежью, наиболее значительно – под дубом. В слое 0–30 см количество N–NO₃ под дубом было максимальным и существенно больше, чем под орехом и залежью. В слое 50–80 см его концентрация оказалась практически одинаковой под лесными ценозами и существенно выше, чем под залежью. Это обусловлено более глубокой корневой системой древесных растений и увеличением нитрификационной способности почв, причиной которой является деятельность микроорганизмов, живущих в ризосфере растений.

Содержание подвижного фосфора в почве под залежью было низким (рис. 5, б). Древесные растения способствовали существенному накоплению фосфо-

ра по всему профилю почвы, максимально – в слое 0–20 см, где количество этого элемента было почти одинаковым под обеими культурами и достоверно превышало показатель для почвы под залежью. Ниже по профилю количество P_2O_5 под орехом было несколько выше, чем под дубом (различия существенны только для слоя 20–40 см, $p < 0,05$).

Концентрация обменного калия в почве была высокой, максимальной – под залежью в слое 0–20 см (рис. 5, в). Ниже по профилю она постепенно уменьшалась до 150–200 мг/кг, была незначительно выше под древесными породами по сравнению с залежью и несколько выше под орехом по сравнению с дубом (различия статистически незначимы, $p > 0,05$).

Для почв степи, которые нередко бывают засоленными, важно знать состав легкорастворимых солей и влияние лесных культур на их содержание. Данные показывают, что почвы под всеми ценозами не были засолены легкорастворимыми солями до глубины 120–150 см, сумма солей составляла 0,04–0,07 %. Для почв под залежью сумма солей достаточно высокая на глубине 0–10 см, затем в слое 10–80 см она резко снижалась, возможно, из-за их поглощения травянистыми растениями и накоплением в поверхностном слое с опадом трав. Ниже по профилю, к почвообразующей породе, показатель опять возрастал (табл. 5).

Таблица 5

Катионно-анионный состав водной вытяжки из почв под залежью и древесными насаждениями, 2021 г.
The cation-anion composition of aqueous extract from the soils under the fallow and tree plantations, 2021

Ценоз	Глубина, см	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %	Содержание, смоль(экв)/кг						
				CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
Залежь	0–10	0,06	0,01	0,02	0,68	0,04	0,09	0,60	0,08	0,15
	10–20	0,05	0,01	0,02	0,50	0,08	0,10	0,44	0,04	0,22
	60–80	0,05	0,01	0,02	0,52	0,04	0,02	0,44	0,04	0,12
	100–120	0,06	0,03	0,02	0,52	0,04	0,20	0,32	0,08	0,38
	130–140	0,07	0,04	0,02	0,44	0,04	0,46	0,32	0,08	0,56
Дуб	5–15	0,05	0,01	0	0,52	0	0,08	0,52	0,04	0,04
	20–30	0,04	0	0	0,48	0	0,08	0,48	0,04	0,04
	50–60	0,04	0	0	0,48	0	0,08	0,48	0,04	0,04
	80–90	0,04	0	0	0,44	0	0,08	0,44	0,04	0,04
	100–120	0,05	0,01	0	0,44	0	0,16	0,52	0,04	0,04
Орех	7–12	0,05	0	0	0,56	0	0,08	0,56	0,04	0,04
	12–22	0,05	0,01	0	0,52	0	0,20	0,48	0,20	0,04
	40–60	0,05	0,01	0	0,52	0	0,12	0,48	0,12	0,04
	80–90	0,04	0,01	0	0,44	0	0,12	0,40	0,12	0,04
	100–120	0,04	0,01	0	0,44	0	0,08	0,36	0,12	0,04
	130–150	0,04	0,01	0	0,44	0	0,08	0,32	0,16	0,04

В почвах под лесными культурами сумма солей была ниже, чем в почве под залежью, с небольшими отличиями в зависимости от вида древесного растения. Так, под дубом сумма солей меньше, чем под залежью, по всему профилю почвы. Соли по профилю распределялись достаточно равномерно с небольшим

увеличением в слоях 5–15 и 100–120 см. Под растениями ореха накопление солей отмечено только на глубине 12–60 см, когда сумма солей превышала показатель для почв как под дубом, так и под залежью. Ниже по профилю она значительно уменьшалась – на 0,01–0,03 %. Это свидетельствует о высоком дренарующем эффекте корней древесных растений, особенно в слоях более 80 см.

Что касается состава легкорастворимых солей, то под залежью наблюдалось некоторое содопроявление: содержание иона CO_3^{2-} на уровне 0,02 смоль(экв)/кг и присутствие токсичной щелочности (гидрокарбонатов натрия и магния) по всему профилю. В почве под древесными породами ион CO_3^{2-} отсутствовал. Под дубом токсичная щелочность также не отмечена, под орехом наблюдалось присутствие гидрокарбонатов магния в незначительных количествах (0,04–0,12 смоль(экв)/кг). Снижение токсичной щелочности связано, на наш взгляд, с увеличением подвижности кальция в почве под древесными породами по всему профилю, кроме верхнего, 10–15-сантиметрового слоя.

Установлено невысокое содержание хлоридов под залежью и их почти равномерное распределение по всему профилю. Под лесными культурами хлориды были полностью выщелочены из профиля, что свидетельствует о более высоких дренарованности и водопроницаемости почвы под древесными растениями по сравнению с травянистыми.

Из токсичных нейтральных солей в почвах всех ценозов обнаружены сульфаты натрия и магния, а под залежью еще и хлориды натрия в незначительных количествах. Концентрация сульфатов и натрия в слое 0–60 см на залежи была невысокой, в более глубоких слоях увеличивалась до 0,20–0,56 смоль(экв)/кг. Под лесными культурами их содержание ниже, чем под залежью, особенно сульфата натрия. Сульфат магния под залежью отсутствовал, но появлялся в незначительных количествах под древесными культурами, что связано, вероятно, с уменьшением концентрации водорастворимого натрия под этими растениями.

Под залежью содержание водорастворимого кальция было ниже, чем под лесными культурами, что обусловлено не столько накоплением элемента под ними, сколько уменьшением его подвижности под залежью за счет присутствия соды и гидрокарбонатов магния [25]. Под орехом наблюдалось накопление иона магния, тогда как под дубом отмечено некоторое снижение его содержания в слоях 5–15 и 100–120 см по сравнению с залежью. Это также может свидетельствовать о большей водопроницаемости почвы под дубом за счет развития более мощной корневой системы, что способствовало вымыванию солей магния из профиля почвы.

Выводы

1. Установлено, что в жестких климатических условиях центрального Крыма наиболее адаптированным показал себя дуб черешчатый как аборигенный вид по сравнению с интродуцентом орехом скальным. Большинство 50-летних растений дуба были в отличном и хорошем состоянии, имели более значительные размеры и сомкнутость древостоя.

2. Под влиянием лесных насаждений изменялась морфология верхней (гумусированной) части почвенной толщи, образовался органогенный горизонт

(подстилка) мощностью 5–7 см, темногоумусовый и переходный гумусовый горизонты были более мощными под орехом (67 и 80 см соответственно), чем под залежью и дубом (60 и 70–72 см соответственно). Под растениями ореха карбонаты почвы характеризовались как выщелоченные на большую глубину (73–77 см) по сравнению с залежью (50 см). Под лесными культурами структура темногоумусового горизонта изменилась на комковато-мелкоореховатую по сравнению с мелкокомковато-зернистой на залежи.

3. Виды лесных культур влияли на физические свойства почвы: произошло некоторое уплотнение почвы, особенно значительное в нижних горизонтах, по сравнению с залежью, причем под дубом плотность сложения по всему профилю была ниже, чем под орехом, что в основном определялось увеличением влажности почвы под последним. Улучшалось структурное состояние почвы за счет уменьшения количества глыбистых частиц, увеличения числа агрономически ценных и зернистых агрегатов. Коэффициент структурности под древесными культурами был выше в 2–4 раза по сравнению с залежью, наиболее оструктуренной почва была под дубом.

4. Облесение приводило к изменению химических свойств степных почв: существенному снижению содержания общих карбонатов в слоях глубже 60 см, наиболее значительному под орехом, за счет дренирования этих слоев глубокой корневой системой деревьев; уменьшению рН водной вытяжки на 0,2–0,6 в зависимости от слоя почвы, что во многом определялось вымыванием карбонатов из почвы; увеличению содержания гумуса в слое 20–60 см на 0,30–0,86 %, максимально – под орехом вследствие более значительного развития травянистой растительности в фитоценозе; повышению запаса валового азота в 1,6 раза (дуб) и 2,0 раза (орех) и снижению соотношения C:N по сравнению с травянистой залежью; увеличению количества подвижных форм элементов питания – нитратного азота (в большей мере под дубом), обменных фосфора и калия (под орехом).

5. Почвы под всеми изученными ценозами были незасоленными до глубины 120–150 см. Древесные насаждения в степи способствовали уменьшению общего содержания солей и их токсичной составляющей по сравнению с травянистой растительностью. В составе солей также происходили изменения. В почвах под лесными культурами снижались щелочность, концентрации хлоридов и натрия и увеличивалась подвижность кальция. Для почв под дубом отмечено более значительное выщелачивание сульфатов и магния по сравнению с орехом, вероятно, за счет лучшей оструктуренности почвы, развития более мощной корневой системы и увеличения водопроницаемости почвы.

6. Таким образом, растения ореха скального и дуба черешчатого способствовали повышению плодородия почвы: увеличивали мощность гумусового горизонта, влажность и улучшали структуру, способствовали накоплению элементов питания и выщелачиванию солей по сравнению с травянистым ценозом. Однако почвы под этими двумя культурфитоценозами имели некоторые особенности. Под дубом оказалось больше влаги, была ниже плотность сложения, повышался коэффициент структурности, в почве накапливалось больше подвижного азота и зафиксировано существенно меньше токсичных сульфатов. Под растениями ореха гумусовый горизонт характеризовался как более мощный с большим накоплением гумуса, валового азота и подвижных форм фосфора и калия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безрукова А.С., Козловский Б.Л., Куропятников М.В. Изучение влияния парковых насаждений Ботанического сада ЮФУ на параметры микроклимата // Живые и биокос. системы. 2018. № 26. Режим доступа: <https://jbks.ru/archive/issue-26/article-1> (дата обращения: 04.09.24).

Bezrukova A.S., Kozlovskij B.L., Kuropyatnikov M.V. Study of the Influence of Parkland of the Botanical Garden of the Southern Federal University on the Parameters of the Microclimate. *Zhivye i biokosnyye sistemy* = Live and Bio-Abiotic Systems, 2018, no. 26. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2018-26-1>

2. Беляев А.Б. Многолетняя динамика свойств черноземов выщелоченных под разными лесонасаждениями // Почвоведение. 2007. № 8. С. 917–926.

Belyaev A.B. Long-Term Dynamics of the Properties of Leached Chernozems under Different Forest Plantations. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2007, vol. 40, pp. 821–829. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1064229307080030>

3. Беляев А.Б. Лесные экосистемы и их влияние на свойства и плодородие почв лесостепи ЦЧР // Тр. ин-та геологии Дагестан. науч. центра РАН. 2014. № 63. С. 53–56.

Belyaev A.B. Forest Ecosystems and Their Impact on the Properties and Fertility of Forest-Steppe Soils of the Central Chernozem Region. *Trudy instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN* = Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the RAS, 2014, no. 63, pp. 53–56. (In Russ.).

4. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Methods of Studying the Physical Properties of Soils*. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 416 p. (In Russ.).

5. Важов В.И. Агроклиматическое районирование Крыма // Труды Государственного Никитского ботанического сада. Ялта, 1977. Т. 71: Почвенно-климатические ресурсы Крыма и рациональное размещение плодовых культур. С. 92–120.

Vazhov V.I. Agroclimatic Zoning of Crimea. *Trudy Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* = Proceedings of the State Nikitsky Botanical Garden, 1977, vol. 71: Soil and Climatic Resources of Crimea and Rational Placement of Fruit Crops, pp. 92–120. (In Russ.).

6. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: МГУ, 1998. 272 с.

Vorobyova L.A. *Chemical Analysis of Soils*. Moscow, Moscow State University Publ., 1998. 272 p. (In Russ.).

7. Галушко Р.В., Горак Ю.С. О результатах интродукции древесных растений в Евпаторийском дендропарке // Бюл. ГНБС. 2002. Вып. 84. С. 53–57.

Galushko R.V., Gorak Yu.S. On the Results of the Introduction of Woody Plants in the Evpatoria Arboretum. *Byulluten Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden, 2002, iss. 84, pp. 53–57. (In Russ.).

8. Григорьев А.Г., Дзецина А.Н. Биоэкологические особенности видов рода *Juglans* L. при их интродукции в степной Крым // Бюл. ГНБС. 1987. Вып. 62. С. 59–64.

Grigor'ev A.G., Dzetsina A.N. Bioecological Features of Species of the Genus *Juglans* L. during Their Introduction into the Steppe Crimea. *Byulluten Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden, 1987, iss. 62, pp. 59–64. (In Russ.).

9. Гурин П.Д., Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю. Влияние лесопосадок и длительного сельскохозяйственного использования на свойства южных черноземов // Вестн. СПбГУ. Сер. 3. 2012. Вып. 2. С. 109–119.

Gurin P.D., Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu. The Influence of Forest Plantations and Long-Term Agricultural Use on the Properties of Southern Chernozems. *Vestnik SPbGU. Seriya 3* = Vestnik of Saint Petersburg University. Series 3, 2012, iss. 2, pp. 109–119. (In Russ.).

10. Деревья и кустарники СССР: дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции: в 6 т. Т. II. Покрытосеменные / ред. С.Я. Соколов. М.; Л.: АН СССР, 1951. 611 с.

Trees and Shrubs of the USSR: Wild, Cultivated and Promising for Introduction: in 6 vol. Vol. II. Angiosperms. Ed. S.Ya. Sokolov. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1951. 611 p. (In Russ.).

11. Ерусалимский В.И., Рожков В.А. Многофункциональная роль защитных лесных насаждений // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 121–137.

Erusalimskii V.I., Rozhkov V.A. The Multifunctional Role of Protective Forest Plantations. *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* = Dokuchaev Soil Bulletin, 2017, iss. 88, pp. 121–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-121-137>

12. Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Мостовая А.С. Влияние лесных посадок на эмиссию диоксида углерода из почвы в Поволжье и Подонье // Лесоведение. 2022. № 4. С. 339–350.

Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Mostovaya A.S. Forest Plantations Affect Carbon Dioxide Emission From Soils in Volga And Don Region. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2022, no. 4, pp. 339–350. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114822040118>

13. Казими́рова Р.Н. Почвы и парковые фитоценозы Южного берега Крыма. Киев: Аграр. наука, 2005. 183 с.

Kazimirova R.N. *Soils and Park Phytocenoses of the Southern Coast of Crimea*. Kyiv, Agrarna nauka Publ., 2005. 183 p. (In Russ.).

14. Макарычев С.В., Гефке И.В., Лебедева Л.В., Шорина И.В. Тепло и влага в почвенном профиле под древесными породами в условиях дендрария // Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та. 2017. № 7(153). С. 64–68.

Makarychev S.V., Gefke I.V., Lebedeva L.V., Shorina I.V. Heat and Moisture in Soil Profile under Tree Species under the Arboretum Conditions. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2017, no. 7(153), pp. 64–68. (In Russ.).

15. Оптимизация систем защитных лесных насаждений степного Крыма (методические рекомендации). Киев: ДИА, 2011. 40 с.

Optimization of the Systems of Protective Forest Plantations of the Steppe Crimea (Methodological Recommendations). Kyiv, DIA Publ., 2011. 40 p. (In Russ.).

16. Поляков А.К. Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды / под общ. ред. чл.-корр. НАН Украины А.З. Глухова. Донецк: Ноулидж (Донецк. отд.), 2009. 268 с.

Polyakov A.K. *Introduction of Woody Plants in Technogenic Environments*. Ed. by corr. mem. of the NAS of Ukraine A.Z. Glukhov. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk Branch), 2009. 268 p. (In Russ.).

17. Русина Г.В., Клименко О.Е., Клименко Н.И. Влияние травянистых ценозов различного происхождения на свойства почвы // Вісник аграрної науки. 1997. № 11. С. 9–12.

Rusina G.V., Klimenko O.E., Klimenko N.I. The Influence of Herbaceous Cenoses of Different Origins on Soil Properties. *Visnik agrarnoi nauki* = Bulletin of Agrarian Science, 1997, no. 11, pp. 9–12. (In Russ.).

18. Семенютина А.В. Актуальные проблемы озеленения урбанизированных территорий // Эколого-экономическая оптимизация природопользования: материалы Круглого стола. Волгоград: ВолГУ, 2004. С. 159–162.

Semenyutina A.V. Current Issues of Landscaping. *Ecological and Economic Optimization of Nature Management: Materials of the Round Table*. Volgograd, VolSU Publ., 2004, pp. 159–162. (In Russ.).

19. Сорокина О.А. Трансформация плодородия почв под лесными насаждениями на сопряженных элементах рельефа в степях Хакассии // Лесоведение. 2017. № 1. С. 60–72.

Sorokina O.A. Transformation of Soil Fertility under Forest Plantations on Adjacent Relief Elements in the Steppes of Khakassia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2017, no. 1, pp. 60–72. (In Russ.).

20. Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Болотов А.Г., Сизов Е.Г. Влияние лиственных лесных насаждений на физические свойства почв // Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та. 2014. № 1(111). С. 34–39.

Trofimov I.T., Bekhovykh Yu.V., Bolotov A.G., Sizov Ye.G. Effect of Broadleaved Forest Stands on Soil Physical Properties. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2014, no. 1(111), pp. 34–39. (In Russ.).

21. Турусов В.И., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В. Изменения физических свойств черноземов сегрегационных в агролесоландшафтах Центрального Черноземья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 95–112.

Turusov V.I., Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Titova T.V. Changes in the Physical Properties of Segregational Chernozems in Agroforest Landscapes of the Central Chernozem Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 4, pp. 95–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-95-112>

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

Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Sautkina M.Yu., Titova T.V. Ecological and Agrochemical Assessment of the Kamennaya Steppe Soils under Forest Cenosis. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 5, pp. 76–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-76-91>

23. Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Соэр Т.Д., Заздравных Е.А., Белеванцев В.Г., Смирнова М.А. Изменение лесостепных черноземов под влиянием лесополос на юге Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2020. № 8. С. 934–947.

Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Lukin S.V., Sauer T.J., Zazdravnykh E.A., Belevantsev V.G., Smirnova M.A. Change of Forest-Steppe Chernozems under the Influence of Shelterbelts in the South of the Central Russian Upland. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2020, no. 8, pp. 934–947. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X20080031>

24. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015*. Rome. FAO, World Soil Resources Reports, 2015, no. 106. 192 p.

25. Klimenko O.E. Alkalization of Irrigated Soils Suitable for Orchard Growing in Steppe Crimea and Prospects for Their Use. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, pp. 1180–1188. <https://doi.org/10.1134/S1064229316100082>

26. Klimenko O.E., Klimenko N.I. Changes in the Properties of Crimean Haplic Chernozems under the Impact of Forest Plantations. *Eurasian Soil Science*, 2021, vol. 54, pp. 750–762. <https://doi.org/10.1134/S1064229321050124>

27. Lawrence G.B., Lapenis A.G., Berggren D., Aparin B.F., Smith K.T., Shortle W.C., Bailey S.W., Varlyguin D.L., Babikov B. Climate Dependency of Tree Growth Suppressed by Acid Deposition Effects on Soils in Northwest Russia. *Environmental Science and Technology*, 2005, vol. 39, iss. 7, pp. 2004–2010. <https://doi.org/10.1021/es048759o>

28. Makarov M.I., Malysheva T.I. Phosphorus Compounds Under Different Plants in an Artificial Soil Formation Experiment. *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*, 2005, pp. 213–228. https://doi.org/10.1007/1-4020-3447-4_12

29. Mueller K.E., Eissenstat D.M., Hobbie S.E., Oleksyn J., Jagodzinski A.M., Reich P.B., Chadwick O.A., Chorover J. Tree Species Effects on Coupled Cycles of Carbon, Nitrogen, and Acidity in Mineral Soils at a Common Garden Experiment. *Biogeochemistry*, 2012, vol. 111, pp. 601–614. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9695-7>

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 581.524.2-271.171(470.54-25)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-109-118

Формирование вторичного ареала караганы древовидной в лесопарках г. Екатеринбурга

Е.А. Тишкина^{1,2} , канд. с.-х. наук, науч. сотр., доц.;

ResearcherID: [AAC-4442-2020](https://orcid.org/0000-0001-6315-2878), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6315-2878>

Л.А. Семкина^{1,2}, д-р биол. наук, вед. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAC-4433-2020](https://orcid.org/0000-0003-2351-3258), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2351-3258>

И.В. Шевелина^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABH-5277-2020](https://orcid.org/0000-0001-8352-558X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-558X>

¹Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; Elena.MLOB1@yandex.ru 

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Elena.MLOB1@yandex.ru 

Поступила в редакцию 27.12.22 / Одобрена после рецензирования 20.03.23 / Принята к печати 24.03.23

Аннотация. Статья посвящена анализу распространения и особенностей эколого-биологической приуроченности караганы древовидной *Caragana arborescens* Lam. в лесных парках г. Екатеринбурга. Насаждения с караганой изучены в 14 из 15 лесных парков города: Калиновском, Железнодорожном, Карасье-Озерском, Московском, Нижне-Исетском, Санаторном, Уктусском, Шувакишском, Южном, Шарташском, им. Лесоводов России, Оброшинском, Центральном и Юго-Западном – на площади 12 077 га на основе выделительной электронной базы данных. Онтогенез вида и его мофологические особенности изучены в 10 локальных местообитаниях на примере 2 лесопарков – им. Лесоводов России с наибольшей численностью караганы и Уктусского с минимальной. Формирование вторичного ареала караганы в лесных парках г. Екатеринбурга зависит от присутствия поблизости генеративных особей. Максимальная площадь произрастания установлена в лесопарке им. Лесоводов России (98,6 га), минимальная – в Юго-Западном (0,4 га). Площадь распространения обусловлена площадью посадок, которые были проведены в 1970–1980 гг., это подтверждают и наши исследования в лесных парках. *C. arborescens* предпочитает селиться в разнотравных (67,8 %) и ягодниковых (26,8 %) сосняках при полноте древостоя 0,6–0,7, являясь гелиосциофитом. Количество деревьев караганы в местообитаниях увеличивается с ростом полноты древостоя от 404 до 1359 растений. При полноте соснового древостоя 0,3–0,5 количество караганы снижается, а при 0,1–0,2 она исчезает. Распространение *C. arborescens* зависит и от возрастных категорий и продуктивности лесных насаждений, она произрастает преимущественно в спелых сосновых (68,8 %) высокобонитетных (2-й класс бонитета – 62,3 %) насаждениях. В онтогенезе караганы установлены 2 периода и 6 возрастных состояний, при этом преобладает прегенеративная фракция. Исследованные местообитания являются нормальными, неполночленными, но способными к самоподдержанию, т. к. при благоприятных условиях особи размножаются самосевом. Жизненные формы караганы древовидной формируются на открытых местах в виде аэроксильного кустарника, в сосновых лесах – деревца. Внедрения *C. arborescens* в парках Екатеринбурга

© Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Шевелина И.В., 2024

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

единичны и в настоящий момент биологической опасности для лесных экосистем не представляют.

Ключевые слова: карагана древовидная, натурализация, лесные парки, эколого-биологические особенности, местообитание, г. Екатеринбург

Для цитирования: Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Шевелина И.В. Формирование вторичного ареала караганы древовидной в лесопарках г. Екатеринбурга // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 109–118. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-109-118>

Original article

Formation of the Secondary Area of *Caragana arborescens* Lam. in the Forest Parks of Yekaterinburg

Elena A. Tishkina^{1,2}✉, Candidate of Agriculture, Research Scientist, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [AAC-4442-2020](https://orcid.org/0000-0001-6315-2878), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6315-2878>

Lidia A. Semkina^{1,2}, Doctor of Biology, Leading Research Scientist;
ResearcherID: [AAC-4433-2020](https://orcid.org/0000-0003-2351-3258), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2351-3258>

Irina V. Shevelina^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [ABH-5277-2020](https://orcid.org/0000-0001-8352-558X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-558X>

¹Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Elena.MLOB1@yandex.ru✉

²Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Elena.MLOB1@yandex.ru✉

Received on December 27, 2022 / Approved after reviewing on March 20, 2023 / Accepted on March 24, 2023

Abstract. The article is devoted to the analysis of the distribution and features of the ecological and biological confinement of *Caragana arborescens* Lam. in the forest parks of Yekaterinburg. Caragana plantations have been studied in 14 out of the 15 city forest parks: Kalinovskij, Zheleznodorozhnyj, Karas'ye-Ozerskij, Moskovskij, Nizhne-Isetskij, Sanatornyj, Uktusskij, Shuvakishskij, Yuzhnyj, Shartashskij, named after the Foresters of Russia, Obroshinskij, Central and South-West – on an area of 12,077 hectares based on a standard electronic database. The ontogenesis of the species and its morphological features have been studied in 10 local habitats by the example of 2 forest parks – named after the Foresters of Russia with the largest number of caragana and Uktusky with the minimum. The formation of the secondary area of caragana in the forest parks of Yekaterinburg depends on the presence of generative individuals nearby. The maximum growth area is established in the forest park named after the Foresters of Russia (98.6 ha), the minimum – in the South-West (0.4 ha). The area of distribution is determined by the area of plantings that have been carried out in the 1970s and 1980s, which is confirmed by our research in the forest parks. *C. arborescens* prefers to settle in mixed-herb (67.8 %) and berry (26.8 %) pine forests with a stand density of 0.6–0.7, being a heliosciophyte. The number of caragana trees in the habitats increases with the increase in the density of the stand from 404 to 1359 plants. When the density of the pine stand is 0.3–0.5, the amount of caragana decreases, and at 0.1–0.2 it disappears. The distribution of *C. arborescens* depends on the age categories and productivity of forest plantations, it grows mainly in mature pine (68.8 %) trees in high-quality (the 2nd quality class – 62.3 %) plantations. In the ontogenesis of caragana, 2 periods and 6 age-related conditions have been established, with the pregenerative fraction predominating.



The studied habitats are normal, incomplete, but capable of self-maintenance, since under favourable conditions individuals reproduce by self-seeding. The life forms of the caragana tree are formed in open areas as an aeryxalic shrub, and in pine forests as a small tree. The *Caragana arborescens* introductions in the forest parks of Yekaterinburg are rare and currently pose no biological hazard to forest ecosystems.

Keywords: *Caragana arborescens*, naturalization, forest parks, ecological and biological features, habitat, Yekaterinburg

For citation: Tishkina E.A., Semkina L.A., Shevelina I.V. Formation of the Secondary Area of *Caragana arborescens* Lam. in the Forest Parks of Yekaterinburg. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 109–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-109-118>

Введение

Caragana arborescens – крупный прямостоячий кустарник высотой до 5–7 м. В осиновых черневых лесах Салаира выявлено 5 ее жизненных форм, при этом преобладает компактный геоксильный кустарник (48,2 %), вторая по численности группа – деревце (25,9 %) [16]. Первое цветение сеянцев наступает на 4–5-й год, и с этого времени боковые почки прошлогодних приростов становятся плодовыми, за исключением верхушечной и нескольких прилегающих к ней боковых, продолжающих рост в высоту. Разрастание кустов происходит от их основания. На 3–4-й год жизни сеянца появляются побеги кушчения. К 8 годам их число в условиях культуры достигает 6–14. Ни корневищ, ни корневой поросли карагана древовидная не образует [12].

Вид применяется в озеленении из-за зимостойкости и способности переносить засуху и техногенное загрязнение. Кроме долговечности формируемых из нее живых изгородей, карагана имеет то преимущество, что ее листья аккумулируют тяжелые металлы, такие как медь, цинк и свинец. Толерантность к тяжелым металлам контролируется на генетическом уровне, а также зависит от онтогенеза растения [9]. Растения рода карагана издавна применяли тибетские медики и целители Монголии и Сибири. Установлено, что карагана древовидная обладает противовоспалительным, гепато- и ангиопротекторным эффектами благодаря накоплению большого количества в надземной части флавоноидов (рутина, кверцетин, лютеолин), оксикоричных кислот, а также кумаринов [17].

В 2000-е гг. натурализация караганы стала более активной [5–8, 11, 18, 20], поэтому изучение *C. arborescens* в лесопарках Екатеринбурга при ее натурализации представляется актуальным.

Цель работы – оценка распространения и выявление экологической приуроченности караганы в лесопарках г. Екатеринбурга.

Объекты и методы исследования

Местообитания караганы изучены в 14 лесопарках Екатеринбурга: Калиновском, Железнодорожном, Карасье-Озерском, Московском, Нижне-Исетском, Санаторном, Уктусском, Шувакишском, Южном, Шарташском, им. Лесоводов России, Оброшинском, Центральном и Юго-Западном – на площади 12 077 га на основе повыведельной электронной базы данных. Она создана по

данным таксационных описаний лесных участков, в которых приведена их полная характеристика: таксационные показатели насаждений (происхождение, строение, состав, средний возраст, высота и диаметр, класс бонитета, тип леса, полнота, запас), описание подроста и подлеска, напочвенного покрова, почвы (Лесостроительная инструкция: утв. приказом Минприроды Рос. Федерации от 29 марта 2018 г. № 122; зарег. в Минюсте Рос. Федерации 20 апр. 2018 г., рег. № 50859).

Для анализа возрастной структуры использовали стандартные методики [19, 21].

Результаты исследования и их обсуждение

Состав подлесочных видов в лесопарках Екатеринбурга за последнее время сильно изменился [1–4, 22]. В озеленении по большей части используются древесные виды [13], они высажены в лесопарках в 1970–1980-е гг. [14]. Впервые в Екатеринбурге *C. arborescens* и ее сорта появились в посадках станции зеленого строительства в 1940 г. [15].

C. arborescens натурализовалась на площади 370 га в 14 лесопарках из 15 (рис. 1). Установлены различные площади произрастания вида (от 0,4 до 98,6 га). При этом процесс натурализации караганы происходил, по нашим наблюдениям, с различной интенсивностью. Так, в Юго-Западном лесопарке *C. arborescens* встречается единично – 0,1 % от общей площади лесопарка, в то время как максимальная занимаемая караганой площадь отмечена для лесопарка им. Лесоводов России – 10,4 %, т. к. в 1960-е гг. в последнем проведены рядовые посадки караганы.

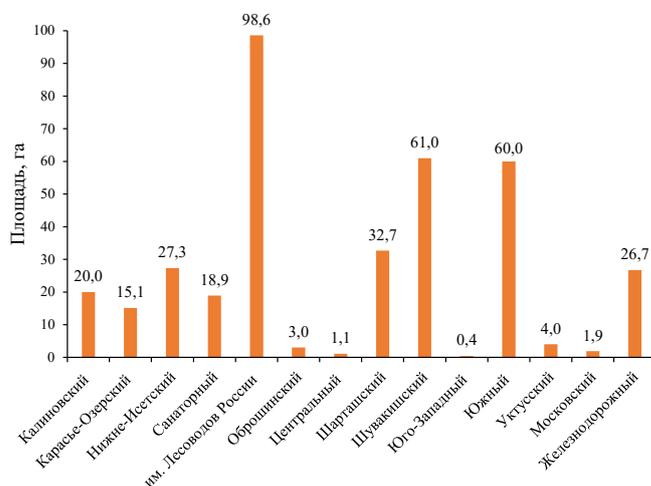


Рис. 1. Площадь, занимаемая караганой древовидной в лесопарках г. Екатеринбурга

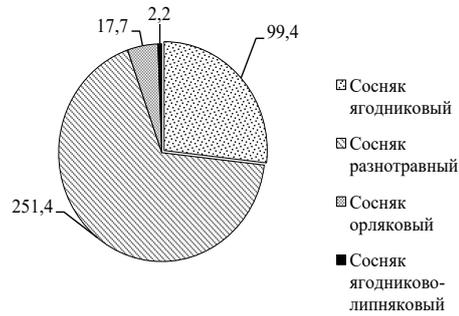
Fig. 1. The area occupied by *Caragana arborescens* Lam. in the forest parks of Yekaterinburg

В самых крупных по площади лесопарках города: Южном, Шувакишском и Нижне-Исетском – доля караганы в составе подлеска варьирует от 1,7 до 3,0 %. Рядовые посадки – основной путь проникновения *C. arborescens* в лесопарки. Дальнейшее внедрение караганы осуществляется автомеханохорно.

Карагана древовидная – мезоксерофит [10], растет практически повсюду в посадках, но предпочитает определенные типы леса: встречаемость в сосняках разнотравных – 67,8 %, ягоdnиковых – 26,8 %, орляковых – 4,8 % и ягоdnиково-липняковых – лишь 0,6 % (рис. 2).

Рис. 2. Площадь с участием караганы древовидной в различных типах леса

Fig. 2. The area with the participation of *Caragana arborescens* Lam. in various types of forest



Приуроченность *C. arborescens* к разнотравным и ягодниковым соснякам в лесных парках Екатеринбурга варьирует от 51,1 до 100 % (табл. 1) лесопокрытой площади, что позволяет считать эти сосняки экологическим оптимумом для существования вида. *C. arborescens* может успешно произрастать как на освещенных участках, так и в затенении, являясь гелиосциофитом. Наибольшая встречаемость караганы отмечена при полноте соснового древостоя 0,6–0,7 (рис. 3).

Таблица 1

Зависимость площади местообитаний *Caragana arborescens* Lam. от типов леса в лесопарковой зоне г. Екатеринбурга
The dependence of the area of *Caragana arborescens* Lam. habitats on the forest types in the forest park zone of Yekaterinburg

Лесной парк	Площадь в разрезе типов леса (сосняки)							
	Ягодниковый		Разнотравный		Орляковый		Ягодниково-липняковый	
	га	%	га	%	га	%	га	%
Калиновский	12,3	61,5	7,7	38,5	–	–	–	–
Железнодорожный	21,5	80,5	3,7	13,9	1,5	5,6	–	–
Карасье-Озерский	–	–	15,1	100	–	–	–	–
Московский	1,9	100	–	–	–	–	–	–
Нижне-Исетский	2,0	7,3	21,2	77,6	4,1	15,0	–	–
Санаторный	3,4	18,1	13,3	70,4	–	–	2,2	11,6
Уктусский	–	–	4,0	100	–	–	–	–
Шувакишский	42,3	69,3	18,7	30,7	–	–	–	–
Южный	–	–	60,0	100	–	–	–	–
Шарташский	16,0	48,9	16,7	51,1	–	–	–	–
Им. Лесоводов России	–	–	86,5	87,7	12,1	12,3	–	–
Оброшинский	–	–	3,0	100	–	–	–	–
Центральный	–	–	1,1	100	–	–	–	–
Юго-Западный	–	–	0,4	100	–	–	–	–

Плотность произрастания караганы в местообитаниях увеличивается с повышением сомкнутости древесного полога от 404 до 1359 особей ($r = 0,77$, $p < 0,05$) (табл. 2), при снижении сомкнутости древесного полога до 0,3–0,5 плотность особей на единицу уменьшается. *C. arborescens* зависит и от возрастных категорий лесных насаждений – так, она преимущественно селится в спелых

сосновых (68,8 %) высокобонитетных (2-й класс бонитета – 62,3 %) насаждениях, затем по численности караганы следуют средневозрастные (15 %), приспевающие (15,4 %) и молодняки (0,8 %).

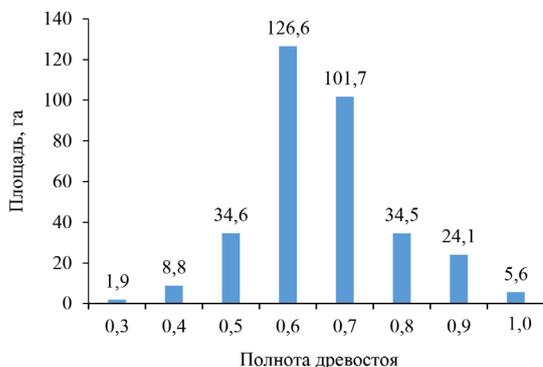


Рис. 3. Распространение караганы древовидной в сосновых древостоях различной полноты

Fig. 3. The distribution of *Caragana arborescens* Lam. in pine stands of various density

Таблица 2

Характеристика местообитаний *Caragana arborescens* Lam. в парке им. Лесоводов России и Уктусском парке
The characteristics of habitats of *Caragana arborescens* Lam. in the park named after the Foresters of Russia and Uktusskij Park

Тип местообитания	Древостой		Фрагмент местообитания (по 0,09 га)		
			Количество особей на 1 га, шт.	Возрастная структура	
	Состав	Полнота		Прегенеративные особи, %	Генеративные особи, %
<i>Уктусский лесной парк</i>					
Сосняк черничный	10С	0,5	404	100	0
Сосняк вейниковый	10С	0,4	632	100	0
Сосняк зеленомошный	10С	0,3	414	83,3	16,7
Сосняк вейниковый	7СЗБ	0,2	478	100	0
<i>Лесной парк им. Лесоводов России</i>					
Березняк разнотравный	6Б4Ос	0,5	1438	90,0	10,0
	6Б4С	0,4	570	83,3	16,7
Луг разнотравный	–	–	251	53,4	46,6
Березняк разнотравный	7БЗС	0,6	1359	70,0	30,0
Сосняк разнотравный	10С	0,8	1280	86,4	13,6
Липняк разнотравный	6Лп2С2Б	0,6	1215	79,6	20,4

Для изучения местообитаний и возрастной структуры караганы были отобраны 2 лесопарка – им. Лесоводов России и Уктусский. По результатам анализа электронной повидельной базы данных, в лесном парке им. Лесоводов России произрастает максимальное количество *C. arborescens*, а в Уктусском – наименьшее.

По совокупности онтогенетических групп в общем объеме для 10 местообитаний караганы можно выявить время ее натурализации, направление и скорость развития. Определено, что местообитания *C. arborescens* являются молодыми с одновершинным левосторонним спектром с преобладанием ювенильных, иматурных и виргинильных особей, их также можно охарактеризовать как нормальные неполноценные, но способные к самоподдержанию. В онтогенезе караганы установлены 2 периода: прегенеративный и генеративный – и 6 возрастных состояний. В 3 местообитаниях караганы в Уктусском лесном парке преобладают прегенеративные особи – 100 %, только в зеленомошном сосняке обнаружены генеративные растения – 16,7 %. Их максимальное количество отмечено в лесопарке им. Лесоводов России на лугу разнотравном – 46,6 %. Постгенеративные особи отсутствуют во всех местообитаниях.

Морфогенез караганы древовидной зависит от фитоценотической обстановки. В виргинильном состоянии на лугу разнотравном в лесопарке им. Лесоводов России формирование караганы происходит с появлением осей возобновления на надземной части материнской оси. Виргинильные особи караганы имеют до 6 скелетных осей и среднюю высоту 1,94 м при объеме кроны 1,17 м², в то время как укороченные побеги несут розетки из 3–5 листьев взрослого типа. Под пологом сосняка в том же лесопарке оси возобновления у *C. arborescens* в виргинильном состоянии не возникают, в этом случае особи имеют форму деревца, при этом установлена средняя высота 1,34 м при объеме кроны 0,28 м². В виргинильном возрастном состоянии в различных местообитаниях карагана формирует различные жизненные формы: на открытых местах – аэроксильный кустарник, в сосновых лесах – деревце.

Заключение

Caragana arborescens Lam. широко востребована в озеленении, является пионерным растением на пустырях и освобожденных после вырубке леса территориях. Помимо этого, она выполняет роль очистителя воздушной среды, способна успешно приспосабливаться на урбанизированных территориях и выживать в широком интервале условий среды. В лесных парках г. Екатеринбурга экологическим оптимумом *C. arborescens* являются сосняки разнотравные при полноте древостоя 0,6–0,7 в спелых высокобонитетных насаждениях. Площадь распространения караганы зависит от площади посадок, которые были проведены в 1970–1980-е гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Веселкин Д.В., Дубровин Д.И. Разнообразие травяного яруса урбанизированных сообществ с доминированием инвазивного *Acer negundo* // Экология. 2019. № 5. С. 323–331.
Veselkin D.V., Dubrovin D.I. Diversity of the Grass Layer of Urbanized Communities Dominated by Invasive *Acer negundo*. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 2019, vol. 50, pp. 413–421. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1067413619050114>

2. Веселкин Д.В., Киселёва О.А., Екшибаров Е.Д., Рафикова О.С., Коржиневская А.А. Богатство и численность проростков из почвенного банка семян в куртинах инвазивного вида *Acer negundo* L. // Рос. журн. биол. инвазий. 2018. № 1. С. 18–25.

Veselkin D.V., Kiseleva O.A., Ekshibarov E.D., Rafikova O.S., Korzhinevskaya A.A. Richness and Number of Seedlings from the Soil Seed Bank in the Curtains of the Invasive Species *Acer negundo* L. *Rossiiskij zhurnal biologicheskikh invazij* = Russian Journal of Biological Invasions, 2018, no. 1, pp. 18–25. (In Russ.).

3. Веселкин Д.В., Коржиневская А.А. Пространственные факторы адвентизации подлеска в лесопарках крупного города // Изв. РАН. Сер.: Геогр. 2018. № 4. С. 55–65.

Veselkin D.V., Korzhinevskaya A.A. Spatial Factors of the Alien Understory Shrubs and Trees Distribution in Urban Forests of Large City. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya* = Russian Geographical Bulletin, 2018, no. 4, pp. 55–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2587556618040167>

4. Веселкин Д.В., Коржиневская А.А., Подгаевская Е.Н. Состав и численность адвентивных и инвазивных кустарников и деревьев подлеска в лесопарках г. Екатеринбург // Вестн. Томск. гос. ун-та. Сер.: Биология. 2018. № 42. С. 102–118.

Veselkin D.V., Korzhinevskaya A.A., Podgaevskaya E.N. The Species Composition and Abundance of Alien and Invasive Understory Shrubs and Trees in Urban Forests of Yekaterinburg. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2018, no. 42, pp. 102–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/42/5>

5. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Бочкин В.Д. Влияние чужеродных видов растений на динамику флоры территории Главного ботанического сада РАН // Рос. журн. биол. инвазий. 2015. Т. 8, № 4. С. 22–41.

Vinogradova Yu.K., Mayorov S.R., Bochkin V.D. Alien Plant Species and Their Influence on the Main Botanical Garden's Flora Dynamics. *Rossiiskij zhurnal biologicheskikh invazij* = Russian Journal of Biological Invasions, 2015, no. 4, pp. 22–41. (In Russ.).

6. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС, 2010. 512 с.

Vinogradova Yu.K., Mayorov S.R., Horun L.V. *The Black Book of Flora of Central Russia: Alien Plant Species in the Ecosystems of Central Russia*. Moscow, GEOS Publ., 2010. 512 p. (In Russ.).

7. Виноградова Ю.К., Ткачева Е.В., Бриндза Я., Майоров С.Р., Островский Р. К биологии цветения чужеродных видов. 2. *Robinia pseudoacacia*, *R. × ambigua*, *R. neotexicana* // Рос. журн. биол. инвазий. 2013. № 4. С. 10–26.

Vinogradova Yu.K., Tkacheva E.V., Brindza J., Mayorov S.R., Ostrowsky R. On Flowering Patterns of Alien Species. 2. *Robinia pseudoacacia*, *R. × ambigua*, *R. neotexicana*. *Rossiiskij zhurnal biologicheskikh invazij* = Russian Journal of Biological Invasions, 2013, no. 4, pp. 10–26. (In Russ.).

8. Виноградова Ю.К., Ткачева Е.В., Майоров С.Р. К биологии цветения чужеродных видов. 1. *Lupinus polyphyllus* Lindl. // Рос. журн. биол. инвазий. 2012. № 2. С. 30–41.

Vinogradova Yu.K., Tkacheva E.V., Mayorov S.R. About Flowering Biology of Alien Species. 1. *Lupinus polyphyllus* Lindl. *Rossiiskij zhurnal biologicheskikh invazij* = Russian Journal of Biological Invasions, 2012, no. 2, pp. 30–41. (In Russ.).

9. Карабасникова Е.Б., Зальевская О.С., Чухина О.В. Содержание тяжелых металлов в почве и древесной растительности в условиях городской агломерации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 216–223.

Karbasnikova E.B., Zalyvskaya O.S., Chukhina O.V. Heavy Metals Content in Soils and Woody Vegetation of Urban Area. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 5, pp. 216–223. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.216>

10. К. древовидная, или желтая акация – *C. arborescens* Lam. // Деревья и кустарники СССР: дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции / ред. д-р биол. наук, проф. С.Я. Соколов, чл.-кор. АН СССР Б.К. Шишкин. Т. IV. Покрытосеменные. Семейства Бобовые–Гранатовые. М.; Л.: АН СССР, 1958. С. 192–193.

C. arborescens or Yellow Acacia – *C. arborescens* Lam. *Trees and Shrubs of the USSR: Wild, Cultivated and Promising for Introduction*. Ed. by doc. of biology, prof. S.Ya. Sokolov and corresp. member of the USSR Academy of Sciences B.K. Shishkin. Vol. 4. Angiosperms. Families *Fabaceae-Punicaceae*. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences, 1958, pp. 192–193. (In Russ.).

11. Куклина А.Г., Виноградова Ю.К., Ткачёва Е.В. К биологии цветения чужеродных видов. 3. *Caragana arborescens* Lam. и *C. laeta* Kom. // Рос. журн. биол. инвазий. 2015. Т. 8, № 3. С. 22–39.

Kuklina A.G., Vinogradova Yu.K., Tkacheva E.V. About Flowering Biology of Alien Species. 3. *Caragana arborescens* Lam. and *C. laeta* Kom. *Rossijskij zhurnal biologicheskikh invazij* = Russian Journal of Biological Invasions, 2015, no. 3, pp. 22–39. (In Russ.).

12. Лучник З.И. Декоративная долговечность кустарников в культуре. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 104 с.

Luchnik Z.I. *Decorative Longevity of Shrubs in Culture*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Sib. Branch), 1988. 104 p. (In Russ.).

13. Мамаев С.А. Определитель деревьев и кустарников Урала. Местные и интродуцированные виды. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 258 с.

Мамаев S.A. *Key to Trees and Shrubs of the Urals. Native and Introduced Species*. Yekaterinburg, Russian Academy of Sciences (Ural Branch), 2000. 258 p. (In Russ.).

14. Петров А.П., Ладейщикова Г.В., Зотеева Е.А. Дигрессия фитоценозов и натурализация древесных растений в лесопарковой зоне г. Екатеринбурга // Ботанические исследования на Урале: материалы регион. с междунар. участием науч. конф. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2009. С. 279–281.

Petrov A.P., Ladejshchikova G.V., Zoteeva E.A. Digression of Phytocenoses and Naturalization of Woody Plants in the Forest Park Zone of Yekaterinburg. *Botanical Research in the Urals: Proceedings of the Regional Scientific Conference with International Participation*. Perm, 2009, pp. 279–281. (In Russ.).

15. Стельмахович М.Л. Путеводитель по коллекционному участку декоративной растительности Уральской опытной станции зеленого строительства Академии коммунального хозяйства. Ч. 1. Дендрологическая. Свердловск: Урал. опыт. ст. зелен. стр-ва АКХ при СНК РСФСР, 1940. 94 с.

Stelmakhovich M.L. *Guide to the Collection Site of Ornamental Vegetation of the Ural Experimental Station of Green Building of the Academy of Public Utilities. Part 1. Dendrological*. Sverdlovsk, Ural Experimental Station of Green Construction of the Academy of Public Utilities under the Council of People's Commissars of the RSFSR, 1940. 94 p. (In Russ.).

16. Тищенко М.П. Популяционная структура кустарников осинового леса черневого подпояса Салаирского кряжа // Ботан. журн. 2009. Т. 94, № 6. С. 824–833.

Tishchenko M.P. Population Structure of Aspen Forest Shrubs of the Chern Subbelt of the Salair Ridge. *Botanicheskij Zhurnal*, 2009, vol. 94, no. 6, pp. 824–833. (In Russ.).

17. Хасанишина А.Р., Барабанов Е.И., Бабаскина Л.И. Определение флавоноидов в побегах караганы древовидной // Фармация. 2009. № 5. С. 20–22.

Khasanshina A.R., Varabanov E.I., Babaskina L.I. Determination of Flavonoids in Siberian Pea Shrub (*Caragana arborescens*) Sprouts. *Farmatsiya = Pharmacy*, 2009, no. 5, pp. 20–22. (In Russ.).

18. Lambdon P.W., Pyšek P., Bařnou C., Hejda M., Arianoutsou M., Essl F., Jarořík V., Pergl J., Winter M., Anastasiu P., Andriopoulos P., Bazos I., Brundu G., Celesti-Grapow L., Chassot P., Delipetrou P., Josefsson M., Kark S., Klotz S., Kokkoris Y., Kühn I., Marchante H., Perglová I., Pino J., Vila M., Zikos A., Roy D., Hulme P.E. Alien Flora of Europe: Species Diversity, Temporal Trends, Geographical Patterns and Research Needs. *Preslia*, 2008, vol. 80, iss. 2, pp. 101–149.

19. Montile A.A., Tishkina E.A. Spatial and Temporal Structure of the *Acer negundo* L. Cenopopulation in the Forest Parks of Yekaterinburg. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 2022, vol. 1045, art. no. 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012118>

20. Pimentel D., Zuniga R., Morrison D. Update on the Environmental and Economic Costs Associated with Alien-Invasive Species in the United States. *Ecological Economics*, 2005, vol. 52, iss. 3, pp. 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.002>

21. Tishkina E.A. Expansion of *Acer negundo* L. in the Forest Parks of Yekaterinburg. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1045, art. no. 012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012069>

22. Veselkin D.V., Dubrovin D.I., Pustovalova L.A. High Canopy Cover of Invasive *Acer negundo* L. Affects Ground Vegetation Taxonomic Richness. *Scientific Reports*, 2021, no. 11, art. no. 20758. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00258-x>

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

Научная статья

УДК 630:631.46:574.42

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-119-132

Биологическая активность горных почв Западного Кавказа после сведения леса

А.К. Шхапацев¹, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4921-9882>

К.Ш. Казеев², д-р геогр. наук, проф.; ResearcherID: [O-8194-2015](https://orcid.org/0000-0002-0252-6212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>

Ю.С. Козунь², канд. биол. наук; ResearcherID: [R-5170-2016](https://orcid.org/0000-0003-4336-7745),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-7745>

В.П. Солдатов², канд. биол. наук, науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0699-9568>

А.Н. Федоренко², мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-8110-2022](https://orcid.org/0000-0002-1690-6048),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1690-6048>

В.В. Вилкова², мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-7640-2022](https://orcid.org/0000-0002-1374-3941),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>

¹Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, д. 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, Россия, 385000; f_agr_technolog@mkgtu.ru

²Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова, просп. Стачки, д. 194/1, г. Ростов-на-Дону, Россия, 344090; kamil_kazeev@mail.ru, kuz.yuliya@mail.ru, mefesto90@mail.ru, pushok.mur@yandex.ru, lera.vilkova.00@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.22 / Одобрена после рецензирования 11.03.23 / Принята к печати 13.03.23

Аннотация. Проведено исследование комплекса показателей, характеризующих экологическое состояние лесных почв гор Северо-Западного Кавказа под широколиственными и смешанными лесами. Цель исследования состояла в оценке изменения биологической активности почв разного генезиса после сведения леса. Объектами изучения были дерново-карбонатные, серые лесные и серые лесостепные почвы лесных и нарушенных экосистем Республики Адыгеи на высотах от 500 до 1635 м над ур. м. Рассматривали участки вырубок с разным возрастом после сведения леса – от 10 до 40 лет. Анализируемые показатели: содержание общего и активного углерода, активность почвенных ферментов (каталаза, инвертаза, дегидрогеназа, уреазы, фосфатазы), численность бактерий, а также интегральный показатель биологических свойств почвы. Оценивали сопряженность этих показателей с гидротермическими условиями, плотностью почвы, сопротивлением пенетрации, реакцией среды, гидролитической кислотностью, суммой поглощенных оснований и другими параметрами почв. Уровень биологической активности почв вырубок низкогорий Адыгеи зависит от рельефа и сроков восстановления после сведения леса. Даже после нескольких десятилетий возобновления древесной растительности на склонах 12–15° не происходит полного возврата биологической активности до значений серых лесных почв фоновой лесной территории. Через 40 лет после рубки леса интегральный показатель биологических свойств серой лесной почвы все еще на 17 % меньше, чем на контрольном участке. Биологическая активность послелесных почв может изменяться по 3 основным направлениям. На крутых склонах при сильном нарушении почвенно-растительного покрова при работе тяжелой техники

интегральный показатель биологических свойств почв уменьшается на 25–40 % и более без тенденции к восстановлению. При среднем уровне нарушений на участках с незначительными уклонами после первоначального снижения показателей почв следует их восстановление до контрольных значений. Восстановительные сукцессии с интенсивным развитием травянистой флоры и дернового процесса при слабом нарушении могут привести к увеличению биологической активности выше контрольных значений уже через 2–3 года. Комплексные биодиагностические исследования с использованием интегрального показателя биологического состояния почвы выявили в целом повышенную устойчивость почв низкогорий (серых лесных и лесостепных) по сравнению с почвами среднегорий Адыгеи (дерново-карбонатными почвами). Основным фактором деградации, снижающим биологическую активность нарушенных рубкой почв, является эрозия.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, рубка леса, экологическое состояние, биологическая диагностика, биоиндикаторы, ферментативная активность, горные почвы, Западный Кавказ

Благодарности: Исследования поддержаны грантом Президента РФ (№ НШ-449.2022.5) и ПСАЛ ЮФУ («Приоритет 2030», № СП-12-22-9).

Для цитирования: Шхапацев А.К., Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Солдатов В.П., Федоренко А.Н., Вилкова В.В. Биологическая активность горных почв Западного Кавказа после сведения леса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 119–132. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-119-132>

Original article

Biological Activity of Mountain Soils of the Western Caucasus after Deforestation

*Aslan K. Shkhatsev*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4921-9882>

*Kamil Sh. Kazeev*², Doctor of Geography, Prof.; ResearcherID: [O-8194-2015](https://orcid.org/0000-0002-0252-6212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>

*Yuliya S. Kozun*², Candidate of Biology; ResearcherID: [R-5170-2016](https://orcid.org/0000-0003-4336-7745),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-7745>

*Vasily P. Soldatov*², Candidate of Biology, Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0699-9568>

*Anastasia N. Fedorenko*², Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAB-8110-2022](https://orcid.org/0000-0002-1690-6048),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1690-6048>

*Valeria V. Vilkova*², Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAB-7640-2022](https://orcid.org/0000-0002-1374-3941),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>

¹Maykop State Technological University, ul. Pervomayskaya, 191, Maykop, Republic of Adygea, 385000, Russian Federation; f_agr_technolog@mkgtu.ru

²Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology named after D.I. Ivanovsky, prosp. Stachki, 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation; kamil_kazeev@mail.ru, kuz.yuliya@mail.ru, mefesto90@mail.ru, pushok.mur@yandex.ru, lera.vilkova.00@mail.ru

Received on December 13, 2022 / Approved after reviewing on March 11, 2023 / Accepted on March 13, 2023



Abstract. A study of a set of indicators characterizing the ecological state of forest soils in the mountains of the North-Western Caucasus under broad-leaved and mixed forests has been conducted. The aim of the study has been to assess changes in the biological activity of soils of different genesis after deforestation. The objects of the study have been rendzina, gray forest and gray forest-steppe soils of forest and disturbed ecosystems of the Republic of Adygeya at altitudes from 500 to 1635 m above sea level. Logging plots of different ages (from 10 to 40 years old) after deforestation have been considered. The analyzed indicators have included: the content of total and active carbon, the activity of soil enzymes (catalase, invertase, dehydrogenase, urease, phosphatase), the number of bacteria, as well as an integral index of the biological properties of the soil. The correlation of these indicators with hydrothermal conditions, density of soil structure, penetration resistance, medium reaction, hydrolytic acidity, total absorbed bases and other soil parameters has been evaluated. The level of biological activity of soils in logging areas in the low mountains of Adygeya depends on the relief and the timing of restoration after deforestation. Even after several decades of restoration of woody vegetation on the slopes of 12–15° there is no complete return of biological activity to the values of Greyic Phaeozem Eutric of the background forest area. 40 years after logging, the integral index of biological properties of gray forest soil is still 17 % lower than in the control plot. The biological activity of post-forest soils can change in three main directions. On steep slopes, with severe disturbance of the soil and vegetation cover due to the operation of heavy machinery, the integral index of the biological properties of soils decreases by 25–40 % or more without a tendency to recovery. At an average level of disturbance in plots with slight slopes, after an initial decrease, the soils are restored to control values. Restorative successions with intensive development of herbaceous flora and the turf process with slight disturbance can lead to an increase in biological activity above the control values in just 2–3 years. Comprehensive biodiagnostic studies using an integral index of the biological state of the soil have revealed, in general, increased stability of low-mountain terrain soils (gray forest and forest-steppe) compared to the soils of the middle mountains of Adygeya (rendzina soils). The main degradation factor that reduces the biological activity of soils disturbed by logging is erosion.

Keywords: human impact, logging, ecological condition, biological diagnostics, bioindicators, enzymatic activity, mountain soils, the Western Caucasus

Acknowledgements: The research was supported by a grant from the President of the Russian Federation (no. NSh-449.2022.5) and the PSAL of the Southern Federal University (“Priority 2030”, no. SP-12-22-9).

For citation: Shkhatpatsev A.K., Kazeev K.Sh., Kozun’ Yu.S., Soldatov V.P., Fedorenko A.N., Vilkoval V.V. Biological Activity of Mountain Soils of the Western Caucasus after Deforestation. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 119–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-119-132>

Введение

Лесные экосистемы Кавказа являются наиболее разнообразными из оставшихся почти не тронутыми территориями России. Однако усилившаяся антропогенная нагрузка приводит к изменениям этих важных для биоты и человека экосистем. Сведение лесов становится причиной значительных изменений природных экосистем, особенно в условиях расчлененного рельефа. В обезлесенных горах усиливаются эрозионные процессы в результате ускорения стока атмосферных осадков и накопленного за зиму снега, что приводит к смыву почвы и образованию селевых потоков с возможными катастрофическими последствиями. Почвенный покров послелесных территорий часто деградирует

в результате эрозии вплоть до полного разрушения с выходом на поверхность коренных каменистых пород, что на сотни лет замедляет почвообразование и обедняет экосистемы. На Западном Кавказе основу почвенного покрова составляют серые лесные и серые лесостепные почвы в предгорьях и на высотах до 500 м над ур. м., а также буроземы, распространенные выше. Известняковые массивы покрывают дерново-карбонатные почвы – карболитоземы. Нарушения лесов и их сведение изменяют не только растительность и животный мир, но и экологическое состояние горных почв, при этом свойства послелесных почв в значительной степени отличаются от природных почв фоновых территорий Западного Кавказа [6, 11]. Ранее при диагностике плодородия и здоровья почв наиболее информативными считались почвенные экзоферменты [2, 15–18]. Методы почвенной энзимологии на юге России оказались особо чувствительными при оценке видов землепользования [3], химического загрязнения [14, 19, 20] и последствий пожаров [1, 8]. Для оценки экологического состояния нарушенных почв успешно используют биологическую индикацию и биотестирование [9, 21], которые позволяют диагностировать деградационные изменения на ранних этапах, в отличие от определения химических и физических свойств почв [7, 10, 12].

Целью работы была биологическая диагностика экологического состояния разных почв гор Западного Кавказа после сведения лесов в зависимости от генезиса почв и возраста вырубок.

В задачи исследования входили оценка экологических условий исследуемых участков, определение биологических параметров почв вырубок в связи с возрастом и степенью антропогенного нарушения при рубках и выявление устойчивости почв разного генезиса к рубке леса.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено на Западном Кавказе (Республика Адыгея). Три участка широколиственных лесов изучали на высотах 500–675 м над ур. м., четвертый участок – на высоте 1640 м над ур. м. (рис. 1, см. таблицу).

На участке № 1 недалеко от слияния р. Дах и Белая были исследованы несколько послелесных площадок на разных стадиях восстановительной сукцессии через 10–40 лет после сведения леса. Контрольный дубово-грабовый лес IV класса бонитета и состава $3Д_{\text{нч}}4Г1Я_0$ имел возраст 250–300 лет. Почва здесь серая лесная на продуктах выветривания известняков (Greyic Phaeozem Eutric). На участке изучены еще 4 площадки, образовавшиеся после сведения леса и находящиеся на разных этапах восстановления. Эти площадки отличаются друг от друга возрастом (10–40 лет) и выполненными на них лесовосстановительными работами. На одной из площадок вырубки в возрасте 22 года был высажен красный дуб (*Quercus rubra*), к настоящему времени эта площадка практически заросла другими деревьями (преимущественно грабом и осиной).

Участок № 2 вблизи впадения р. Сюк в р. Белую находится на выровненной террасе высотой около 500 м над ур. м. Фоновая почва данного участка представлена серой лесной почвой (Greyic Phaeozem Pachic) под дубово-кленово-ясеневым лесом. Почва на расположенной рядом вырубке стала каменистой (Greyic Phaeozem Sceletic) вследствие смыва поверхностного слоя в результате развития эрозионных процессов после рубки леса.

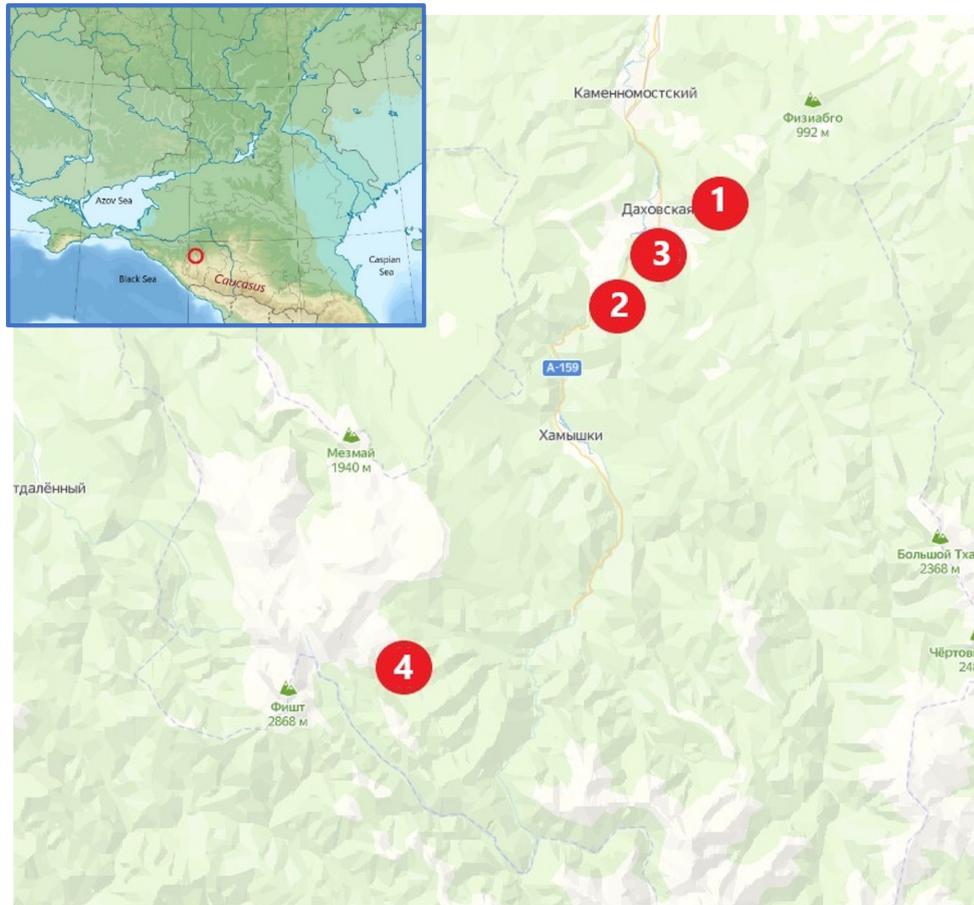


Рис. 1. Картограмма исследуемой территории (1–4 – номера участков)

Fig. 1. The schematic map of the study area (1–4 – plot numbers)

Участок № 3 на высоте 540 м над ур. м. разбит на 2 зоны: контроль (дубово-грабовый лес) и вырубка (фруктарник). В 2019 г. на вырубке была произведена повторная рубка 10-летнего подроста деревьев. В результате территория вырубki была дифференцирована на 2 площадки: зарастающая вырубка (фруктарник) и повторная вырубка со злаково-разнотравной растительностью. На территории участка № 3 распространена серая лесостепная почва (Greyic Phaeozem Vertic).

Вырубki в среднегорьях Северо-Западного Кавказа исследованы на участке № 4 в районе Партизанской поляны в окрестностях Яворовой поляны приблизительно в 15 км от пос. Гузерибль. Здесь по степени нарушения в результате работы тяжелой техники были выделены участки со слабым, средним и сильным уровнем нарушения дерново-карбонатной выщелоченной почвы. Наблюдения на участке проводили ежегодно в течение 2010–2021 гг., почва – дерново-карбонатная выщелоченная слабокаменистая суглинистая на элювии известняков (карболитоземы темногумусовые, Rendzik Leptosol). Эти почвы имеют существенные отличия в химическом составе от зональных почв вследствие формирования на карбонатных породах [4].

Характеристика исследуемых участков
The characteristics of the study plots

Местоположение и рельеф	Высота над уровнем моря, м	Растительность	Возраст после рубки, лет	Почва
<i>Участок № 1</i>				
Восточный склон (8–10°) хр. Уна-Коз (средняя часть)	675	Дубово-грабово-ясеневый лес. Возраст 250–300 лет. 5Д _{нч} 4Г1Я _о	Контроль	Серая лесная на продуктах выветривания известняков (Greyic Phaeozem Eutric)
Восточный склон (6°) хр. Уна-Коз (средняя часть)	672	Грабовый лес. 9Г1Гш+Ос+Д _ч	40	Серая лесная смытая на продуктах выветривания известняков (Greyic Phaeozem Eutric)
Южный склон (12–15°) хр. Уна-Коз (нижняя часть)	558	Грабовый лес. 9Г1Д _{нч} +Гш+Я _о	25	Серая лесная на продуктах выветривания известняков (Greyic Phaeozem Eutric)
Средняя нижняя часть южного склона (12–15°) хр. Уна-Коз	552	Грабовый лес. 7Г2Ос1Д _{нч}	22	
Нижняя часть северного склона (15–20°) г. Гуд	508	Смешанный широколиственный лес. 5Г3Кл _л 1Д _{нч} 1Чш	10–12	
<i>Участок № 2</i>				
Терраса на нижней части склона (3–5°) к р. Белой	502	Дубово-кленово-ясеневый лес	Контроль	Серая лесная на галечниковых отложениях (Greyic Phaeozem Pachic)
Терраса на нижней части склона (5–7°)	505	Вырубка с посадкой лещины и подростом ясеня, клена, граба, вяза	12	Серая лесная смытая каменистая на галечниковых отложениях (Greyic Phaeozem Sceletic)
<i>Участок № 3</i>				
Выровненная терраса на нижней части склона к р. Белой	540	Дубово-грабовый лес. Возраст 120–130 лет. 4Г3Д _ч 2Гш1Бя _к	Контроль	Серая лесостепная почва на галечниковых отложениях (Greyic Phaeozem Vertic)
	542	Дикоплодовые насаждения с травянистым пологом. 5Бя _к 2Я6Гш	10–12	
	542	Высокотравная луговая растительность	10–12	
<i>Участок № 4</i>				
Пологие склоны (3–5°) верхней части хребта	≈1600	Грабово-пихтово-кленовый лес с папоротниками и травянистым пологом	Контроль	Дерново-карбонатная выщелоченная на элювии известняков (Rendzik Leptosol)
Пологие склоны (3–5°) верхней части хребта в 50 м от контроля	1635	Высокотравная луговая растительность с подростом из деревьев	10	Дерново-карбонатная нарушенная выщелоченная на элювии известняков (Rendzik Leptosol)

Экспедиционные и лабораторно-аналитические исследования выполнены в 2014–2021 гг. Полевые исследования проводили традиционными методами с закладкой почвенных разрезов, полуюм и прикопок и отбором образцов почв по профилю в 3-кратной повторности на каждой площадке. Среди изученных параметров были температура, влажность и плотность почв, содержание общего и активного углерода, интенсивность эмиссии из почвы углекислого газа, ферментативная активность и др. Исследования проводили с использованием общепринятых в экологии, биологии и почвоведении методов [5]. В полевых условиях определяли влажность почв с помощью влагомера Fieldscout TDR 100, температуру почв послойно электронным термометром Hanna Checktemp. Дополнительно устанавливали температуру на поверхности почв с применением бесконтактного пирометра СЕМ DT-810. Повторность полевых определений этих параметров 10-кратная. Для оценки влияния температурного фактора на биологическую активность почв наблюдали за годовым ходом температуры с периодичностью измерения 3–6 ч в течение 2018–2020 гг. Для этого применяли температурные датчики Термохрон DS1921, погруженные в почву на глубины 10 и 30 см. Плотность почв устанавливали в 3-кратной повторности объемно-весовым методом с помощью стальных колец объемом 135 см³. Интенсивность эмиссии почвами углекислого газа исследована камерным методом с помощью газоанализаторов Testo-535 и EGM-5 PP System. Реакцию почвенной среды (рН) и окислительно-восстановительный потенциал определяли потенциометрическим методом в почвенной суспензии с соотношением «почва:вода» 1,0:2,5.

Ферментативную активность (каталаза, инвертаза, уреазы, дегидрогеназы) определяли по скорости разложения субстрата (перекиси водорода, сахарозы, мочевины, трифенилтетразолия хлористого) в стандартизированных условиях. Содержание общего гумуса устанавливали методом бихроматного окисления по И.В. Тюрину в модификации Б.А. Никитина, содержание активного углерода (подвижного гумуса) определяли путем окисления 0,02М раствором перманганата калия модифицированным методом К. Блейра [5].

Для выявления различий в уровне биогенности и биологической активности разных почв использовали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [17]. Статистическая обработка результатов проведена при помощи программ Statistica 10.0 и MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительное исследование температурного режима показало значительное различие участков в зависимости от климата, обусловленного высотой местности над уровнем моря. Горный рельеф предполагает прохладные условия в отличие от предгорной равнины с очень жарким летом. Высота местности определяет температурный градиент, который отражается на почвах участков (рис. 2). Температура почв в среднегорных условиях на высотах 1200–1650 м существенно различна даже для почв одного типа. Низкогорные территории на высоте 540 м над ур. м. характеризуются более оптимальными для живых организмов условиями, в течение вегетационного сезона верхний слой почвы может прогреваться выше 20 °С. В зимние месяцы не было отмечено длительного промораживания почв на всех исследуемых участках. Однако биологическая

активность ограничена низкими температурами на протяжении значительной части года, даже в летние месяцы. Это приводит к ограничению биологического разложения и оторфовыванию растительных остатков на поверхности почвы с образованием лесной подстилки. На вырубках может формироваться значительный объем ветоши из остатков высокотравной луговой растительности. Однако подстилка не достигает значительной мощности, как в бореальных лесах, и в середине–конце вегетационного периода практически исчезает в результате биологического разложения и гумификации. Температура почвы на высоте 1635 м над ур. м. на разных глубинах значительно меняется в зимние и летние месяцы. В переходные месяцы различия в температуре почвы менее существенны. Необходимо отметить, что большую часть года здесь лежит толстым слоем снег, который защищает почву от промерзания, но сохраняет низкие температуры с ноября по май.

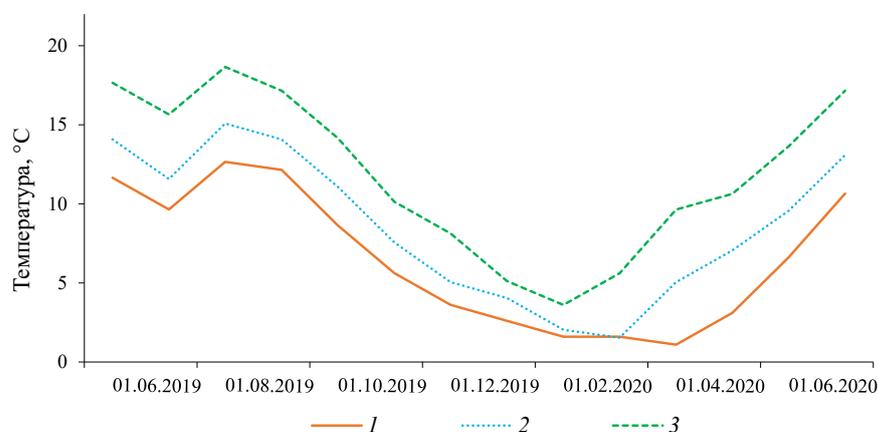


Рис. 2. Сезонное изменение температуры почв Адыгеи на глубине 10 см в зависимости от высоты местности над уровнем моря, 2019–2020 гг.:
1 – 1635 м; 2 – 1200 м; 3 – 541 м

Fig. 2. The seasonal change in soil temperature in Adygea at a depth of 10 cm depending on the altitude above sea level, 2019–2020: 1 – 1,635 m; 2 – 1,200 m; 3 – 541 m

Фоновая серая лесная почва участка № 1 содержит 9,7 % гумуса при нейтральной реакции среды и высокой степени насыщенности основаниями. Такие благоприятные условия в почвах являются результатом формирования на элювии карбонатных пород. При этом профильное распределение содержания гумуса и бактерий и ферментативной активности практически не изменяется, что значительно отличает эти почвы от типично лесных с резко убывающим вниз по профилю распределением значений этих показателей. Фоновая почва контрольной площадки здесь обладает высоким уровнем активности почвенных ферментов (каталазы, фосфатазы и инвертазы). При нарушении почвенно-растительного покрова в процессе рубки и трелевки леса отмечено резкое уменьшение биологической активности этих почв. Такую же закономерность зафиксировали и для участка № 2. Здесь содержание гумуса снижается с 9,0 % в почве контрольного участка до 4,7 % в смытой почве вырубки. Кроме того, на участке № 2 меньше степень насыщенности почвы основаниями и рН. Это происходит по причине смыва поверхностного слоя почвы на вырубке

после сведения леса. В итоге уменьшается биологическая активность, особенно активность уреазы (в 2,5 раза) и дегидрогеназ (в 4 раза). В почвах вырубок участка № 1 снижение активности ферментов выражено в меньшей степени.

ИПБС почв участков № 1 и 2 максимальны на контрольных площадках (рис. 3). Сведение леса привело к уменьшению ИПБС. На участке № 1 выявлено постепенное увеличение ИПБС по мере повышения возраста насаждения с момента сведения леса.

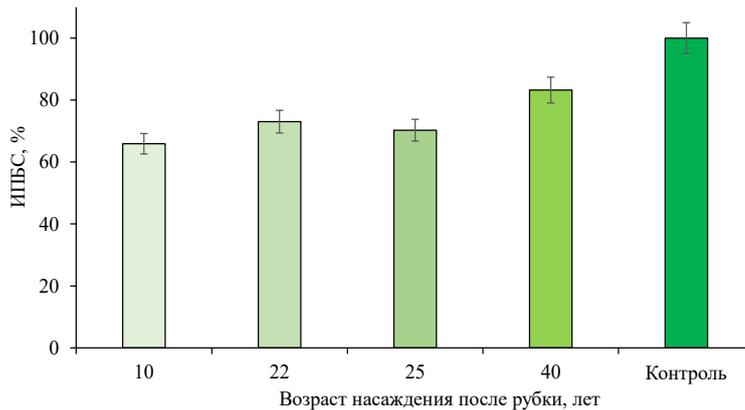


Рис. 3. Интегральный показатель биологической активности низкогорных послелесных почв на участке № 1 в зависимости от возраста вырубки, 2019–2021 гг.

Fig. 3. The integral index of biological activity of low-mountain post-forest soils in plot no. 1 depending on the age of the logging area, 2019–2021

Меньшая разница ИПБС отмечена для почвы с 40-летним возрастом насаждения, максимальное расхождение – для почвы с лесом 10–12 лет. На участке № 3 произошло почти 2-кратное снижение ИПБС для почвы вырубки по сравнению с контрольным участком леса.

На участке № 3 контрольная серая лесостепная почва обладает типичным для этого типа содержанием гумуса (7,3 %) и нейтральным pH (7,3). Физические свойства (плотность, структурное состояние, сопротивление пене-трации) и реакция среды на этом участке практически неотличимы для всех трех площадок. Интегрированная оценка показала относительно несущественные различия серых лесостепных почв разной степени повреждения по сравнению с дерново-карбонатными почвами [6, 11]. В 2019 г. наибольшее отклонение от контрольных значений выявлено для почв заросшей древесно-кустарниковой растительностью вырубки. Здесь ИПБС на 23 % меньше, чем для почвы контрольного участка (рис. 4). Повторное сведение подростка на этой вырубке привело к выравниванию ИПБС этого и контрольного участков. Причиной данного явления стало повышение инсоляции на оголенном участке вырубки, что повлекло за собой рост освещенности, температуры, интенсивное развитие луговой злаково-разнотравной растительности. Почвенные свойства тоже заметно изменились: увеличилось содержание карбоната

кальция, рН, плотность сложения и влажность почв. На вырубках отмечено разнонаправленное изменение биологических свойств серых лесостепных почв. Например, содержание гумуса и активного углерода на обоих участках вырубки уменьшается на 4–23 и 11–28 % относительно контрольных значений. Также снижается численность бактерий (на 10–19 %), активность уреазы (на 10–75 %) и пероксидазы (на 44–48 %). Однако увеличивается активность каталазы – на 13–41 %. Другие показатели ведут себя разнонаправленно в зависимости от типа растительности на повторно вырубленном и заросшем участках вырубки.

В 2020 г. почвы вырубок еще больше выравниваются по ИПБС с почвой контрольного участка. Почва на участке повторной рубки имеет значения показателя выше контрольных (рис. 4). Еще через год, в 2021 г. увеличение ИПБС по отношению к контролю составило 44 % на участке повторной рубки и 14 % на участке заросшей фруктарником вырубки. Причины изменения биологической активности почв, как уже упоминали, связаны с повышенной продуктивностью травянистой растительности восстановительной сукцессии на участках, лишенных фоновых мертвопокровных лесов с сомкнутыми кронами.

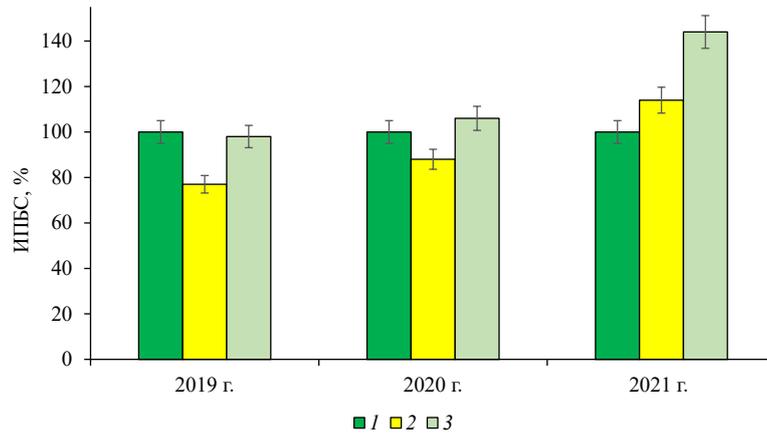


Рис. 4. Интегральный показатель биологической активности серых лесостепных почв на участке № 3, 2019–2021 гг.: 1 – контроль; 2 – вырубка; 3 – вырубка, заросшая подростом

Fig. 4. The integral index of biological activity of gray forest-steppe soils at plot no. 3, 2019–2021: 1 – control; 2 – logged land; 3 – logged land overgrown with undergrowth

Биологическая активность дерново-карбонатных почв среднегорий Адыгеи на участке № 4 (высота 1635 м над ур. м.) в нарушенных рубкой древостоях характеризовалась как значительно подавленная даже через 10 лет после сведения леса методом сплошной рубки. Сразу после антропогенного воздействия в 2010 г. угнетение биологической активности составило более 25 % как для отдельно взятого поверхностного слоя (0–10 см), так и в пересчете на весь почвенный профиль. Деградация биологической активности и ее следствие – значительное нарушение экологических функций почвы – были связаны с механическим нарушением ее поверхности в результате работы бульдозеров, погрузчиков и другой тяжелой техники при рубке, трелевке и вывозе леса. Через 9–10 лет

после сведения леса было выявлено, что ИПБС различаются для участков с разной степенью первоначального нарушения почвенно-растительного покрова (рис. 5). На участках со средней и сильной степенью нарушения произошло значительное снижение ИПБС. На участках со слабым нарушением почвы в результате опущенного эффекта ИПБС увеличился вследствие повышения биологической активности и содержания органического вещества в подстилке и гумусово-аккумулятивном слое почв. Рост ИПБС относительно контрольных участков составил 13–41 %. Аналогичные результаты были получены и на других участках, освобожденных от древесной растительности в этом регионе [6, 11, 13].

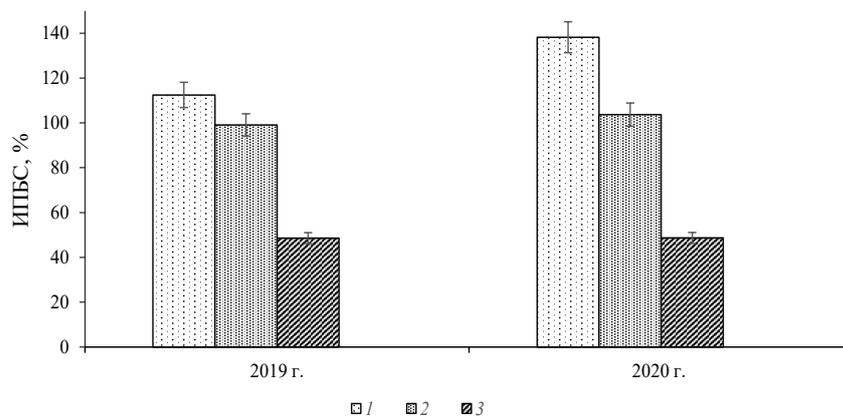


Рис. 5. Интегральный показатель биологического состояния дерново-карбонатных почв участка №4 разной степени нарушения, 2019–2020 гг.:

1 – слабое; 2 – среднее; 3 – сильное

Fig. 5. The integral index of the biological condition of rendzina soils of plot no. 4 with varying degrees of disturbance, 2019–2020: 1 – weak;

2 – average; 3 – strong

Заключение

Использование методов биологической диагностики позволило выявить значительные изменения экологического состояния почв (дерново-карбонатных, серых лесных и лесостепных) Западного Кавказа в результате рубки лесов. Описаны разные варианты изменений биологической активности послелесных почв, которые определяются степенью нарушения почвенно-растительного покрова, свойствами почв и возрастом вырубков. Максимальная деградация почв отмечена непосредственно после сведения леса. По мере увеличения возраста вырубков биологическая активность почв имеет тенденцию к восстановлению. Но даже через десятилетия не происходит полного возврата биологической активности до значений почв фоновой лесной территории. Сведение леса на крутых склонах приводит к необратимому уменьшению биологической активности в результате утраты поверхностного слоя вследствие эрозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вилкова В.В., Казеев К.Ш., Шханацев А.К., Колесников С.И. Реакция ферментативной активности почв ксерофитных лесов черноморского побережья Кавказа на пирогенное воздействие // Арид. экосистемы. 2022. Т. 28, № 1(90). С. 107–114.

Vilkova V.V., Kazeev K.Sh., Shkhatpatsev A.K., Kolesnikov S.I. Reaction of the Enzymatic Activity of Soils of Xerophytic Forests of the Black Sea Coast in the Caucasus to the Pyrogenic Impact. *Aridnye ekosistemy* = Arid Ecosystems, 2022, vol. 28, no. 1(90), pp. 107–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-1-107-114>

2. Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Гедгафова Ф.В., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. № 1. С. 78–92.

Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Gedgafova F.V., Tembotov R.H., Khakunova E.M. Biological Activity of Soils of the Deciduous Forests Belt in Central Caucasus. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, no. 1, pp. 78–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0024114821010046>

3. Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Оценка уровня биологической активности агрогенных и естественных черноземов Кабардино-Балкарии // Почвоведение. 2017. № 5. С. 614–623.

Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Tembotov R.K., Khakunova E.M. Assessment of Biological Activity in Agroгенic and Natural Chernozems of Kabardino-Balkaria. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2017, vol. 50, pp. 589–596. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-1-25-34>

4. Дегтярева Т.В., Караев Ю.И., Лиховид А.А., Лысенко А.В. Микроэлементный состав дерново-карбонатных почв Северо-Западного Кавказа // Устойчивое развитие гор. территорий. 2021. Т. 13, № 1(47). С. 25–34.

Degtyareva T.V., Karaev Yu.I., Likhovid A.A., Lysenko A.V. Microelement Composition of Sod-Carbonate Soils of the North-West Caucasus. *Ustojchivoe razvitie gornyykh territorij* = Sustainable Development of Mountain Territories, 2021, vol. 13, no. 1(47), pp. 25–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-1-25-34>

5. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2016. 356 с.

Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *The Methods for Biодiagnostics of Terrestrial Ecosystems*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2016. 356 p. (In Russ.).

6. Казеев К.Ш., Солдатов В.П., Шханацев А.К., Шевченко Н.Е., Грабенко Е.А., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение свойств дерново-карбонатных почв после сплошной рубки в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2021. Т. 4, № 4. С. 426–436.

Kazeev K.Sh., Soldatov V.P., Shkhatpatsev A.K., Shevchenko N.Ye., Grabenko Ye.A., Ermolaeva O.Yu., Kolesnikov S.I. Changes in the Properties of Calcareous Soils after Clearcutting in the Coniferous-Deciduous Forests of the Northwestern Caucasus. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, no. 4, pp. 426–436. <https://doi.org/10.31857/S0024114821040069>

7. Минкина Т.М., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А., Назаренко О.Г., Максимов А.Ю., Замулина И.В., Бурачевская М.В., Сушкова С.Н. Аккумуляция тяжелых металлов разнотравной степной растительностью по данным многолетнего мониторинга // Арид. экосистемы. 2018. Т. 24, № 3(76). С. 43–55.

Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Nazarenko O.G., Maksimov A.Yu., Zamulina I.V., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N. Accumulation of Heavy Metals by Forb Steppe Vegetation According to Long-Term Monitoring Data. *Aridnye ekosistemy* =

Arid Ecosystems, 2018, vol. 24, no. 3(76), pp. 43–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079096118030058>

8. Нижельский М.С., Казеев К.Ш., Вилкова В.В., Колесников С.И. Ингибирование ферментативной активности чернозема обыкновенного газообразными продуктами горения растительных материалов // Почвоведение. 2022. № 6. С. 728–736.

Nizhelskiy M.S., Kazeev K.Sh., Vilкова V.V., Kolesnikov S.I. Inhibition of Enzymatic Activity of Ordinary Chernozem by Gaseous Products of Plant Matter Combustion. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2022. vol. 55, pp. 802–809. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1064229322060096>

9. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095>

Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. Microbiological Indicators of Soil Ecological Functions: A Review. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2022, vol. 55, pp. 221–234. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095>

10. Осинцева М.А., Миленьева И.С., Голубцова Ю.В. Физико-химический анализ почвенного покрова техногенно нарушенных территорий Кузбасса // Устойчивое развитие гор. территорий. 2022. Т. 14, № 2(52). С. 252–262.

Osin'tseva M.A., Melentyeva I.S., Golubtsova Yu.V. Physico-Chemical Analysis of the Soil Cover of Technogenically Disturbed Territories of Kuzbass. *Ustojchivoe razvitie gornyykh territorij* = Sustainable Development of Mountain Territories, 2022, vol. 14, no. 2(52), pp. 252–262. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-2-252-262>

11. Солдатов В.П., Шхатацев А.К., Казеев К.Ш., Харитонов Т.Д., Казеев Д.К., Колесников С.И. Динамика изменения активности ферментов в почвах Адыгеи с разной степенью нарушения после сведения леса // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Естеств. науки. 2020. № 4. С. 105–111.

Soldatov V.P., Shkhatatsev A.K., Kazeev K.Sh., Kharitonova T.D., Kazeev D.K., Kolesnikov S.I. Dynamics of Enzyme Activity Change in Soils of Adygea with Various Degrees of Disturbance after Forest Reduction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki* = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science, 2020, no. 4, pp. 105–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-4-105-111>

12. Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Тюрина И.Г., Васильева Г.К., Кизилкая Р. Мониторинг содержания бенз(а)пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения // Почвоведение. 2017. № 1. С. 105–116. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010142>

Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Deryabkina I.G., Vasil'eva G.K., Kizilkaya R. Dynamics of Benzo[α]pyrene Accumulation in Soils under the Influence of Aero-technogenic Emissions. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2017, vol. 50, pp. 95–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1064229317010148>

13. Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Горнов А.В., Грабенко Е.А., Тихонова Е.В., Лукина Н.В. Сукцессионная динамика растительности и запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 163–176.

Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Smirnov V.E., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Grabenko E.A., Tikhonova E.V., Lukina N.V. Succession Dynamics of Vegetation and Storages of Soil Carbon in Mixed Forests of Northwestern Caucasus. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 3, pp. 163–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819030082>

14. Burachevskaya M., Mandzheva S., Bauer T., Minkina T., Rajput V., Chaplygin V., Fedorenko A., Chernikova N., Zamulina I., Kolesnikov S., Sushkova S., Perelomov L. The Effect of Granular Activated Carbon and Biochar on the Availability of Cu and Zn to *Hordeum sativum* Distichum in Contaminated Soil. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 5, art. no. 841. <https://doi.org/10.3390/plants10050841>
15. Cao R., Yang W., Chang C., Wang Z., Wang Q., Li H., Tan B. Differential Seasonal Changes in Soil Enzyme Activity along an Altitudinal Gradient in an Alpine-Gorge Region. *Applied Soil Ecology*, 2021, vol. 166, art. no. 104078. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104078>
16. Huang H., Tian D., Zhou L., Su H., Ma S., Feng Y., Tang Z., Zhu J., Ji C., Fang J. Effects of Afforestation on Soil Microbial Diversity and Enzyme Activity: A Meta-Analysis. *Geoderma*, 2022, vol. 423, art. no. 115961. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115961>
17. Kozun Yu.S., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Climatic Gradients of Biological Properties of Zonal Soils of Natural Lands. *Geoderma*, 2022, vol. 425, art. no. 116031. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116031>
18. Luo L., Meng H., Gu J.D. Microbial Extracellular Enzymes in Biogeochemical Cycling of Ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 197, pp. 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.023>
19. Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. Assessment of Ecological State of Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons after Bioremediation. *Environmental Processes*, 2022, vol. 9, art. no. 49. <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00604-9>
20. Minnikova T., Kolesnikov S., Evstegneeva N., Timoshenko A., Tsepina N. Estimation of the Enzymatic Activity of Haplic Chernozem under Contamination with Oxides and Nitrates of Ag, Bi, Te and Tl. *Agronomy*, 2022, vol. 12, no. 9, art. no. 2183. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092183>
21. Thiele-Bruhn S., Schloter M., Wilke B.-M., Beaudette L.A., Martin-Laurent F., Cheviron N., Mougin C., Römcke J. Identification of New Microbial Functional Standards for Soil Quality Assessment. *SOIL*, 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 17–34. <https://doi.org/10.5194/soil-6-17-2020>

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



Научная статья

УДК 625.852

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-133-142

Моделирование теплового режима дорожной одежды и земляного полотна лесовозных дорог

В.И. Клевко, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, просп. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; vlivkl@mail.ru

Поступила в редакцию 18.12.23 / Одобрена после рецензирования 12.03.24 / Принята к печати 16.03.24

Аннотация. Почти на всей территории лесных районов Российской Федерации в зимний период наблюдается промерзание грунтов. Воздействие отрицательных температур на пылевато-глинистые грунты становится причиной ряда неблагоприятных процессов, которые изменяют свойства самих грунтов. В число самых неблагоприятных из этих процессов входит накопление влаги в грунтах под влиянием перемещения фронта промерзания. При замерзании водонасыщенные глинистые грунты резко увеличиваются в объеме. Это приводит к появлению морозного пучения в активной зоне земляного полотна лесных дорог, что крайне негативно воздействует на конструкцию всей дорожной одежды и может повлечь за собой повреждение покрытия с резким ухудшением транспортно-эксплуатационных качеств лесных дорог. Для борьбы с морозным пучением необходимо изучение закономерностей изменения водно-теплового режима дорожных конструкций. Наибольшее значение для прогнозирования морозного пучения и разработки мероприятий по борьбе с этим явлением имеет глубина промерзания дорожной одежды и земляного полотна. В статье описаны разработанная система мониторинга температуры дорожной конструкции на глубину до 3 м и результаты измерений, позволяющие оценить изменение температуры на различной глубине от поверхности дороги и определить глубину промерзания. Всего было установлено 32 датчика с шагом 10 см. Выполнено численное моделирование процесса промерзания дорожной одежды и верхней части земляного полотна лесной дороги со сравнением результатов с показателями натуральных наблюдений. Выявлена хорошая сходимость данных. По итогам опытных исследований промерзание составило 173 см, численного моделирования – 190 см. Средняя погрешность результатов численного моделирования процесса промерзания покрытия и верхней зоны земляного полотна лесной дороги – 8–10 % по сравнению с опытными данными.

Ключевые слова: лесные дороги, глубина промерзания, тепловой режим, сезонное промерзание, численное моделирование промерзания, датчики температуры

Для цитирования: Клевко В.И. Моделирование теплового режима дорожной одежды и земляного полотна лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 133–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-133-142>

© Клевко В.И., 2024

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

Original article

Modeling the Thermal Regime of Road Pavement and Roadbed of Logging Roads

Vladimir I. Kleveko, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolsky, 29, Perm, 614990, Russian Federation; vlivkl@mail.ru

Received on December 18, 2023 / Approved after reviewing on March 12, 2024 / Accepted on March 16, 2024

Abstract. Soil freezing is observed throughout almost the entire forested area of the Russian Federation in winter. The effect of negative temperatures on dusty-clay soils causes a number of adverse processes that change the properties of the soils themselves. One of the most unfavorable of these processes is the accumulation of moisture in soils under the influence of the movement of the freezing front. When freezing, water-saturated clay soils increase dramatically in volume. This leads to the appearance of frost heaving in the active zone of the forest roadbed, which has an extremely adverse effect on the structure of the entire pavement and can lead to damage to the pavement with a sharp deterioration in the transport and operational qualities of forest roads. To combat frost heaving, it is necessary to study the patterns of changes in the water-thermal regime of road structures. The depth of freezing of the pavement and the roadbed is of the greatest importance for predicting frost heaving and developing measures to combat this phenomenon. The article describes the developed system for monitoring the temperature of the road structure to a depth of 3 m and the measurement results which allow us to evaluate the temperature change at different depths from the road surface and determine the freezing depth. A total of 32 sensors have been installed with a step of 10 cm. A numerical simulation of the freezing process of the pavement and the upper part of the roadbed of a forest road has been performed, with the results compared with the indicators of field observations. Good data convergence has been revealed. According to the results of experimental studies, the freezing value has been 173 cm, and according to the results of numerical simulation – 190 cm. The average error in the results of numerical simulation of the freezing process of the pavement and the upper zone of the forest roadbed has been 8–10 % compared to the experimental data.

Keywords: forest roads, freezing depth, thermal regime, seasonal freezing, numerical freezing simulation, temperature sensors

For citation: Kleveko V.I. Modeling the Thermal Regime of Road Pavement and Roadbed of Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 133–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-133-142>

Введение

Лесная дорога состоит из целого комплекса различных взаимосвязанных конструктивных элементов. Надежность эксплуатации дороги зависит от безотказной работы ее составляющих. Напряженно-деформированное состояние активной зоны земляного полотна непосредственно влияет на дорожную одежду [1, 9]. Возникновение сил морозного пучения в грунте земляного полотна приводит к разру-



шению дорожной одежды. Для возникновения сил морозного пучения необходимо одновременное наличие 3 факторов: промерзание грунтов, пылевато-глинистые грунты в зоне промерзания и близко расположенные грунтовые воды. Кроме того, прочностные и деформационные характеристики пылевато-глинистых грунтов сильно зависят от влажности и значительно меняются по сезонам года [18, 23, 27]. Таким образом, воздействие климатических факторов, в основном температуры и влажности грунта, приводит к существенному изменению напряженно-деформированного состояния всей конструкции дорожной одежды и активной зоны земляного полотна лесных дорог [9–11, 13, 20, 21].

Срок службы дорожной одежды лесных дорог напрямую зависит от физико-механических свойств грунтов, расположенных в верхней части земляного полотна, на которые, в свою очередь, влияют температура и влажность [6, 12, 22, 25]. Наиболее опасным периодом года является период оттаивания сезонно-мерзлого слоя грунта. Анализ работы дорожных одежд, особенно в северных районах при неблагоприятных инженерно-геологических условиях, показывает, что в этот период происходят наибольшие разрушения и деформации, являющиеся главной причиной низких транспортно-эксплуатационных показателей лесных дорог [5, 7, 24, 26]. Климатические условия для районов России могут существенно различаться [10, 13–15, 17]. Поэтому необходимы проведение полевых исследований на стационарных пунктах наблюдений на территориях с сезоннопромерзающими грунтами и разработка региональных (местных) рекомендаций по проектированию и эксплуатации автомобильных дорог [4].

Цель исследования – оценка возможности использования численного моделирования для прогнозирования глубины промерзания дорожной одежды и активной зоны земляного полотна лесных дорог.

Объекты и методы исследования

Для изучения процессов промерзания грунтов с 2019 г. выполняются полевые исследования по мониторингу изменения температуры в дорожной конструкции на опытной площадке, расположенной в Пермском крае [4, 19].

Подробное описание опытной площадки и использованного оборудования приведено в работе [19]. Для погружения температурных датчиков в глубь грунтового массива применялась пластиковая трубка диаметром 50 мм и длиной 3000 мм. Внутри трубки были закреплены 32 датчика температуры на расстоянии 100 мм друг от друга. Датчики способны измерять температуру в диапазоне $-55...+125$ °С.

В результате измерений были получены значения температуры в дорожной конструкции в течение осенне-зимнего периода 2021–2022 гг. (табл. 1).

Полевые исследования показали, что изучение особенностей работы водно-теплового режима дорожных конструкций лесных дорог представляет собой сложную задачу.

Анализ криогенных процессов в реальных условиях – очень трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому в последнее время находит широкое применение компьютерное моделирование процессов промерзания [2, 3, 8]. Существует ряд компьютерных программ, использующих метод конечных элементов и позволяющих решать задачи моделирования в грунтах [2, 3]. К ним можно отнести программные комплексы GeoStudio, COSMOS/M, ANSYS и др.

Одной из самых удобных программ является GeoStudio, которая предназначена для решения широкого комплекса геотехнических задач. В состав комплекса входит модуль Temp, учитывающий различные исходные данные и позволяющий моделировать процессы промерзания грунта земляного полотна и дорожной одежды лесных дорог.

Таблица 1

**Результаты измерения температуры дорожного полотна
в осенний и зимний периоды**

The results of roadbed temperature measurements in autumn and winter

Глубина, м (номер датчика)	Температура, °С			
	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль
Над поверхностью (32)	-1,00	-3,00	-6,00	-9,50
0 (31)	-0,75	-2,25	-5,50	-9,50
0,1 (30)	-0,75	-2,25	-5,00	-5,75
0,2 (29)	-0,25	-2,00	-5,50	-5,25
0,3 (28)	0,25	-1,75	-5,25	-5,00
0,4 (27)	0,50	-1,50	-4,75	-4,50
0,5 (26)	0,65	-0,75	-4,25	-4,25
0,6 (25)	0,75	-0,50	-4,00	-4,00
0,7 (24)	0,75	-0,50	-3,75	-3,75
0,8 (23)	1,25	1,00	-3,25	-3,75
0,9 (22)	1,50	1,25	-1,85	-2,75
1,0 (21)	2,25	1,25	-1,75	-2,75
1,1 (20)	2,25	1,35	-1,50	-2,55
1,2 (19)	2,25	1,50	-1,35	-2,15
1,3 (18)	3,00	1,55	-1,25	-2,00
1,4 (17)	3,50	1,75	-0,95	-1,50
1,5 (16)	3,25	1,75	-0,70	-0,65
1,6 (15)	3,50	2,00	-0,50	-0,75
1,7 (14)	3,50	2,25	-0,25	-0,25
1,8 (13)	3,75	2,25	1,00	0,05
1,9 (12)	3,75	2,75	1,25	0,55
2,0 (11)	4,00	3,30	1,45	1,00
2,1 (10)	4,00	3,00	1,50	1,25
2,2 (9)	4,50	3,75	1,75	1,50
2,3 (8)	4,50	3,50	1,85	1,70
2,4 (7)	4,70	4,25	2,25	2,00
2,5 (6)	4,75	4,00	2,55	2,25
2,6 (5)	5,50	4,50	2,75	2,50
2,7 (4)	5,50	4,75	2,85	2,50
2,8 (3)	5,25	5,00	3,00	2,55
2,9 (2)	5,50	5,25	3,25	2,75
3,0 (1)	6,00	5,25	3,25	3,00

Граничные условия задавались для поверхности дороги и нижней линии модели: для поверхности – путем приложения к ней средней температуры воздуха в г. Перми за 2021–2022 гг. по архивным данным метеослужбы [16]; для нижней линии – постоянной во времени величиной, соответствующей постоянной температуре $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 11 м.

Значения теплопроводности материалов дорожной одежды и грунтов земляного полотна принимались по нормативным данным, приведенным в СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» и в приложении 5 МОН 2–2001 «Проектирование нежестких дорожных одежд».

Программа GeoStudio TEMP/W позволяет выводить результаты расчета моделирования процесса промерзания на любую дату цикла расчета. На рис. 1 представлены примеры расчета на конкретные дни (1 ноября, 1 декабря, 1 января и 1 февраля) цикла моделирования.

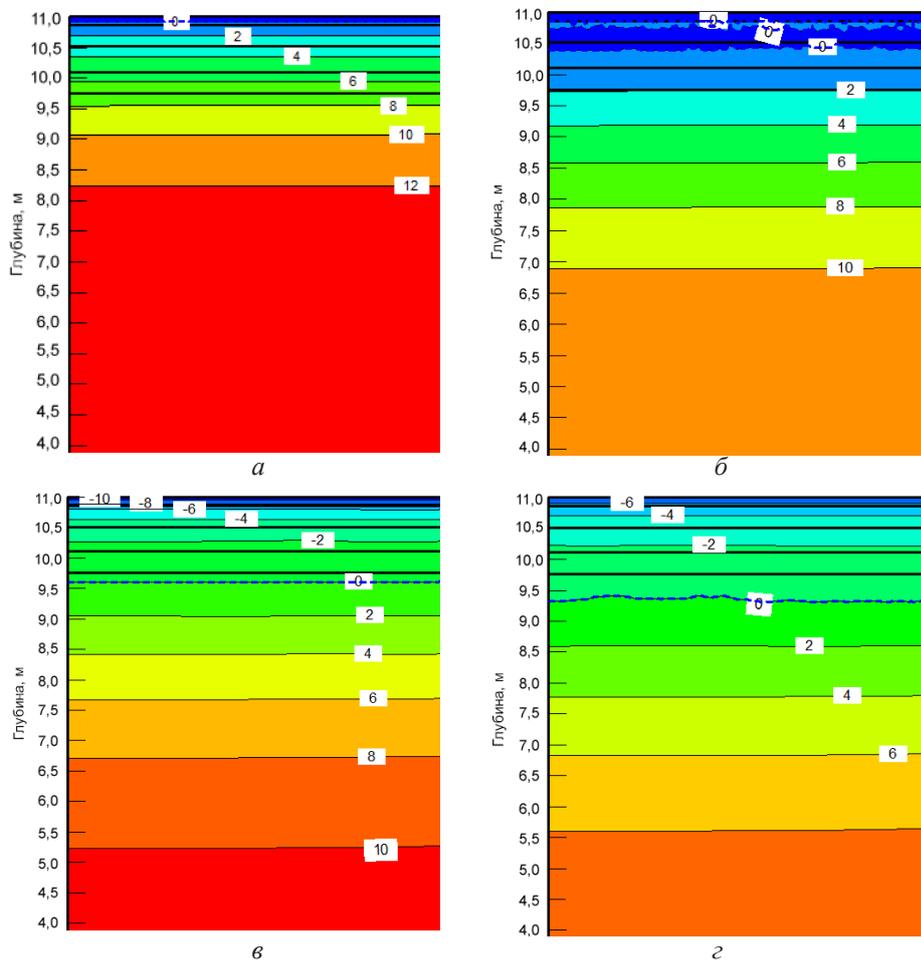


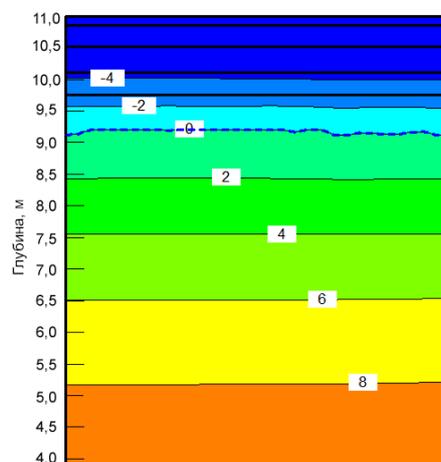
Рис. 1. Общий вид изотерм при моделировании процесса промерзания дорожного полотна в программе GeoStudio: *a* – на 1 ноября (глубина промерзания 0,1 м); *б* – на 1 декабря (глубина промерзания 0,6 м); *в* – на 1 января (глубина промерзания 1,4 м); *г* – на 1 февраля (глубина промерзания 1,7 м)

Fig. 1. The general view of the isotherms when modeling the process of roadbed freezing in the GeoStudio program: *a* – on November 1 (freezing depth 0.1 m); *b* – on December 1 (freezing depth 0.6 m); *v* – on January 1 (freezing depth 1.4 m); *z* – on February 1 (freezing depth 1.7 m)

Максимальная глубина промерзания была отмечена 10 февраля и составила 1,9 м. Общий вид изотерм для этой даты представлен на рис. 2.

Рис. 2. Общий вид изотерм в программе GeoStudio при максимальной глубине промерзания дорожного полотна (1,9 м)

Fig. 2. The general view of the isotherms in the GeoStudio program at the maximum roadbed freezing depth (1.9 m)



Результаты исследования и их обсуждение

Для разработки мероприятий по борьбе с морозным пучением в первую очередь необходимы сведения о глубине промерзания грунта в активной зоне земляного полотна. При численном моделировании процесса промерзания грунтов была определена дата максимальной глубины перехода температуры через 0 °С. Для этой даты (10 февраля) было выполнено сравнение данных о распределении температуры по глубине, полученных численным моделированием и опытным путем (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение опытных и расчетных значений температуры дорожного полотна The comparison of experimental and calculated values of the roadbed temperature

Глубина, м	Температура, °С	
	Опытные данные	Численный метод
0	-6,50	-6,00
0,1	-4,75	-5,80
0,2	-3,25	-5,50
0,3	-3,00	-5,30
0,4	-4,50	-5,00
0,5	-4,25	-4,80
0,6	-4,00	-4,50
0,7	-3,75	-4,40
0,8	-3,75	-4,30
0,9	0,75	-4,15
1,0	0,75	-3,90
1,1	4,25	-3,45
1,2	1,75	-3,00
1,3	0,00	-2,45

Окончание табл. 2

Глубина, м	Температура, °С	
	Опытные данные	Численный метод
1,4	3,50	-2,00
1,5	1,75	-1,60
1,6	4,75	-1,10
1,7	-0,25	-0,80
1,8	0,75	-0,30
1,9	1,25	0,00
2,0	4,00	0,20
2,1	1,25	0,50
2,2	4,50	0,80
2,3	1,00	1,10
2,4	5,00	1,40
2,5	0,25	1,70
2,6	2,50	2,00
2,7	2,15	2,25
2,8	2,25	2,50
2,9	2,25	2,75
3,0	3,00	3,00

Глубина промерзания грунта по опытным данным составила 1,73 м, а по результатам численного моделирования – 1,9 м. Таким образом, программный комплекс GeoStudio TEMP/W, реализующий метод конечных элементов, позволяет достаточно точно моделировать процессы промерзания и оттаивания земляного полотна и дорожной одежды автомобильных дорог. Полученная погрешность составила 8 %. Сравнение остальных значений температур показало, что средняя погрешность расчетов равняется 10–15 %.

Выводы

1. Результаты численного моделирования процесса промерзания дорожной одежды и активной зоны земляного полотна показали хорошую сходимость с данными опытных наблюдений за температурным режимом дорожных конструкций. Численное моделирование позволяет прогнозировать глубину промерзания с достаточной для практических расчетов точностью.

2. Точность прогноза глубины промерзания конструкций лесных дорог численными методами можно повысить путем использования в качестве исходных данных результатов опытных измерений теплофизических параметров материалов дорожной одежды и грунтов активной зоны земляного полотна.

3. Необходимо развивать сеть опытных участков для проведения полевых наблюдений за температурным режимом дорожных конструкций с целью получения объективных данных о глубине промерзания и разработки региональных рекомендаций по проектированию и эксплуатации лесных дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Апталаев М.Н., Жалко М.Е. Влияние водно-теплового режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды // Трансп. сооружения. 2016. Т. 3, № 4. Ст. № 2. Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/02TS416.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Aptalaev M.N., Zhalko M.E. Effect of the Water-and-Thermal Regime of the Auto-Road Base on the Pavement State. *Transportnyye sooruzheniya* = Russian Journal of Transport Engineering, 2016, vol. 3, no. 4, art. no. 2. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/02TS416>

2. Богатырева Т.В. Моделирование промерзания грунта земляного полотна автомобильной дороги с использованием расчетных программных комплексов // Ежегодная национальная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2020 г.: сб. тез. докл. Красноярск: Науч.-инновационный центр, 2021. С. 44–45.

Bogatyreva T.V. Modeling of Freezing of the Roadbed Soil Using Calculation Software Packages. *Annual National Scientific and Technical Conference of the Teaching Staff, Postgraduate Students and Students of the Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University Based on the Results of Research Work for 2020: Collection of Abstracts of the Reports*. Krasnoyarsk, Research and Innovation Centre, 2021, pp. 44–45. (In Russ.).

3. Бургутдинов А.М., Кашапова К.Р., Клевеко В.И., Моисеева О.В. Моделирование сезонного промерзания земляного полотна автомобильной дороги // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пермь: ПНИПУ, 2015. С. 346–350.

Burgonutdinov A.M., Kashapova K.R., Kleveko V.I., Moiseeva O.V. Modeling Seasonal Freezing of the Roadbed. *Modernization and Scientific Research in the Transport Complex: Materials of Scientific and Practical Conf. with International Participation*. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2015, pp. 346–350. (In Russ.).

4. Бургутдинов А.М., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Ефимов Д.С., Швецова В.В. Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 146–158.

Burgonutdinov A.M., Rudov S.E., Grigoriev I.V., Efimov D.S., Shvetsova V.V. Experimental Studies of the Thermal Regime in the Pavement Layers of Long-Distance Forest Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 2, pp. 146–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-146-158>

5. Вырко Н.П., Ращупкин С.В. Влияние морозного пучения на состояние транспортных путей // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2: Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2002. № 10. С. 119–122.

Vyrko N.P., Rashchupkin S.V. The Influence of Frost Heaving on the Condition of Transport Routes. *Trudy BGTU. Seriya 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Proceedings of the BSTU. Series 2. Forest and Woodworking Industry, 2002, no. 10, pp. 119–122. (In Russ.).

6. Гаврилов Т.А., Хорошилов К.В., Колесников Г.Н. Сезонное промерзание лесовозной грунтовой дороги: моделирование условий появления поперечных трещин // Resources and Technology. 2018. Т. 15, № 3. С. 29–42.

Gavrilov T.A., Khoroshilov K.V., Kolesnikov G.N. Seasonal Freezing of a Logging Dirt Road: Modeling of Conditions of Transverse Cracks Emergence. *Resources and Technology*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 29–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2018.4201>

7. Жалко М.Е. Промерзание грунта, как причина ДТП на территории Пермского края // Интернет-журн. Науковедение. 2014. № 1(20). Ст. № 62. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/06TVN114.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Zhalko M.E. The Freezing of the Soil, as the Cause of Road Accidents in the Perm Region. *Internet-zhurnal Naukovedenie*, 2014, no. 1(20), art. no. 62. (In Russ.).

8. Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М. К вопросу процесса промерзания грунта с точки зрения математического моделирования // Теория и практика соврем. науки. 2021. № 12(78). С. 124–132.

Zhalko M.E., Burgonutdinov A.M. To the Issue of the Soil Freezing Process from the Point of View of Mathematical Modeling. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2021, no. 12(78), pp. 124–132. (In Russ.).

9. Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М. Влияние водно-теплового режима основания лесовозной автомобильной дороги на состояние дорожной одежды // Теория и практика соврем. науки. 2021. № 12(78). С. 133–140.

Zhalko M.E., Burgonutdinov A.M. Influence of Water-Thermal Regime of the Base of a Logging Road on the Condition of Road Clothing. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2021, no. 12(78), pp. 133–140. (In Russ.).

10. Золотарь И.А. Теоретические основы применения тонкодисперсных грунтов для возведения земляного полотна автомобильных дорог в северных районах области многолетнемерзлых грунтов. М.: Транспорт, 1988. 134 с.

Zolotar' I.A. *Theoretical Foundations of the Use of Fine-Grained Soils for the Construction of Roadbeds in the Northern Regions of Permafrost Soils*. Moscow, Transport Publ., 1988. 134 p. (In Russ.).

11. Илларионов В.А., Слабиков В.С., Вайс К.Е. Исследование влияния природно-климатических условий Севера на строительство зданий и сооружений и автомобильных дорог // Науч. знание современности. 2017. № 4(4). С. 124–130.

Illarionov V.A., Slabikov V.S., Weiss K.E. Study of the Influence of Natural and Climatic Conditions of the North on the Construction of Buildings and Structures and Highways. *Nauchnoe znanie sovremennosti*, 2017, no. 4(4), pp. 124–130. (In Russ.).

12. Корсунский М.Б., Россовский П.Д., Волчанский Г.В. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог в районах сезонного промерзания // Труды СоюзДорНИИ. Вып. 13. М., 1966. С. 83–94.

Korsunskij M.B., Rossovskij P.D., Volchanskij G.V. Regulation of Water-Thermal Conditions of the Roadbed in Areas of Seasonal Freezing. *Trudy SoyuzDorNII*. Moscow, 1966, iss. 13, pp. 83–94. (In Russ.).

13. Краев А.Н., Пермитина Т.В., Завьялов В.А. Методы прогноза водно-теплового режима земляного полотна и основания автомобильной дороги на примере ЯНАО // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. / редкол.: М.Н. Чекардовский, Л.Н. Скипин, В.В. Воронцов, А.Е. Сбитнев. Т. I. Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2014. С. 32–40.

Kraev A.N., Permitina T.V., Zav'yalov V.A. Methods for Predicting the Water-Thermal Regime of the Roadbed and Foundation of a Highway Using the Example of the Yamal-Nenets Autonomous District. *Current Issues of Construction, Ecology and Energy Saving in Western Siberia: Collection of the Materials of the International Scientific and Practical Conference: in 3 vol.* Ed. board: M.N. Chekardovskij, L.N. Skipin, V.V. Vorontsov, A.E. Sbitnev. Tyumen, RIO TyumGASU, 2014, vol. 1, pp. 32–40. (In Russ.).

14. Лопашук А.В., Лопашук В.В., Ермолин В.Н. Регулирование водно-теплового режима автомобильных дорог Камчатского края с учетом региональных особенностей // Вестн. Евраз. науки. 2021. Т. 13, № 2. Ст. № 8. Режим доступа: <https://esj.today/PD-F/16SAVN221.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Lopashuk A.V., Lopashuk V.V., Ermolin V.N. Kamchatka Krai Highways Water-Thermal Regime Regulation. *Vestnik Evraziyskoy nauki* = The Eurasian Scientific Journal, 2021, vol. 13, no. 2, art. no. 8. (In Russ.).

15. Никитина О.В. Факторы развития процессов морозного пучения, сезонного набухания и оттаивания грунтов на автомобильных дорогах Чувашской Республики // Естественнонауч. исследования в Чувашии. 2015. № 2. С. 81–84.

Nikitina O.V. Factors in the Development of Frost Heaving, Seasonal Swelling and Thawing of Soils on Highways in the Chuvash Republic. *Estestvennonauchnyye issledovaniya v Chuvashii*, 2015, no. 2, pp. 81–84. (In Russ.).

16. Погода России. Режим доступа: <http://meteo.infospace.ru/> (дата обращения: 08.12.23).

Russia's Weather. Available at: <http://meteo.infospace.ru/> (accessed: 08.12.23). (In Russ.).

17. Сапелкин Р.С., Меерсон В.Э., Меерсон М.В., Скряпников А.В., Казачек М.Н. Особенности районов строительства лесовозных автомобильных дорог // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 3. С. 30–43.

Sapelkin R.S., Meerson V.E., Meerson M.V., Skrypnikov A.V., Kazachek M.N. Features of Regions for Forest Roads Construction. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 30–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6323>

18. Сергеев А.С., Юшков Б.С. О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды // *Трансп. сооружения*. 2014. Т. 1, № 1(1). Ст. № 2. Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Sergeev A.S., Yushkov B.S. On the Freezing of Clay Soil and Water Migration into the Pavement Design. *Transportnyye sooruzheniya* = Russian Journal of Transport Engineering, 2014, vol. 1, no. 1, art. no. 2. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/02TS114>

19. Burgonutdinov A.M., Kleveko V.I. Monitoring of Changes in the Thermal Regime in the Road Structure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, art. no. 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012047>

20. Gates J.B., Scanlon B.R., Mu X., Zhang L. Impacts of Soil Conservation on Groundwater Recharge in the Semi-Arid Loess Plateau, China. *Hydrogeology Journal*, 2011, vol. 19, pp. 865–875. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0716-3>

21. Huo S., Jin M., Liang X., Lin D. Changes of Vertical Groundwater Recharge with Increase in Thickness of Vadose Zone Simulated by One-Dimensional Variably Saturated Flow Model. *Journal of Earth Science*, 2014, vol. 25, pp. 1043–1050. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0486-7>

22. Ibrahim M., Favreau G., Scanlon B.R., Seidel J.L., Coz Le M., Demarty J., Cappelaere B. Long-Term Increase in Diffuse Groundwater Recharge Following Expansion of Rainfed Cultivation in the Sahel, West Africa. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, iss. 6, pp. 1293–1305. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1143-z>

23. Jong de G., Kouwenhoven M., Bates J., Koster P., Verhoef E., Tavasszy L., Warffemius P. New SP-Values of Time and Reliability for Freight Transport in the Netherlands. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, vol. 64, pp. 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.008>

24. Kouwenhoven M., Jong de G.C., Koster P., Berg van den V.A.C., Verhoef E.T., Bates J., Warffemius P.M.J. New Values of Time and Reliability in Passenger Transport in the Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 2014, vol. 47, pp. 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.017>

25. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, iss. 3, pp. 678–694.

26. Kurtzman D., Scanlon B.R. Groundwater Recharge through Vertisols: Irrigated Cropland vs. Natural Land, Israel. *Vadose Zone Journal*, 2011, vol. 10, iss. 2, pp. 662–674. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0109>

27. Peer S., Koopmans C.C., Verhoef E.T. Prediction of Travel Time Variability for Cost-Benefit Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, vol. 46, iss. 1, pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.016>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 621.225:69.002.51

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-143-158

Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля

В.И. Посметьев¹, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [Q-1411-2015](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

В.О. Никонов¹✉, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-3510-2019](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

А.Ю. Мануковский¹, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAR-1976-2020](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.В. Посметьев¹, *канд. физ.-мат. наук, доц.*; *ResearcherID: [Z-3736-2019](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

И.В. Казаков², *д-р техн. наук, вед. науч. сотр.*; *ResearcherID: [AAD-8084-2020](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2719-375X>

¹Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru✉, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; igor.kazakov2015@bk.ru

Поступила в редакцию 29.09.23 / Одобрена после рецензирования 17.12.23 / Принята к печати 21.12.23

Аннотация. Рассмотрена значимость погрузочно-разгрузочных работ в технологическом процессе вывозки лесоматериалов лесовозными автомобилями, а также необходимость совершенствования конструкций гидроманипуляторов. Приведены наиболее рациональные пути повышения эффективности их функционирования. Представлены недостатки традиционных конструкций поворотных механизмов гидроманипуляторов, выполненных на основе реечных передач. Предложена усовершенствованная конструкция кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора от 6 гидроцилиндров. Методика исследования базируется на использовании математического моделирования. Выявлено, что накопленная энергия за 1 цикл торможения при перемещении груза составляет порядка 1442 Дж. Учитывая, что погрузка лесоматериалов осуществляется на высоте около 2 м, система рекуперации позволяет направлять около 12 % энергии поворота на операцию подъема груза. Установлено, что во всем диапазоне изменения угла окончания поворота рекуперированная энергия изменяется всего на 7,1 % – от 1340 до 1442 Дж, а амплитуда раскачивания груза – на 1,2 % – от 0,336 до 0,340 м. С увеличением длины направляющей незначительно снижаются рекуперированная энергия – с 1564 до 1428 Дж (на 8,7 %) – и амплитуда раскачивания груза – с 0,344 до 0,339 м (на 1,5 %). Обнаружено, что во всем угловом диапазоне рекуперированная энергия изменяется от 1399 до 1442 Дж (на 3 %), а амплитуда раскачивания груза – от 0,3380 до 0,3393 м (на 0,4 %). Угловая неравномерность показателей эффективности рекуперации составляет не более 3 %. Для изучения влияния параметров кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора на эффективность рекуперации энергии решена задача многофакторной оптимизации. Установлено, что оптимальное расстояние от

оси кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров поворотного механизма колонны гидроманипулятора составляет 0,23–0,25 м, оптимальное смещение оси кривошипа относительно оси колонны манипулятора – 0,17–0,18 м. При этом рекуперированная энергия за 1 цикл перемещения груза – не менее 1500 Дж, а амплитуда его раскачивания – не более 0,35 м.

Ключевые слова: кривошипный поворотный механизм колонны, лесовозный автомобиль, гидроманипулятор, гидроцилиндры, рекуперация энергии, лесоматериалы, погрузочно-разгрузочные работы, показатели эффективности, пневмогидравлический аккумулятор

Для цитирования: Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Казаков И.В. Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 143–158. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-143-158>

Original article

Modeling of the Rotary Mechanism of the Hydraulic Manipulator of a Timber Truck

Valeryi I. Posmetyev¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Vadim O. Nikonov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Andrey Yu. Manukovskii¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Viktor V. Posmetyev¹, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Igor V. Kazakov², Doctor of Engineering, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAD-8084-2020](https://orcid.org/0009-0001-2719-375X), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2719-375X>

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉], mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru

²All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation; igor.kazakov2015@bk.ru

Received on September 29, 2023 / Approved after reviewing on December 17, 2023 / Accepted on December 21, 2023

Abstract. The importance of loading and unloading operations in the technological process of wood hauling by timber trucks, as well as the need to improve the design of hydraulic manipulators, are considered. The most rational ways to increase the efficiency of their functioning are given. The disadvantages of traditional designs of hydraulic manipulator rotary mechanisms based on rack-and-pinion gears are presented. An improved design of the crank rotary mechanism of the hydraulic manipulator column from six hydraulic cylinders is proposed. The research methodology is based on the use of mathematical modeling. It has been revealed that the accumulated energy for one braking cycle when moving the load is about 1442 J. Considering that timber loading is carried out at a height of approximately 2 m, the recovery system allows approximately 12 % of the rotation energy to be directed to the load lifting operation. Over the entire range of change in the angle of



the end of rotation, the recovered energy varies by only 7.1 % – from 1340 to 1442 J, and the load swing amplitude – by 1.2 % – from 0.336 to 0.340 m. It has been determined that with an increase in the length of the guide, the recovered energy decreases slightly – from 1564 to 1428 J (by 8.7 %) – and the load swing amplitude – from 0.344 to 0.339 (by 1.5 %). It has been found that over the entire angular range, the recovered energy varies from 1399 to 1442 J (by 3 %), and the load swing amplitude – from 0.3380 to 0.3393 m (by 0.4 %). The angular unevenness of the recovery efficiency indicators is no more than 3 %. To study the influence of the parameters of the crank rotary mechanism of the hydraulic manipulator column on the efficiency of energy recovery, a multifactor optimization problem has been solved. It has been established that the optimal value of the distance from the crank axis to the movable axes of the hydraulic cylinders of the rotary mechanism of the hydraulic manipulator column is 0.23–0.25 m, the optimal value of the displacement of the crank axis relative to the axis of the manipulator column is 0.17–0.18 m. At the same time, the recovered energy for 1 cycle of load moving is at least 1500 J, and the amplitude of the load swing is no more than 0.35 m.

Keywords: column crank rotary mechanism, timber truck, hydraulic manipulator, hydraulic cylinders, energy recovery, timber, handling operations, performance indicators, hydropneumatic accumulator

For citation: Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V., Kazakov I.V. Modeling of the Rotary Mechanism of the Hydraulic Manipulator of a Timber Truck. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 143–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-143-158>

Введение

Леса имеют большое значение для развития производственных сил страны. Известно, что по величине и качеству лесных ресурсов Россия – безусловный мировой лидер. Преобладающей формой использования лесных ресурсов в РФ является заготовка древесины. Важная роль в обеспечении технологического процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автомобилями отводится погрузочно-разгрузочным работам. Существенный резерв роста производительности труда при вывозке лесоматериалов – совершенствование конструкций гидроманипуляторов, устанавливаемых для самопогрузки на лесовозные автомобили [4, 5].

Анализ результатов исследований, выполненных российскими и зарубежными авторами в области повышения эффективности функционирования гидроманипуляторов, позволил установить, что значительное улучшение их работы может быть достигнуто путем: повышения скорости перемещения грейферного захвата и улучшения точности его позиционирования; минимизации утечек рабочей жидкости в гидроприводе; согласованного управления траекторией движения поворотного и подъемных звеньев; обеспечения оптимальной полезной нагрузки при работе гидравлической и механической систем манипулятора; повышения демпфирующих свойств в случае колебаний давления рабочей жидкости при пуско-тормозных режимах работы манипулятора; исключения холостых движений при повороте колонны; минимизации потерь потенциальной энергии при погрузке и разгрузке лесоматериалов; разработки

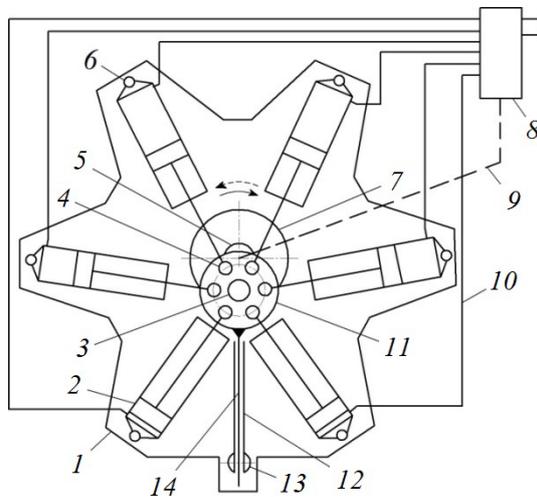
перспективных конструкций поворотных и подъемных устройств гидроманипуляторов [6–20].

В настоящее время российскими и зарубежными производителями предлагается широкая номенклатура гидроманипуляторов, предназначенных для установки на лесовозные автомобили. Одним из наиболее сложных в обслуживании и ремонте узлов таких гидроманипуляторов, от которого во многом зависит безопасность осуществления погрузочно-разгрузочных работ, является механизм поворота колонны, выполненный на основе реечной передачи. Данный механизм имеет ограниченный доступ к деталям, требует обязательной разборки при техническом обслуживании и ремонте. Кроме этого, при работе указанного поворотного механизма вследствие воздействия больших динамических нагрузок при пуско-тормозных режимах, а также недостаточно совершенной системы смазки наблюдаются неоправданно повышенное трение и износ зубчатой рейки в направляющей. Дополнительными недостатками указанных поворотных механизмов являются увеличенная масса, значительные габаритные размеры, а также ограниченный угол поворота колонны.

Одно из перспективных направлений, позволяющих значительно улучшить работу гидроманипуляторов, – разработка и исследование для них кривошипных поворотных механизмов колонны от различного количества гидроцилиндров и размещение этих механизмов на неподвижной колонне. Создание конструкций таких механизмов при постоянном повышении требований к эксплуатационным характеристикам гидроманипуляторов обуславливает необходимость решения многих, как теоретических, так и практических, задач. Выполненное авторами ранее исследование позволило установить, что от количества гидроцилиндров в кривошипном поворотном механизме колонны гидроманипулятора, их расположения относительно друг друга, а также от способа управления давлением рабочей жидкости в поршневых и штоковых полостях гидроцилиндров зависят сжимающие и растягивающие усилия, ударные нагрузки, оказывающие влияние на работу подшипников поворотной колонны гидроманипуляторов и точность поворота колонны. Выявлено, что наилучшей равномерностью крутящего момента и воздействующих усилий на подшипники, в которых проворачивается колонна, обладают схемы поворотных механизмов с 6 гидроцилиндрами. Результаты этого исследования позволили предложить перспективную схему кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора от 6 гидроцилиндров (рис. 1). Практическое использование такого поворотного механизма колонны позволит: улучшить равномерность угловой скорости поворота при различных значениях нагрузки; исключить холостые движения при повороте колонны; повысить точность позиционирования рейферного захвата гидроманипулятора; увеличить коэффициент полезного действия; преобразовывать и накапливать при тормозных режимах работы гидроманипулятора энергию рабочей жидкости для последующего полезного использования с целью снижения энергозатрат на процесс погрузки и разгрузки лесоматериалов; повысить надежность за счет снижения динамических нагрузок при пуско-тормозных режимах работы.

Рис. 1. Кривошипный поворотный механизм колонны гидроманипулятора от 6 гидроцилиндров: 1 – корпус; 2 – гидроцилиндр; 3 – кривошип; 4, 6 – оси неподвижная и подвижная; 5 – вал; 7 – фланец; 8 – гидрораспределительное устройство; 9 – датчик положения колонны; 10 – трубопровод; 11 – диск; 12 – направляющая штока; 13 – ось направляющей; 14 – шток диска

Fig. 1. The crank rotary mechanism of the hydraulic manipulator column from 6 hydraulic cylinders: 1 – housing; 2 – hydraulic cylinder; 3 – crank; 4, 6 – fixed and movable axes; 5 – shaft; 7 – flange; 8 – hydraulic distribution device; 9 – column position sensor; 10 – pipeline; 11 – disk; 12 – rod guide; 13 – guide axis; 14 – disk rod



Для изучения особенностей работы гидроманипулятора, оснащенного кривошипным поворотным механизмом колонны, а также исследования процесса рекуперации энергии при пуско-тормозных режимах работы целесообразно использовать математическое моделирование. Современные методы математического моделирования позволяют с достаточно высокой физической адекватностью воспроизводить процессы в механических и гидравлических системах манипуляторов [1–3].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является гидроманипулятор лесовозного автомобиля, предметом – кривошипный поворотный механизм колонны гидроманипулятора от 6 гидроцилиндров. Для предварительной оценки предлагаемого кривошипного поворотного механизма колонны разработана математическая модель, решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений которой осуществляется методом численного интегрирования, что дает возможность получить зависимости от времени показателей эффективности поворотного механизма колонны гидроманипулятора. Математическая модель гидроманипулятора лесовозного автомобиля включает в себя 2 подсистемы: механическую, описывающую движение гидроманипулятора с грузом (лесоматериалами) в пространстве; гидравлическую, описывающую функционирование элементов кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора.

Так как основной задачей является исследование поворота колонны гидроманипулятора, рассматривается 2-мерная модель гидроманипулятора в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 2). Механическая подсистема модели включает в себя стрелу гидроманипулятора, совершающую вращательное движение вокруг точки O , и груз (лесоматериалы), связанный со стрелой грейферным устройством EF . В математической модели принято допущение, заключающе-

еся в том, что стрела и груз описываются как единые твердые тела. Шесть гидроцилиндров $A_i C_i$ ($i = 1 \dots 6$) вызывают ускорение или торможение вращения стрелы, воздействуя на подвижные оси гидроцилиндров C_i , находящиеся по периферии диска, установленного на оси кривошипа. Положение в пространстве груза задается координатами x_F, y_F, x_E, y_E .

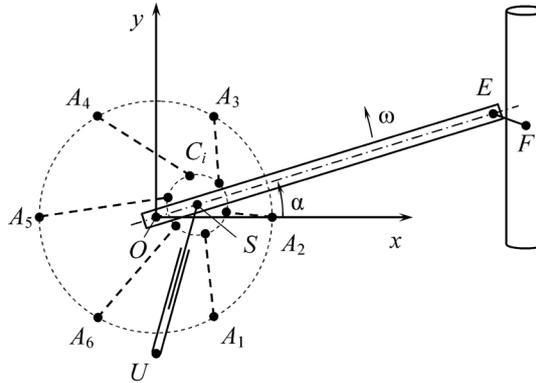


Рис. 2. Расчетная схема для построения модели кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора лесовозного автомобиля от 6 гидроцилиндров

Fig. 2. The calculation scheme for constructing a model of the crank rotary mechanism of the hydraulic manipulator column from six hydraulic cylinders

Кривошипный поворотный механизм колонны описывается в математической модели в виде абсолютно твердого тела, вращающегося относительно вертикальной оси Z . Положение колонны гидроманипулятора в пространстве задается углом α , который определяется изменением направления оси OX против хода часовой стрелки.

Система уравнений, описывающая механическую подсистему гидроманипулятора, оснащенного кривошипным поворотным механизмом колонны, включает в себя основное уравнение динамики вращательного движения, а также 2-й закон Ньютона:

$$\begin{cases} J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -k_{\tau} \frac{d\alpha}{dt} + \sum_{i=1}^6 F_{A_i C_i} h_i + \\ + F_{F_x} EF \sin \beta - F_{F_y} EF \cos \beta; \\ m_{\tau} \frac{d^2 x_F}{dt^2} = F_{F_x} = -c(x_F - x_E) - \zeta \left(\frac{dx_F}{dt} - \frac{dx_E}{dt} \right); \\ m_{\tau} \frac{d^2 y_F}{dt^2} = F_{F_y} = -c(y_F - y_E) - \zeta \left(\frac{dy_F}{dt} - \frac{dy_E}{dt} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где J – момент инерции поворота колонны гидроманипулятора, приведенный к центру вращения O ; t – время поворота колонны; k_{τ} – коэффициент трения; $F_{A_i C_i}$ – сила, оказывающая влияние со стороны i -го гидроцилиндра поворотного механизма колонны на кривошип; h_i – плечи соответствующих сил относительно оси колонны гидроманипулятора; F_{F_x} и F_{F_y} – составляющие силы, оказывающие влияние со стороны стрелы на груз в грейферном захвате; EF – расстояние между точками крепления грейферного захвата E и центром тяжести груза F ; β – угол ориентации вектора EF к оси OX ; m_{τ} – масса груза (лесоматериалов); c и ζ – коэффициенты жесткости и демпфирования в упруго-вязком приближении взаимодействия между концом грейферного захвата и грузом.

Момент инерции поворота колонны гидроманипулятора определяется по формуле

$$J = \frac{1}{3} m_c L_G^2 + \frac{1}{2} m_{o.k} R_{o.k}^2, \quad (2)$$

где m_c – масса стрелы; L_G – длина стрелы гидравлического манипулятора; $m_{o.k}$ – масса основания колонны; $R_{o.k}$ – радиус основания колонны.

Силы, действующие со стороны гидроцилиндров кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора, определяются по следующей формуле:

$$F_{A_i C_i} = (P_{ni} - P_{ши}) \frac{\pi D_r^2}{4}, \quad (3)$$

где P_{ni} и $P_{ши}$ – давления рабочей жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра $A_i C_i$ соответственно; D_r – внутренний диаметр гидроцилиндра.

Система рекуперации, которой оснащен гидропривод манипулятора, позволяет аккумулировать энергию, образующуюся при пуско-тормозных режимах поворота колонны гидроманипулятора. При тормозных режимах поворота колонны происходит существенное возрастание давления рабочей жидкости в полостях гидроцилиндров. За счет кратковременного увеличения давления рабочей жидкости через элементы рекуперативного гидропривода ее часть поступает в пневмогидравлический аккумулятор. Использование системы рекуперации позволяет не только запасти энергию рабочей жидкости при пуско-тормозных режимах вращения колонны, но и снизить отрицательное воздействие скачков давления рабочей жидкости на элементы гидропривода.

В рамках математической модели груз массой m_r , перемещаемый гидроманипулятором, представлен в виде материальной точки, совпадающей с центром тяжести груза. В разработанной 2-мерной модели удержание центра тяжести груза F вблизи точки крепления грейферного захвата E осуществляется за счет сил упругости и вязкого трения.

Описание гидравлической подсистемы манипулятора, оснащенного кривошипным поворотным механизмом колонны, осуществляется аналогично описанию, приведенному в ранее выполненном исследовании [12]. Отличительной чертой является то, что в процессе численного интегрирования уравнений вращения колонны гидроманипулятора и движения груза параметры элементов гидропривода – давление и объем полости – дискретизируются и привязываются к тем же временным шагам. Таким образом, уравнения для элементов гидропривода манипулятора добавляются к общей численной расчетной схеме.

Для реализации приведенной математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать влияние геометрических параметров гидроманипулятора, кривошипного поворотного механизма колонны, а также кинематических и инерционных параметров процесса перемещения груза на показатели эффективности работы манипулятора при циклическом перемещении груза в горизонтальной плоскости.

Для планирования теоретического исследования были определены входные переменные, входные варьируемые, а также выходные измеряемые переменные модели (рис. 3).



Рис. 3. Входные и выходные параметры разработанной математической модели [5]

Fig. 3. The input and output parameters of the developed mathematical model [5]

К 1-й группе входных параметров относятся: r_{OU} – расстояние от оси колонны до шарнира направляющей; α_n – угловое положение шарнира направляющей (угол между отрезком OU и направлением OY); R_C – расстояние от оси кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров; R_S – смещение оси кривошипа относительно вала колонны. Во 2-ю группу входных параметров входят технологические параметры: α_1 , α_2 – начальный и конечный углы ориентации стрелы гидроманипулятора в горизонтальной плоскости соответственно. К 3-й группе входных параметров относится масса груза. Для характеристики эффективности системы рекуперации кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора используются 2 показателя: E_p – рекуперированная в пневмогидравлическом аккумуляторе энергия за 1 торможение вращения колонны гидроманипулятора; A_F – амплитуда раскачивания груза после начала торможения колонны гидроманипулятора.

Для изучения влияния параметров кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора на эффективность рекуперации энергии решена задача многофакторной оптимизации. Факторами оптимизации являлись: расстояние от оси кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров; смещение оси кривошипа относительно вала колонны. В качестве критериев оптимизации использовали следующие величины: рекуперированную энергию; амплитуду раскачивания груза. Для оптимизации параметров кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора проведена серия из 9 компьютерных экспериментов, в которых варьировали расстояние от кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров на уровнях 0,05; 0,15; 0,25 м и смещение оси кривошипа на уровнях 0,10; 0,25; 0,40 м.

Задачу оптимизации кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} E_p(R_C, R_S) \rightarrow \max; \\ A_F(R_C, R_S) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow R_C^{\text{опт}}, R_S^{\text{опт}}, \quad (4)$$

где $R_C^{\text{опт}}$ и $R_S^{\text{опт}}$ – оптимальные значения параметров R_C и R_S .

Задача оптимизации считается решенной, если определена область в факторном пространстве (R_C, R_S) , в которой одновременно будут максимальной E_p и минимальной A_F .

На основе полученных в компьютерных экспериментах данных определены аналитические выражения для функций $E_p(R_C, R_S)$ и $A_F(R_C, R_S)$:

$$E_p(R_C, R_S) = 4983 R_C^2 + 1,637 \cdot 10^4 R_S^2 + 1,275 \cdot 10^4 R_C R_S - 3127 R_C - 7315 R_S + 2113; \quad (5)$$

$$A_F(R_C, R_S) = 5,833 \cdot 10^{-3} R_C^2 - 2,447 R_S^2 - 0,019 R_C R_S + 0,013 R_C + 1,774 R_S + 0,069, \quad (6)$$

где R_C и R_S измеряются в метрах, E_p – в Джоулях, A_F – в метрах.

Полученные выражения были использованы для предварительного определения (без выполнения компьютерных расчетов) показателей эффективности кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора по известным расстоянию от кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров и расстоянию смещения кривошипа относительно оси колонны.

Результаты исследования и их обсуждение

Теоретическое исследование было выполнено на основе многократных компьютерных экспериментов с различным набором параметров анализируемого манипулятора. Каждый компьютерный эксперимент заключался в повороте на 90° в горизонтальной плоскости стрелы гидроманипулятора с подвешенным грузом от угла α_1 до угла $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$. В базовых компьютерных экспериментах масса груза составляла 600 кг, длина стрелы гидроманипулятора – 6 м. Начальный угол $\alpha_1 = 0^\circ$ соответствовал захвату груза сбоку от лесовозного автомобиля (рис. 4, а), а угол торможения колонны гидроманипулятора $\alpha_1 = 90^\circ$ – погрузке груза в кузов лесовозного автомобиля (рис. 4, е).

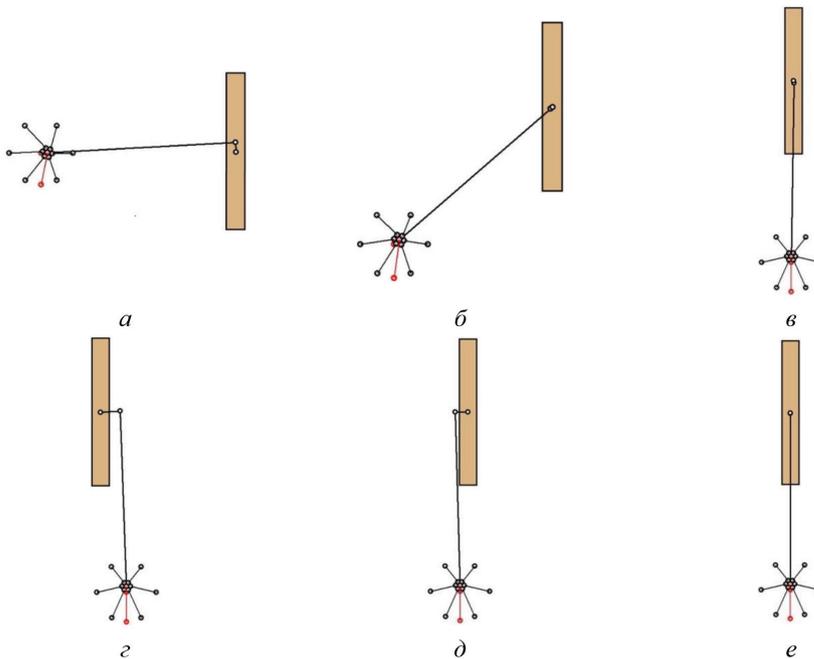


Рис. 4. Изменение состояния кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора в процессе перемещения груза при t , равном: а – 0,3 с; б – 2,9 с; в – 5,4 с; г – 6,1 с; д – 7,2 с; е – 19,5 с

Fig. 4. The change in the state of the crank rotary mechanism of the hydraulic manipulator column during the movement of the load at t equal to: а – 0.3 s; б – 2.9 s; в – 5.4 s; г – 6.1 s; д – 7.2 s; е – 19.5 s

При начале поворота стрелы груз, соединенный с концом стрелы грейферным захватом, несколько отстает от конца стрелы из-за инерции (рис. 4, *a*). По мере поворота стрелы груз совершает незначительные раскачивания вблизи конца стрелы (рис. 4, *b*). Скорость вращения ω стрелы за первые 2 с возрастает до $20 \dots^\circ/\text{с}$ (рис. 4, *a*). Когда стрела повернется на 90° по отношению к начальному угловому положению (рис. 4, *в*), производится переключение 6 гидроцилиндров кривошипного поворотного механизма из режима привода в режим рекуперации. При переключении режима скорость вращения колонны быстро уменьшается и после некоторых колебаний вблизи нулевой отметки (рис. 4, *г*) вращение колонны останавливается. При этом груз существенно отклоняется от конца стрелы (порядка 0,5 м) и в дальнейшем совершает затухающие колебания (рис. 4, *д*). После их окончания (примерно через 16 с от начала поворота) производится расчет показателей эффективности системы рекуперации (рис. 4, *e*).

Так как система рекуперации преобразует неблагоприятные угловые колебания стрелы в энергию рабочей жидкости, накапливаемой в пневмогидравлическом аккумуляторе, то на графике зависимости от времени мгновенной рекуперированной мощности $N_p(t)$ видны пики, соответствующие постепенно затухающим колебаниям стрелы (рис. 5, *a*). Рекуперированная мощность $N_p(t)$ на первом пике составляет порядка 1050 Вт. Накопленная энергия E_p рабочей жидкости за 1 цикл торможения при перемещении груза равняется примерно 1442 Дж (рис. 5, *b*). Этой энергии E_p рабочей жидкости достаточно для подъема этого же груза на высоту 24 см. Учитывая, что процесс погрузки лесоматериалов осуществляется на высоте около 2 м, система рекуперации позволяет направлять приблизительно 12 % энергии поворота на операцию подъема груза. Существующие пневмогидравлические аккумуляторы могут накапливать около 100 кДж энергии. Это дает возможность запастись энергией от выполнения 70 циклов поворота колонны гидроманипулятора и далее осуществить в режиме использования накопленной в пневмогидравлическом аккумуляторе энергии 8 элементарных подъемов груза 600 кг на высоту 2 м.

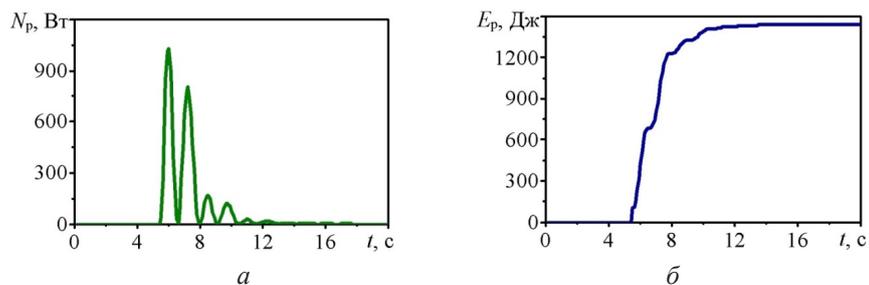


Рис. 5. Изменение во времени рекуперированных кривошипным поворотным механизмом колонны гидроманипулятора: *a* – мощности N_p ; *b* – энергии E_p

Fig. 5. The change in time of the power N_p (*a*) and energy E_p (*b*) recovered by the crank rotary mechanism of the hydraulic manipulator column

Кривошипный поворотный механизм колонны не является симметричным относительно оси вращения стрелы гидроманипулятора, поэтому необходимо установить, как эффективность поворотного механизма и системы рекуперации энергии зависит от углов начала и окончания поворота. С целью исследования угловой зависимости проведена серия из 13 компьютерных экс-

периментов, в которых изменяли угол α_2 останова вращения стрелы от -90 до 90° с шагом 15° . Одновременно угол начала поворота стрелы отстоял от угла α_2 на 90° . Компьютерные эксперименты позволили установить, что показатели системы рекуперации практически не зависят от угла окончания поворота колонны гидроманипулятора. Во всем диапазоне изменения угла α_2 рекуперированная энергия изменяется всего на 7,1 %: от 1340 до 1442 Дж (рис. 6, а), а амплитуда раскачивания груза – на 1,2 %: от 0,336 до 0,340 м (рис. 6, б). Для сравнения на рис. 6 приведены данные для кривошипного поворотного механизма колонны с 2 гидроцилиндрами. Из сравнения видно, что поворотный механизм с 6 гидроцилиндрами по сравнению с поворотным механизмом с 2 гидроцилиндрами обеспечивает более равномерную угловую зависимость показателей, в 3 раза меньшую зависимость показателей E_p и A_F от угла. Выполненные поисковые исследования свидетельствуют, что использование 3, 4 и 5 гидроцилиндров также мало предпочтительно.

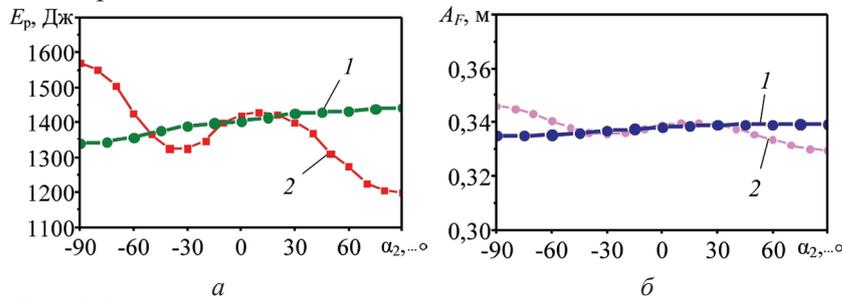


Рис. 6. Зависимость от угла α_2 торможения поворота колонны гидроманипулятора: а – рекуперированной энергии E_p ; б – амплитуды раскачивания груза A_F (1 – 6 гидроцилиндров; 2 – 2 гидроцилиндра)

Fig. 6. The dependence of the recovered energy E_p (a) and the load swing amplitude A_F (б) on the angle α_2 of the rotation deceleration of the rotation of the hydraulic manipulator column (1 – 6 hydraulic cylinders; 2 – 2 hydraulic cylinders)

Одним из ключевых элементов кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора является направляющая (рис. 1, поз. 12), защищающая от неконтролируемого вращения на оси кривошипа диска с подвижными осями гидроцилиндров. Изучено влияние расположения шарнира направляющей по отношению к механизму. Для исследования влияния длины направляющей проведена серия из 11 компьютерных экспериментов, в которых варьировали расстояние r_{OU} от оси колонны до шарнира направляющей на уровнях 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6 м. Обнаружено, что с увеличением длины направляющей незначительно снижаются рекуперированная энергия – с 1564 до 1428 Дж (на 8,7 %) – и амплитуда раскачивания груза – с 0,344 до 0,339 м (на 1,5 %) (рис. 7). Поэтому с точки зрения максимизации рекуперированной энергии длина направляющей должна быть как можно меньше. В то же время длины направляющей менее 0,2–0,3 м конструктивно сложно осуществимы, а при больших значениях r_{OU} рекуперированная энергия практически не зависит от этого расстояния. Таким образом, длина направляющей кривошипного поворотного механизма колонны гидроманипулятора почти не оказывает влияния на рекуперированную энергию (влияние менее 3 % в конструктивно рациональном диапазоне) и амплитуду раскачивания груза (влияние менее 1 %).

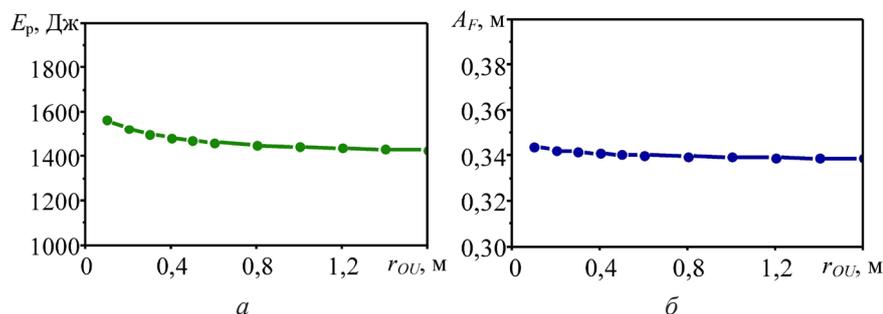


Рис. 7. Зависимость от расстояния r_{OU} (от оси колонны до шарнира направляющей): a – рекуперированной энергии E_p ; b – амплитуды раскачивания груза A_F

Fig. 7. The dependence of the the recovered energy E_p (a) and the load swing amplitude A_F (b) on the distance r_{OU} from the column axis to the guide hinge

Вторым параметром направляющей является угловое расположение шарнира по отношению к оси колонны, задаваемое в модели параметром α_n – углом между отрезком OU и направлением OY . В рамках данной серии компьютерных экспериментов изменяли угловое положение шарнира направляющей α_n от -180 до 180° с шагом 15° . Обнаружено, что угловое расположение шарнира направляющей практически не оказывает влияния на эффективность системы рекуперации. Во всем угловом диапазоне рекуперированная энергия изменяется от 1399 до 1442 Дж (на 3 %), а амплитуда раскачивания груза – от 0,3380 до 0,3393 м (на 0,4 %) (рис. 8). Таким образом, кривошипный поворотный механизм колонны гидроманипулятора от 6 гидроцилиндров обладает достаточно высокой равномерностью показателей при осевой несимметричности конструкции. Угловая неравномерность показателей эффективности рекуперации составляет не более 3 %.

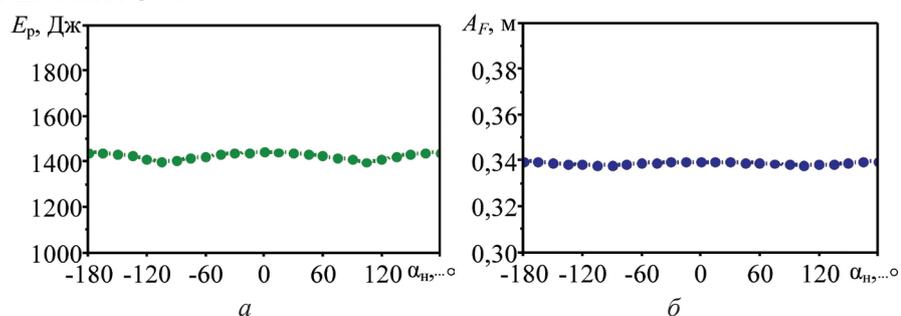


Рис. 8. Зависимость от угла α_n положения шарнира направляющей: a – рекуперированной энергии E_p ; b – амплитуды раскачивания груза A_F

Fig. 8. The dependence of the recovered energy E_p (a) and the load swing amplitude A_F (b) on the angle α_n of the guide hinge position

С помощью графиков (рис. 9) и картограмм (рис. 10) были проанализированы функции $E_p(R_C, R_S)$ и $A_F(R_C, R_S)$. Графики позволили визуально выявить тенденции влияния параметров кривошипного поворотного механизма колонны на показатели его эффективности. Картограммы оп-

тимизации дают возможность графоаналитическим методом определить показатели эффективности поворотного мезанизма колонны гидроманипулятора. На рис. 10, *a* приведен пример использования картограммы. При расстоянии от кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров $R_C = 0,10$ м (точка *A*) и смещении кривошипа относительно оси колонны $R_S = 0,20$ м (точка *B*) после проведения перпендикуляров из данных точек получаем точку их пересечения *C*, расположенную между линиями уровня $E_p = 1300$ Дж и $E_p = 1400$ Дж. Таким образом, для данной точки значение рекуперированной энергии составляет около 1380 Дж. Аналогично графоаналитическим способом определяется показатель A_F .

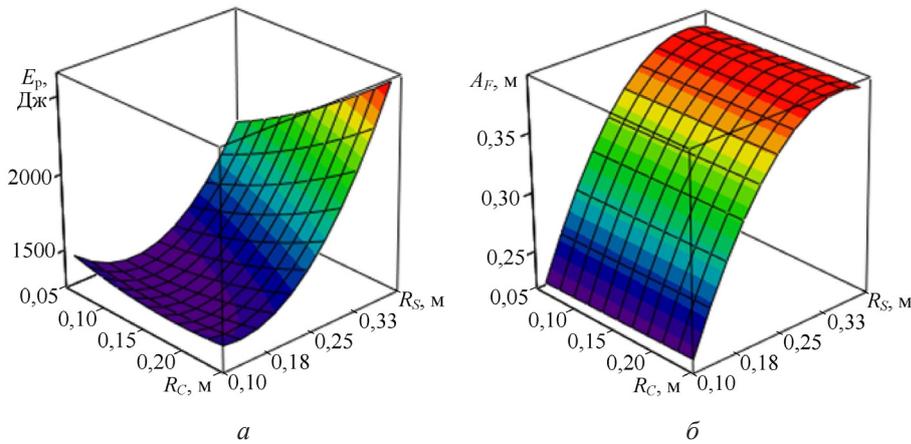


Рис. 9. Влияние расстояния подвижных осей гидроцилиндров от кривошипа R_C и смещения кривошипа R_S : *a* – на рекуперированную энергию E_p ; *б* – на амплитуду раскачивания груза A_F .

Fig. 9. The influence of the distance of the movable axes of the hydraulic cylinders from the crank R_C and the displacement of the crank R_S : *a* – on the recovered energy E_p ; *б* – on the load swing amplitude A_F .

На каждой из 2 картограмм $E_p(R_C, R_S)$ и $A_F(R_C, R_S)$ есть благоприятная область факторного пространства (R_C, R_S) , в которой соответствующий критерий имеет наилучшие значения. На картограмме $E_p(R_C, R_S)$ линия уровня $E_p = 1500$ Дж отделяет друг от друга благоприятную и неблагоприятную области (рис. 10, *a*). Основным критерием выделения благоприятных областей является возможность их пересечения и формирования общей оптимальной области (рис. 10, *з*). Для критерия A_F линией уровня, отделяющей неблагоприятную область от благоприятной, была выбрана $A_F = 0,35$ м (рис. 10, *б*). Черным цветом (рис. 10, *в, з*) выделена оптимальная область факторного пространства, которая соответствует оптимальному расстоянию от кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров. В данном случае это расстояние составляет 0,23–0,25 м. Оптимальное смещение оси кривошипа от оси колонны гидроманипулятора – 0,17–0,18 м. При этом рекуперированная энергия за 1 цикл перемещения груза – не менее 1500 Дж, а амплитуда его раскачивания – не более 0,35 м.

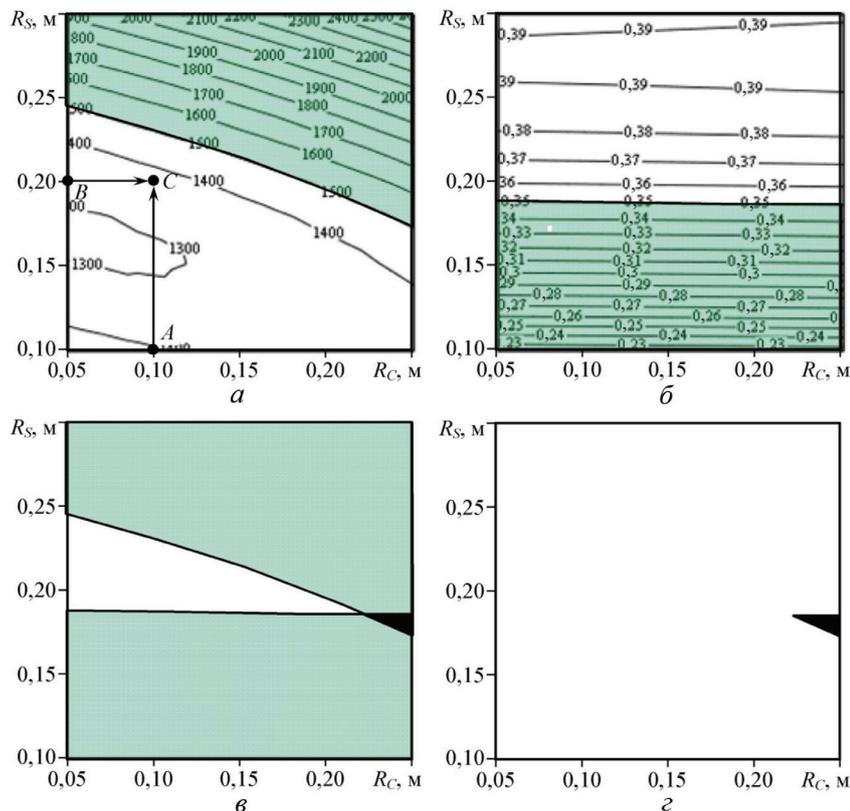


Рис. 10. Картограммы оптимизации $E_p(R_C, R_S)$ и $A_F(R_C, R_S)$: $a, б$ – благоприятных и неблагоприятных областей функций E_p и A_F ; $в, з$ – оптимальных областей функций E_p и A_F

Fig. 10. The $E_p(R_C, R_S)$ and $A_F(R_C, R_S)$ optimization cartograms: $a, б$ – favourable and unfavourable areas of E_p and A_F functions; $в, з$ – optimal areas of E_p and A_F functions

Выводы

1. При использовании гидроманипулятора, длина стрелы которого составляет 6 м, и массе перемещаемого груза (лесоматериалов) 600 кг 1 тормозной режим работы поворотного механизма колонны дает возможность накопить в пневмогидравлическом аккумуляторе 1442 Дж энергии. Этого достаточно для поднятия груза на высоту 24 см. С учетом того, что погрузочная высота подъема лесоматериалов на платформу лесовозного автомобиля составляет 2 м, предлагаемая система рекуперации позволяет направлять около 12 % энергии, накопленной при тормозном режиме поворотного механизма, на операцию подъема груза. Существующие пневмогидравлические аккумуляторы могут запасать около 100 кДж энергии. Это позволяет накопить энергию от выполнения 70 циклов поворота колонны гидроманипулятора и далее осуществить в режиме использования накопленной в пневмогидравлическом аккумуляторе энергии 8 элементарных подъемов груза 600 кг на высоту 2 м.

2. Показатели системы рекуперации поворотного механизма практически не зависят от угла окончания поворота колонны гидроманипулятора.

Во всем диапазоне изменения угла α_2 рекуперлируемая энергия изменяется на 7,1 %, а амплитуда раскачивания груза – на 1,2 %. Кривошипный поворотный механизм колонны гидроманипулятора от 6 гидроцилиндров обладает высокой равномерностью показателей при осевой несимметричности конструкции. Угловая неравномерность показателей эффективности рекуперации составляет не более 3 %.

3. Оптимальное расстояние от оси кривошипа до подвижных осей гидроцилиндров поворотного механизма гидроманипулятора составляет 0,23–0,25 м, смещение оси кривошипа относительно оси колонны манипулятора – 0,17–0,18 м. При этом рекуперлируемая энергия за 1 цикл перемещения груза равняется не менее 1500 Дж, а амплитуда его раскачивания – не более 0,35 м.

4. Массогабаритные параметры предлагаемой конструкции кривошипного поворотного механизма позволяют отказаться от поворота массивной колонны гидроманипулятора и разместить его в верхней части неподвижной колонны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 279 с.

Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. *Planning an Experiment When Searching for Optimal Conditions*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).

2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

Granovskij V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data during Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).

3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 270 с.

Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Basic, Fortran and Pascal Languages*. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 270 p. (In Russ.).

4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 203 с.

Nikonov V.O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2021. 203 p. (In Russ.).

5. Посметьев В.И., Никонов В.О. О влиянии традиционных конструкций гидроманипуляторов на эффективность лесовозного автомобильного транспорта // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2022. С. 24–31.

Posmetiev V.I., Nikonov V.O. On the Impact of Traditional Designs of Hydromanipulators on the Efficiency of Forest Road Transport. *Problems of Operation of Automobile Transport and Ways of Their Solution Based on Advanced Technologies and Scientific and Technical Solutions: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2022, pp. 24–31. (In Russ.). https://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31

6. Cheng M., Luo S., Ding R., Xu B., Zhang J. Dynamic Impact of Hydraulic Systems Using Pressure Feedback for Active Damping. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, vol. 89, part 1, pp. 454–469. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.07.043>

7. Han J., Wang F., Sun C. Trajectory Tracking Control of a Manipulator Based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 2, art. no. 1046. <https://doi.org/10.3390/app13021046>
8. Kim M., Lee S.-U., Kim S.-S. Real-Time Simulator of a Six Degree-of-Freedom Hydraulic Manipulator for Pipe-Cutting Applications. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 153371–153381. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127502>
9. Li L., Lin Z., Jiang Y., Yu C., Yao J. Valve Deadzone / Backlash Compensation for Lifting Motion Control of Hydraulic Manipulators. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 3, art. no. 57. <https://doi.org/10.3390/machines9030057>
10. Li P., Li Y. Research on the Electro-Hydraulic Servo System of Picking Manipulator. *AIP Advances*, 2023, vol. 13, iss. 1, art. no. 015312. <https://doi.org/10.1063/5.0130344>
11. Łopatka M.J., Krogul P., Rubiec A., Przybysz M. Preliminary Experimental Research on the Influence of Counterbalance Valves on the Operation of a Heavy Hydraulic Manipulator during Long-Range Straight-Line Movement. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 15, art. no. 5596. <https://doi.org/10.3390/en15155596>
12. Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. Imitating Modeling Results of a Recuperative Hydraulic Subsystem of the Timber Truck Manipulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 392, art. no. 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012038>
13. Renner A., Wind H., Sawodny O. Online Payload Estimation for Hydraulically Actuated Manipulators. *Mechatronics*, 2020, vol. 66, art. no. 102322. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102322>
14. Truong H.V.A., Trinh H.A., Ahn K.K. Truong Safety Operation of n-DOF Serial Hydraulic Manipulator in Constrained Motion with Consideration of Contact-Loss Fault. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 22, art. no. 8107. <https://doi.org/10.3390/app10228107>
15. Wei X., Ye J., Xu J., Tang Z. Adaptive Dynamic Programming-Based Cross-Scale Control of a Hydraulic-Driven Flexible Robotic Manipulator. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 5, art. no. 2890. <https://doi.org/10.3390/app13052890>
16. Xia Y., Nie Y., Chen Z., Lyu L., Hu P. Motion Control of a Hydraulic Manipulator with Adaptive Nonlinear Model Compensation and Comparative Experiments. *Machines*, 2022, vol. 10, no. 3, art. no. 214. <https://doi.org/10.3390/machines10030214>
17. Yang X., Deng W., Yao J. Neural Adaptive Dynamic Surface Asymptotic Tracking Control of Hydraulic Manipulators with Guaranteed Transient Performance. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, vol. 34, no. 10, pp. 7339–7349. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3141463>
18. Zhang X., Shi G. Dual Extended State Observer-Based Adaptive Dynamic Surface Control for a Hydraulic Manipulator with Actuator Dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, vol. 169, art. no. 104647. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104647>
19. Zheng S., Ding R., Zhang J., Xu B. Global Energy Efficiency Improvement of Redundant Hydraulic Manipulator with Dynamic Programming. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 230, art. no. 113762. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113762>
20. Zhou S., Shen C., Zhu S., Li W., Nie Y., Chen Z. A Teleoperation Framework Based on Heterogeneous Matching for Hydraulic Manipulator. *Machines*, 2022, vol. 10, no. 7, art. no. 536. <https://doi.org/10.3390/machines10070536>

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 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-159-174

Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор

С.В. Посыпанов[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

К.В. Козлов, аспирант; *ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.posypanov@narfu.ru[✉], kozlovkonstantin94@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.24 / Одобрена после рецензирования 19.05.24 / Принята к печати 24.05.24

Аннотация. В настоящее время актуальным является вопрос доставки древесного сырья из удаленных лесных массивов, где находятся его наиболее крупные объемы. Зачастую эта доставка экономически оправдана только при использовании сети средних и малых рек с применением экологически безопасных технологий. На таких реках предпочтительно для крепления лесосплавных объектов использование мобильных, в частности береговых наполняемых, опор. Приведено описание новой модификации такой опоры, отличающейся от прототипа емкостью, имеющей гибкую оболочку. Это позволяет существенно уменьшить расход материала на создание емкости, габариты опоры в транспортном положении, изготавливать опоры любого реалистичного размера. Выбор наиболее рационального варианта такой емкости предполагает научное обоснование ее параметров. Цель исследования – разработка научных основ для этого обоснования. Теоретическим путем получены аналитические формулы для определения основных геометрических характеристик поперечного сечения рассматриваемой емкости. Данные формулы полезны при научных исследованиях, однако их применение очень проблематично в рамках практических инженерных расчетов. Это объясняется зависимостью указанных характеристик в них от эллиптических интегралов и параметров, которые в инженерной практике измерить очень сложно. Выполнив вычисления по этим формулам для единичной площади поперечного сечения, получили его удельные геометрические характеристики при различных формах, т. е. при различных отношениях ширины к высоте наполняемой емкости. Результатами расчетов стали аппроксимирующие зависимости, связывающие названные характеристики с указанным отношением – коэффициентом формы. Умножение удельных характеристик на квадратный корень площади поперечного сечения дает абсолютные значения соответствующих характеристик. Итогом стали удобные для практического использования формулы, позволяющие определять ширину и высоту наполняемой емкости, ширину ее основания, периметр поперечного сечения, высоты линии нулевого давления и крайней боковой точки сечения над основанием емкости. Точности вычислений по этим и аналитическим формулам почти одинаковы. Получена формула для определения удельного натяжения гибкой оболочки емкости. Установлены характер и степень влияния коэффициента формы и длины емкости на ее другие геометрические характеристики. Разработан алгоритм обоснования ключевых параметров наполняемой емкости, имеющей гибкую оболочку, с применением описанных результатов.

© Посыпанов С.В., Козлов К.В., 2024

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

Ключевые слова: лесосплав, мобильная опора, наплавные сооружения, крепление плотов, наполняемая емкость, гибкая оболочка

Для цитирования: Посыпанов С.В., Козлов К.В. Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 159–174. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-159-174>

Original article

The Engineering Calculation of Flexible Shells of Timber-Rafting Anchors

Sergey V. Posypanov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Konstantin V. Kozlov, Postgraduate Student; ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.posypanov@narfu.ru[✉], kozlovkonstantin94@gmail.com

Received on March 4, 2024 / Approved after reviewing on May 19, 2024 / Accepted on May 24, 2024

Abstract. Currently, the issue of delivering wood raw materials from remote forest areas, where the largest volumes are located, is relevant. Often, this delivery is economically justified only when using a network of medium and small rivers with the use of environmentally friendly technologies. On such rivers, it is preferable to use mobile anchors, in particular shore fillable ones, for fixing timber-rafting objects. A description has been given of a new modification of such an anchor, which differs from the prototype by a container having a flexible shell. This allows to significantly reduce the material consumption for manufacturing the container, the dimensions of the anchor in the transport position, and to produce anchors of any realistic size. The choice of the most rational option for such a container implies the scientific justification of its parameters. The aim of the study is to develop a scientific basis for this justification. Analytical formulas have been theoretically obtained for determining the basic geometric characteristics of the cross-section of the container under consideration. These formulas are useful in scientific research, but their application is very problematic in practical engineering calculations. This is due to the dependence of the specified characteristics on elliptic integrals and parameters, which are very difficult to measure in engineering practice. Having performed calculations using these formulas for a single cross-sectional area, we have obtained its specific geometric characteristics for various shapes, i.e. for various width-to-height ratios of a container to be filled. The results of the calculations have been approximating dependencies linking the named characteristics with the specified ratio, which is called the shape factor. Multiplying the specific characteristics by the square root of the cross-sectional area gives the absolute values of the corresponding characteristics. As a result, we have obtained formulas convenient for practical use, allowing to determine the width and height of the container to be filled, the width of its base, the perimeter of the cross-section, the heights of the zero pressure line and the extreme lateral point of the cross-section above the base of the container. The accuracy of calculations based on these and analytical formulas is almost the same. A formula for determining the specific tension of a flexible container shell has been obtained. The nature and degree of influence of the shape factor and length of the container on its other geometric



characteristics have been established. An algorithm for substantiating the key parameters of a container to be filled with a flexible shell has been developed using the described results.

Keywords: timber rafting, mobile anchor, floating structures, raft holding, container to be filled, flexible shell

For citation: Posypanov S.V., Kozlov K.V. The Engineering Calculation of Flexible Shells of Timber-Rafting Anchors. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 159–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-159-174>

Введение

Основные запасы древесного сырья в крупных лесных регионах находятся на большом расстоянии от перерабатывающих центров. Во многих случаях доставка этого сырья потребителям экономически оправдана только по водным путям с задействованием развитых сетей средних и малых рек регионов. При этом предполагается использование новых, экологически безопасных технологий водного транспорта. По ряду причин, описанных в работах [5, 6, 11], на таких реках для крепления лесотранспортных единиц и наплавных сооружений рекомендуется применение легко перемещаемых мобильных опор с небольшой стоимостью, которые можно было бы монтировать и демонтировать в местах, недоступных для транспорта. Во многих случаях такие опоры более предпочтительны и на крупных реках. Соответствующая конструкция опоры рассмотрена нами в работе [11], посвященной главным образом обоснованию держащей силы опоры. В число основных составляющих этой опоры входят наполняемые емкости, роль которых играют так называемые еврокубы [4, 20]. Их приобретают в готовом виде, большая доработка не требуется. В этом состоит преимущество таких емкостей. Однако альтернативой здесь во многих случаях являются наполняемые емкости с гибкой оболочкой. Опоры с подобной емкостью более компактны в разобранном состоянии, для их производства нужно гораздо меньшее количество материала при одинаковых значениях держащей силы. Они могут быть изготовлены любого реалистичного размера без привязки к размерам еврокубов.

На рис. 1 приведено схематичное изображение опоры с наполняемой емкостью, имеющей гибкую оболочку. Несущее основание опоры состоит из пластин, к которым снизу прикреплены грунтозацепы. Пластины основания связаны между собой соединительными звеньями. Возможно соединение с помощью продольных стальных канатов, к которым крепятся секции грунтозацепов, по аналогии с предыдущей конструкцией, описанной в статье [11]. К пластине основания, расположенной со стороны водоема, с помощью такелажной скобы присоединяют крепежный канат, связывающий опору с удерживаемым наплавным объектом. Вертикальная нагрузка на пластины основания обеспечивается гибкой емкостью, которая заполняется водой. Наполняемая емкость может быть изготовлена, например, из поливинилхлорида (ПВХ) – UNISOL [13]. Наполнение емкости и слив воды из нее осуществляются через кран со стороны водоема. С боковых сторон к пластинам основания крепят через соединительные звенья тонкостенные гибкие листы защитного кожуха, которые могут быть выполнены, в частности, из оцинкованной стали. Из этого же материала изготовлены более узкие ленты межсекционных кожухов, охватывающие гибкую

емкость не только по бокам, но и снизу. После наполнения емкости плотное прилегание основных и межсекционных защитных кожухов к ней обеспечивается с помощью натяжных устройств, установленных сверху. При большой высоте опоры натяжные устройства могут быть расположены у пластин основания. С торцевых сторон опоры на пластинах основания шарнирно закреплены передняя и задняя пластины (на рис. 1, *a* шарниры не видны, находятся под кожухом). На передней пластине сделана прорезь для крана. Задняя пластина опирается на удлиненную часть задней пластины основания подкосным упором. Задняя и передняя пластины в верхней части соединяются стальным канатом, оснащенный натяжным устройством.

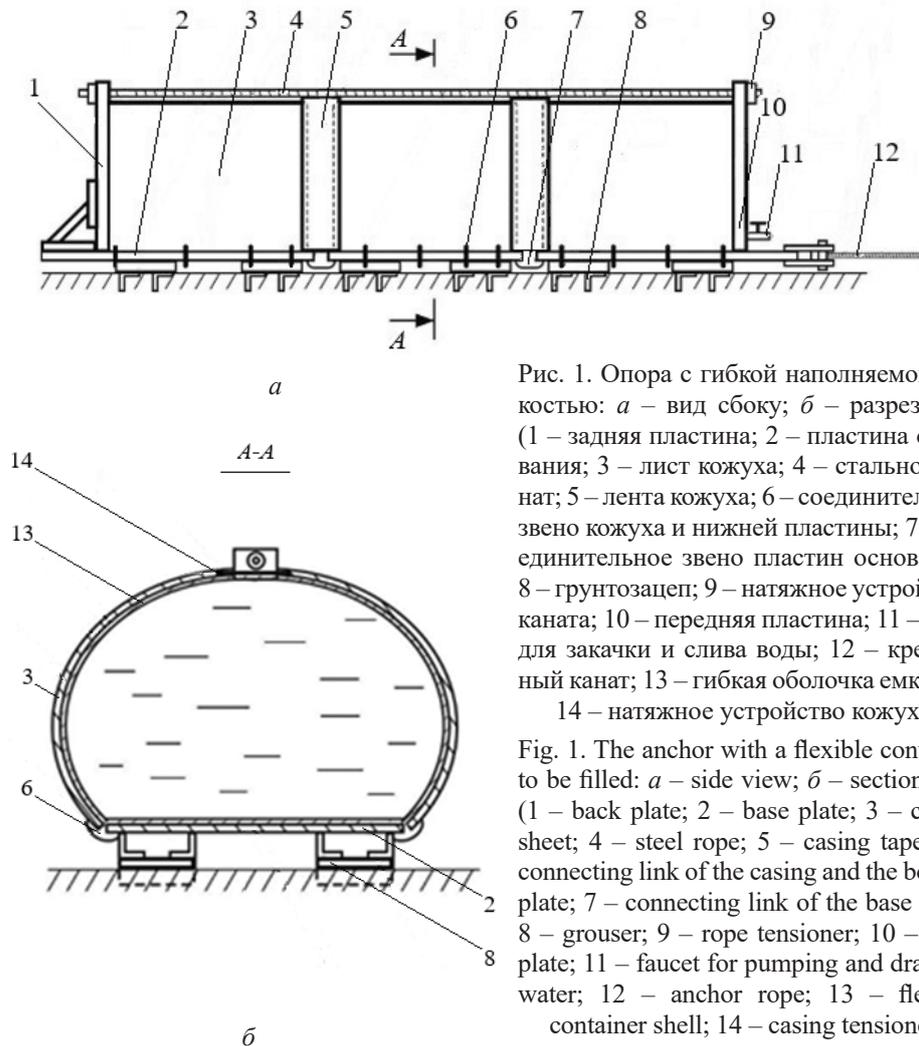


Рис. 1. Опора с гибкой наполняемой емкостью: *a* – вид сбоку; *б* – разрез *A–A* (1 – задняя пластина; 2 – пластина основания; 3 – лист кожуха; 4 – стальной канат; 5 – лента кожуха; 6 – соединительное звено кожуха и нижней пластины; 7 – соединительное звено пластин основания; 8 – грунтозацеп; 9 – натяжное устройство каната; 10 – передняя пластина; 11 – кран для закачки и слива воды; 12 – крепежный канат; 13 – гибкая оболочка емкости; 14 – натяжное устройство кожуха)

Fig. 1. The anchor with a flexible container to be filled: *a* – side view; *б* – section *A–A* (1 – back plate; 2 – base plate; 3 – casing sheet; 4 – steel rope; 5 – casing tape; 6 – connecting link of the casing and the bottom plate; 7 – connecting link of the base plate; 8 – grouser; 9 – rope tensioner; 10 – front plate; 11 – faucet for pumping and draining water; 12 – anchor rope; 13 – flexible container shell; 14 – casing tensioner)

Секционная конструкция обеспечивает лучшее прилегание основания опоры к поверхности грунта, в случае если площадка под ней недостаточно ровная. Кроме того, описанную опору можно разобрать на более мелкие составляющие, что особенно важно, когда к месту установки опоры затруднен или невозможен подъезд транспорта и составляющие необходимо переносить.

Перед установкой опоры на территории, где предполагается ее размещение, разравнивается площадка. На площадке монтируется основание опоры в проектное положение. К листам основания присоединяют листы кожуха, подкладывают ленты межсекционных кожухов. На основании опоры устанавливают пустую гибкую емкость. К крайним листам основания посредством шарниров присоединяют заднюю и переднюю пластины. Их приводят в вертикальное положение и с помощью стального каната соединяют между собой. Кран емкости вставляют в прорезь передней пластины. Посредством натяжных устройств соединяют листы, а затем ленты кожухов противоположных сторон. При этом натяжные устройства должны быть в раздвинутом, максимально ослабленном состоянии. С помощью переносного насоса закачивают через кран воду в гибкую емкость до достижения ею проектной формы. После этого с помощью натяжных устройств убирают зазоры между кожухами и заполненной емкостью. При необходимости дополнительно утягивают стальной канат, соединяющий переднюю и заднюю пластины.

После того как необходимость опоры на данном участке отпадет, ее можно разобрать и перевезти на другое место. При этом сливают воду через кран, разборку опоры осуществляют в порядке, обратном порядку сборки.

Основное принципиальное отличие данной конструкции от предыдущей заключается в присутствии наполняемой емкости. Для изготовления наиболее рационального варианта такой емкости необходимо научное обоснование ее параметров. Изучение литературы о береговых опорах [1, 2, 8–10, 12], в т. ч. обобщающего характера [10, 12], показало, что нужная для этого информация отсутствует. Для ее получения требуются дополнительные исследования.

Цель – разработка научных основ для обоснования параметров наполняемой емкости с гибкой оболочкой для мобильной береговой опоры.

Объект – наполняемая емкость с гибкой оболочкой для береговой опоры.
Метод – теоретический.

Результаты исследования и их обсуждение

При закачке воды в гибкую емкость она меняет форму поперечного сечения (рис. 2). При малом количестве воды сечение будет приплюснутым, т. е. низким и широким в случае отсутствия кожуха. С увеличением количества воды в емкости высота ее сечения будет возрастать, а ширина уменьшаться. Также уменьшится и ширина опорной поверхности. Вместе с тем увеличится напор, под которым необходимо подавать воду в емкость, а также натяжение гибкой оболочки емкости. Напор воды в емкости наглядно демонстрируется с помощью воображаемого пьезометра, подключенного к ней.

Геометрической фигурой, имеющей наибольшую площадь сечения при определенном периметре, является круг [7]. То есть именно при круглом сечении емкость будет характеризоваться наибольшим объемом. Ширина основания у гибкой емкости в данном случае равна 0. Для достижения этого условия потребуется бесконечно большое давление, в гибкой оболочке появится огромное натяжение. При нулевой ширине основания возникает вопрос о поперечной устойчивости опоры. Очевидно, что крайние варианты в данном случае не применимы. Обоснование параметров емкости должно выполняться с учетом необходимости обеспечения приемлемого давления в ней, натяжения в гибкой

оболочке, хорошего наполнения водой с учетом фактора поперечной устойчивости опоры.

Поперечное сечение оболочки наполняемой емкости (рис. 2) можно рассматривать как гибкую нить. Форма этой нити описывается 2 параметрическими уравнениями. Первое уравнение для координаты x в данном случае имеет вид

$$x = 0,5H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - F(\Theta, \varphi) - 2(E(\Theta) - E(\Theta, \varphi))), \quad (1)$$

где Θ – угол, определяющий форму рассматриваемой линии, ...°; $K(\Theta)$ и $F(\Theta, \varphi)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 1-го рода соответственно; $E(\Theta)$ и $E(\Theta, \varphi)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 2-го рода соответственно [15].

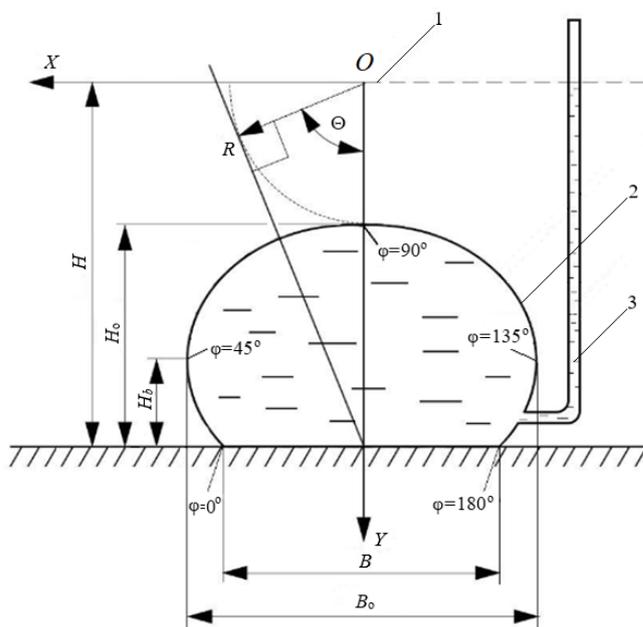


Рис. 2. Расчетная схема гибкой оболочки: 1 – линия нулевого давления; 2 – гибкая оболочка; 3 – воображаемый пьезометр (H – высота расположения линии нулевого давления над основанием емкости, м; H_0 – высота емкости, м; H_b – высота расположения крайней боковой образующей емкости, м; B_0 – ширина емкости, м; B – ширина основания емкости, м; Θ – угол, определяющий форму кривой, ...°; φ – параметр кривой, ...° [15])

Fig. 2. The design scheme of a flexible shell: 1 – zero pressure line; 2 – flexible shell; 3 – imaginary piezometer (H – height of the zero pressure line above the base of the container, m; H_0 – container height, m; H_b – height of the extreme lateral forming the container, m; B_0 – width of the container, m; B – width of the container base, m; Θ – angle determining the shape of the curve, ...°; φ – curve parameter, ...° [15])

Высота H функционально связана с размером рассматриваемой замкнутой линии (рис. 2). Величина Θ – угол треугольника, примыкающий к началу координат. Указанный треугольник образован фрагментом вертикальной оси

оболочки, фрагментом касательной, проведенной из середины сечения основания оболочки к окружности с центром в начале координат и радиусом, равным расстоянию от начала координат до верхней точки оболочки. Третьей стороной является отрезок, расположенный под прямым углом к касательной из начала координат. Как было отмечено, угол Θ определяет форму поперечного сечения наполняемой гибкой емкости. Чем ближе угол к 90° , тем более приплюснутой является указанная форма. Чем меньше угол, тем больше высота поперечного сечения и меньше ширина при постоянном периметре. Параметр φ изменяется вдоль поперечного сечения оболочки. Наиболее значимые его величины: 0° , 45° , 90° , 135° , 180° – указаны на рис. 2.

При $\varphi = 45^\circ$, используя формулу (1), можем получить координату x крайней боковой точки поперечного сечения емкости. Так как сечение симметрично относительно оси OY , ширина емкости будет равна удвоенному значению указанной координаты. То есть для ширины емкости справедливо выражение

$$B_0 = H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - F(\Theta, 45^\circ) - 2(E(\Theta) - E(\Theta, 45^\circ))). \quad (2)$$

Используя ту же формулу с учетом упомянутой симметричности при $\varphi = 0^\circ$, можем записать соответствующее выражение для ширины основания емкости:

$$B = H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - F(\Theta, 0^\circ) - 2(E(\Theta) - E(\Theta, 0^\circ))).$$

Так как интегралы $F(\Theta, 0^\circ)$, $E(\Theta, 0^\circ)$ равны 0, привели полученное выражение к более простому виду:

$$B = H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - 2E(\Theta))). \quad (3)$$

Второе параметрическое уравнение для рассматриваемой линии (рис. 2) имеет вид

$$y = H\sqrt{1 - \sin^2\Theta \sin^2\varphi}. \quad (4)$$

Координата y при $\varphi = 90^\circ$ соответствует верхней точке поперечного сечения емкости, при $\varphi = 0^\circ$ – нижней точке сечения емкости. Разность этих координат позволяет определить высоту емкости. Выполнив соответствующую подстановку и преобразования, получили формулу для определения высоты гибкой емкости:

$$H_0 = H(1 - \cos\Theta). \quad (5)$$

Разница координат y при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$ дает высоту расположения крайней боковой образующей емкости. Соответствующее выражение, полученное после преобразований:

$$H_b = H\left(1 - \sqrt{1 - 0,5\sin^2\Theta}\right). \quad (6)$$

Также с использованием параметрических формул (1), (4) и известных приемов [7] по определению длин дуг и площадей сегментов плоских криволинейных геометрических фигур получили зависимости для периметра сечения гибкой наполняемой емкости

$$L = 2H(K(\Theta) - E(\Theta)) \quad (7)$$

и его площади

$$\Omega = H^2((2 - \sin^2\Theta)K(\Theta) - 2E(\Theta)). \quad (8)$$

Приведенные формулы позволяют определять основные геометрические параметры поперечного сечения гибкой наполняемой емкости. Однако применение их при решении практических задач проблематично. Это связано с тем, что искомые геометрические характеристики сечения определяются с помощью указанных формул по высоте H и углу Θ , измерение которых (рис. 2) в практических задачах нереально. Необходимость расчета эллиптических интегралов вносит дополнительные сложности в вычисления, создает проблемы при выражении одного геометрического параметра через другие. С учетом этого было принято решение, используя приведенные формулы, выполнить требуемые вычисления, и их результаты использовать для получения удобных в инженерной деятельности, достаточно простых и точных аппроксимирующих зависимостей, позволяющих устанавливать названные геометрические параметры на практике.

По аналогии с лесосплавными пучками [10] в данном случае ввели понятие коэффициента формы поперечного сечения емкости C . Этот коэффициент находится как отношение ширины емкости к ее высоте: он равен отношению правой части формулы (2) к соответствующей части формулы (5). После сокращения H с учетом того, что 45° – это постоянная величина, становится очевидным, что коэффициент формы C зависит только от угла Θ . Между ними существует однозначная связь, т. е. для каждого значения Θ есть определенное значение коэффициента формы C и наоборот. И та и другая величина определяют форму поперечного сечения емкости. Если при конкретном C менять величину площади сечения, то все его линейные размеры будут изменяться с сохранением пропорций. Учитывая это, упомянутые вычисления выполнили для единичной площади поперечного сечения емкости.

В случае равенства поперечного сечения емкости 1 формула (8) может быть приведена к виду

$$H = \frac{1}{\sqrt{(2 - \sin^2 \Theta) K(\Theta) - 2E(\Theta)}}.$$

Задавая различные значения угла Θ , в диапазоне от 45° до 87° , вычисляли соответствующие значения высоты H . Эллиптические интегралы здесь и далее определяли по таблицам [17]. При каждом принятом значении угла Θ и высоте H вычисляли по формулам (2), (3), (5) – (7) ширину наполняемой емкости, ширину ее основания, высоту, высоту расположения крайней боковой точки поперечного сечения емкости, периметр указанного поперечного сечения L . Путем деления ширины емкости на ее высоту находили коэффициент формы поперечного сечения емкости. Результаты расчетов приведены в таблице.

Результаты расчетов основных геометрических характеристик поперечного сечения наполняемой емкости с гибкой оболочкой при единичной площади поперечного сечения емкости

The results of calculations of the basic geometric characteristics of the cross-section of a container to be filled with a flexible shell for a single cross-sectional area of the container

Θ, \dots°	$H, \text{ м}$	$B_o, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$H_o, \text{ м}$	$H_b, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	C
45	3,539	1,193	0,283	1,037	0,474	3,564	1,151
60	1,912	1,273	0,523	0,956	0,400	3,616	1,332
65	1,594	1,316	0,627	0,920	0,370	3,651	1,430
70	1,335	1,372	0,749	0,879	0,337	3,702	1,561
75	1,118	1,447	0,895	0,829	0,301	3,782	1,747
80	0,926	1,557	1,080	0,765	0,261	3,912	2,034
83	0,816	1,653	1,226	0,717	0,235	4,039	2,308
85	0,740	1,743	1,352	0,675	0,215	4,165	2,580
86	0,699	1,801	1,430	0,651	0,204	4,250	2,768
87	0,655	1,874	1,526	0,621	0,191	4,362	3,017

Поскольку вычисленные геометрические параметры приходятся на 1 м² площади, их можно назвать удельными характеристиками поперечного сечения емкости. Используя результаты вычислений, получили ряд аппроксимирующих зависимостей для этих удельных характеристик. Известно, что зависимость площади плоской фигуры от ее линейных геометрических характеристик квадратичная. Соответственно, для вычисления абсолютных значений линейных характеристик сечения емкости необходимо в перечисленные зависимости добавить множитель $\sqrt{\Omega}$. В результате получили нижеприведенные формулы:

ширина наполняемой емкости

$$B_o = (-0,0477C^2 + 0,563C + 0,609)\sqrt{\Omega}, \quad (9)$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 1$ [16];

ширина основания емкости

$$B = (-0,236C^2 + 1,615C + 1,221)\sqrt{\Omega}, \quad (10)$$

$R^2 = 0,997$;

высота емкости

$$H_o = (0,0846C^2 + 0,564C + 1,561)\sqrt{\Omega}, \quad (11)$$

$R^2 = 0,997$;

высота крайней боковой точки поперечного сечения емкости

$$H_b = (0,0892C^2 - 0,509C + 0,924)\sqrt{\Omega}, \quad (12)$$

$R^2 = 0,990$;

периметр поперечного сечения гибкой оболочки

$$L = (0,439C + 3,029)\sqrt{\Omega}, \quad (13)$$

$R^2 = 0,998$;

высота расположения линии нулевого давления над основанием емкости

$$H = (1,988C^4 - 18,222C^3 + 61,668C^2 - 91,655C + 51,556)\sqrt{\Omega}, \quad (14)$$

$R^2 = 0,990$.

Достоверность аппроксимации формул (9)–(14) не менее 0,99, т. е. точность расчетов по ним практически не отличается от точности расчетов по приведенным аналитическим формулам. При этом выражения (9)–(14) лишены ранее указанных недостатков.

По величине B принимается ширина пластин основания, по периметру поперечного сечения емкости – необходимая ширина полосы материала, из которого предполагается изготовление оболочки. Также эти величины нужны при определении размеров кожуха. Ширина емкости, ширина ее основания, ее высота, а также высота расположения крайней боковой точки поперечного сечения требуются при проектировании передней и задней пластин. Высота расположения линии нулевого давления – при вычислении усилия натяжения гибкой оболочки и определении усилий, действующих на переднюю и заднюю пластины емкости, а также при подборе насоса.

При обосновании сил натяжения в гибкой оболочке воспользуемся расчетной схемой, приведенной на рис. 3. Сила натяжения в гибких связях направлена по касательной в рассматриваемой точке. Силы трения между поверхностью и жидкостью возникают только при движении их относительно друг друга [3, 18]. В данном случае такое движение отсутствует, соответственно, отсутствует и трение между жидкостью и гибкой оболочкой. Поэтому сила натяжения в гибкой оболочке будет одинакова во всех точках ее поперечного сечения в отличие, например, от случая заполнения оболочки сыпучей средой [14, 19].

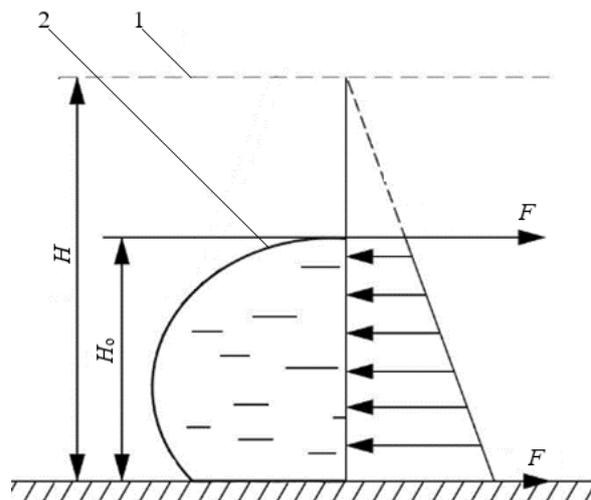


Рис. 3. Схема определения усилий в гибкой оболочке: 1 – линия нулевого давления; 2 – гибкая оболочка
Fig. 3. The scheme for determining the forces in a flexible shell: 1 – zero pressure line; 2 – flexible shell

Рассмотрим наиболее высокое вертикальное сечение емкости в виде продольной плоскости, проходящей по оси ее симметрии. При этом будем оперировать удельными усилиями, т. е. усилиями, действующими на 1 пог. м длины

емкости. На рис. 3 изображена эпюра горизонтального гидростатического давления в указанном сечении. Согласно схеме и изложенным выше положениям горизонтальная составляющая равнодействующей гидростатического давления на гибкую оболочку уравнивается 2 горизонтальными одинаковыми усилиями натяжения оболочки в ее верхней и нижней частях. С учетом этого получили формулу для определения удельного натяжения гибкой оболочки (Н/м)

$$F = 0,5(H - 0,5H_0)H_0\rho g, \quad (15)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

По полученной величине и допустимым значениям удельного разрывного усилия подбирают материал оболочки. При этом имеется в виду, что кожух предназначен только для защиты от внешних повреждений, хотя при соответствующем прижиме с помощью натяжных устройств он может воспринимать часть нагрузки. При использовании ПВХ – UNISOL [13] следует ориентироваться на удельное разрывное усилие в диапазоне 40–70 кН/м. Масса этого материала находится, соответственно, в диапазоне 0,63–0,90 кг/м².

Длину гибкой оболочки необходимо предусмотреть превышающей длину опоры. Торцевые поверхности оболочки в рабочем положении примыкают к торцевым пластинам, являются плоскими. При этом силы гидростатического давления на торцевые поверхности емкости будут восприниматься передней и задней пластинами. Определение силы гидростатического давления на плоские вертикальные поверхности при имеющихся данных – распространенная в инженерной практике задача [3, 18], как и последующие прочностные расчеты, связанные с передней и задней пластинами. Поэтому такие вопросы мы здесь не рассматриваем.

Предполагается следующий алгоритм определения параметров изучаемой наполняемой емкости. В зависимости от требуемой держашей силы опоры устанавливается необходимая вертикальная нагрузка, создаваемая наполняемой емкостью и передаваемая через пластины основания на грунтозацепы [11]. По вертикальной нагрузке определяется объем воды (м³), который должна вмещать наполняемая емкость:

$$V = \frac{P}{\rho g},$$

где P – требуемая вертикальная нагрузка, Н.

Делением полученного объема на длину емкости вычисляют площадь поперечного сечения емкости Ω в заполненном до проектного положения состоянии. Длину емкости принимают конструктивно в наиболее реалистичном диапазоне 3–5 м. Далее, задавая различные значения коэффициента формы C поперечного сечения емкости, определяют основные геометрические параметры сечения по формулам (9)–(13). Используя зависимость (14), вычисляют высоту расположения линии нулевого давления над основанием емкости. С помощью выражения (15) определяют удельное натяжение гибкой оболочки. Расчет рекомендуется выполнять с применением электронных таблиц. Это не только упрощает расчеты, но и позволяет наглядно представить результаты по многим вариантам и выбрать наиболее приемлемый с учетом различных факторов. Поиск наилучшего варианта предполагает наряду с варьированием коэффициента C варьирование и длины емкости. Указанный поиск можно вести более эффективно, имея представление о характере и степени влияния в

первую очередь коэффициента C на рассматриваемые характеристики наполняемой емкости. Это представление дают графики, построенные для единичной площади поперечного сечения емкости (рис. 4, 5). Следует иметь в виду, что с изменением этой площади относительные показатели характера и степени обобщенного влияния не меняются.

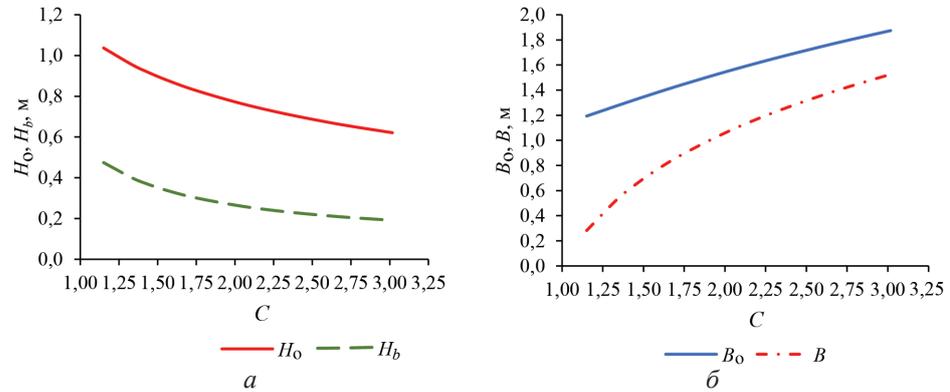


Рис. 4. Зависимости линейных характеристик поперечного сечения емкости от коэффициента формы C при площади $\Omega = 1 \text{ м}^2$: a – для вертикальных размеров; b – для горизонтальных размеров

Fig. 4. The dependencies of the linear characteristics of the cross-section of the container on the shape factor C for the area of $\Omega = 1 \text{ м}^2$: a – for vertical dimensions; b – for horizontal dimensions

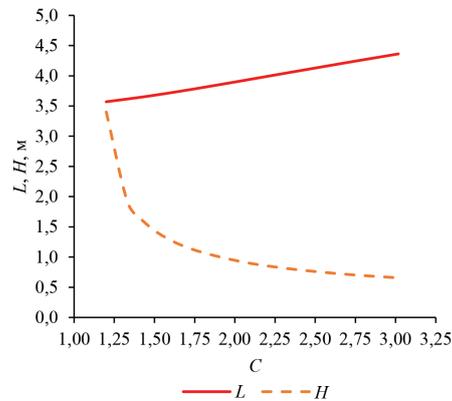


Рис. 5. Зависимости периметра поперечного сечения емкости L и высоты расположения линии нулевого давления H от коэффициента формы C при площади $\Omega = 1 \text{ м}^2$

Fig. 5. The dependencies of the perimeter of the cross-section of the container L and the height of the zero pressure line H on the shape factor C for the area of $\Omega = 1 \text{ м}^2$

Анализируя указанные графики, установили, что принимать коэффициент формы меньше 1,5 нецелесообразно, поскольку ширина основания при единичной площади и указанном значении C будет около 0,7 м, ширина емкости – 1,4 м, ее высота – 0,9 м (рис. 4). Поперечная устойчивость емкости при таких размерах поперечного сечения может быть недостаточной. При уменьшении коэффициента формы соотношение указанных размеров становится в этом плане еще менее благоприятным. Кроме того, с уменьшением C от указанного значения наблюдается более интенсивное увеличение высоты H (рис. 5), а значит, и давления жидкости в емкости и, соответственно, натяжения оболочки и гидростатической нагрузки на торцевые пластины емкости.

С ростом коэффициента формы увеличивается ширина основания емкости, а следовательно, и необходимая ширина соответствующих пластин, повы-

шается также периметр оболочки, т. е. расход материала на нее, но уменьшается величина H и, соответственно, давление в емкости, натяжение в оболочке и сила давления на торцевые пластины. Согласно рис. 5, интенсивность уменьшения H при коэффициенте C больше 2,0 значительно снижается. С учетом изложенного рекомендуемый диапазон указанного коэффициента на начальном этапе проектирования – от 1,5 до 2,0.

Изменение коэффициента C от 1,5 до 2,0 приводит к увеличению ширины пластин основания примерно на 50 %, а периметра сечения оболочки – на 8 %, уменьшению величины H и, соответственно, давления в емкости на 47 %, сил натяжения в оболочке – почти в 2 раза с учетом снижения высоты емкости на 18 %.

Увеличение или уменьшение длины емкости в n раз при сохранении объема связано с уменьшением или увеличением в такое же количество раз площади ее поперечного сечения. При этом линейные размеры сечения необходимо будет изменить в $n^{0,5}$ раз.

Варьируя коэффициент формы и длину емкости в рекомендованных диапазонах, используя приведенную информацию, принимают наиболее приемлемый в данном случае вариант с учетом иных факторов – к ним могут быть отнесены нормативные размеры и другие дискретные характеристики материалов, из которых предполагается изготавливать емкость и элементы опоры, условия предполагаемых мест ее эксплуатации и т. д.

Не исключается в итоге выход за пределы рекомендованных диапазонов факторов. Например, при проектировании особо крупных опор допустимо принятие коэффициентов формы больше 2,0 с целью уменьшения натяжения гибкой оболочки или, наоборот, меньше 1,5 при проектировании малых опор. Во втором случае вопрос поперечной устойчивости может быть решен путем небольшой доработки конструкции. Для этого достаточно к листу основания снизу прикрепить поперечную балку, концы которой соединить гибкими растяжками с верхней частью емкости.

Анализ показал, что при реалистичных параметрах наполняемой емкости и размещении ее непосредственно у водоема для закачки воды могут быть использованы низконапорные насосы. Тем не менее при выборе насоса полученная в результате расчетов величина H будет полезной. В тех случаях, когда опору потребуется разместить на высоком коренном берегу, не исключена потребность в средненапорном насосе.

Взяв за базовый вариант подобную опору с наполняемыми емкостями из еврокубов, имеющую размеры несущего основания 3×1 м [11], установили, что площадь поперечного сечения опоры, рассматриваемой в этой статье, при аналогичных размерах несущего основания и коэффициенте формы наполняемой емкости 1,5 будет в 2,3 раза больше, во столько же раз будут выше масса закачиваемой воды, сила тяжести, передаваемая на гибкое основание и, соответственно, держащая сила опоры. Если количество еврокубов у базового варианта увеличить с 3 до 6, примерно выравняв держащую силу сопоставляемых опор, и определить суммарные площади поверхностей емкостей, то выяснится, что в варианте с еврокубами она больше в 1,8 раза. При этом суммарная толщина гибкой оболочки и кожура существенно меньше толщины стенки еврокуба.

Предполагаемые габаритные размеры рассматриваемых опор: длина – 3–5 м; высота – 0,9–1,8 м; ширина – 1,4–3,6 м; удерживающая сила – 30–200 кН.

Выводы

1. Разработали конструкцию новой модификации мобильной береговой опоры с наполняемой емкостью, имеющей гибкую оболочку. Преимуществами данной конструкции являются сниженный расход материала на изготовление емкости, уменьшение габаритов опоры в транспортном положении, возможность изготовления опоры любого реалистичного размера без привязки к фиксированным размерам еврокубов.

2. Теоретическим путем получили аналитические формулы для определения основных характеристик поперечного сечения наполняемой емкости с гибкой оболочкой. Зависимости оказались полезными при научных исследованиях, однако очень неудобными при практических расчетах.

3. Выполнив необходимые вычисления по указанным аналитическим формулам, получили результаты, используя которые подобрали соответствующие аппроксимирующие зависимости аналогичной точности, более удобные в инженерных расчетах.

4. Установили характер и степень влияния коэффициента формы поперечного сечения емкости при его заданной площади, а также длины емкости на другие геометрические, а следовательно, и прочностные характеристики. На основе полученной информации рекомендовали на начальном этапе проектирования коэффициент формы поперечного сечения принимать равным от 1,5 до 2,0. Рекомендуемая длина емкости – от 3 до 5 м.

5. Разработали алгоритм обоснования основных параметров наполняемой емкости с гибкой оболочкой с применением полученных результатов, включая предложенную формулу для определения удельного натяжения гибкой оболочки. Дали соответствующие пояснения и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 1523508 СССР, МПК В65G 69/20 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 4343248/31-11: заявл. 03.11.1987: опубл. 23.11.1989 / В.Г. Таскаев.

Taskaev V.G. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. USSR, no. SU 1523508, 1989. (In Russ.).

2. А. с. 1548321 СССР, МПК E02B 3/06 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 4360415/30-15: заявл. 06.01.1988: опубл. 07.03.1990 / В.Г. Таскаев, Г.Г. Чешков.

Taskaev V.G., Cheshkov G.G. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. USSR, no. SU 1548321, 1990. (In Russ.).

3. Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1982. 455 с.

Vojtkunskij Ya.I., Fadeev Yu.I., Fedyaevskij K.K. *Hydromechanics*: 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 455 p. (In Russ.).

4. Еврокуб // Сайт «Завода удачных теплиц». Режим доступа: <https://tepli4ki.ru/> (дата обращения: 17.01.22).

Eurocube. *The Website of "The Successful Greenhouse Plant"*. (In Russ.).

5. Козлов К.В., Беляев Н.С., Посыпанов С.В. Анализ крепления лесосплавных объектов при коротких сроках навигации // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 36. С. 1543–1546.

Kozlov K.V., Belyaev N.S., Posypanov S.V. Analysis of Anchoring of Timber-Rafting Facilities for Short Navigation Periods. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, no. 36, pp. 1543–1546. (In Russ.).

6. Козлов К.В., Посыпанов С.В. Использование мобильных наполняемых опор для крепления наплавных объектов на лесосплаве // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 541–545.

Kozlov K.V., Posypanov S.V. The Use of Mobile Fillable Anchors for Holding the Floating Objects in Timber Rafting. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2020, no. 23, pp. 541–545. (In Russ.).

7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. 4-е изд. М.: Наука, 1977. 831 с.

Korn G., Korn T. *Handbook of Mathematics for Researchers and Engineers*: 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1977. 831 p. (In Russ.).

8. Патент 119757 РФ, МПК E02B 1/00 (2006.01), E02B 3/00 (2006.01), E01D 19/00 (2006.01). Анкерная опора для берегового крепления наплавных сооружений: № 2012116665/13: заявл. 24.04.2012: опубл. 27.08.2012 / Г.Я. Суков, А.Н. Вихарев, С.Е. Лихачев, А.А. Емельянов.

Sukov G.Ya., Vikharev A.N., Likhachev S.E., Emel'yanov A.A. *The Anchor for Holding the Floating Structures to the Shore*. Patent RF no. RU 119757, 2012. (In Russ.).

9. Патент 2313632 РФ, МПК E02B 3/00 (2006.01), B65G 69/20 (2006.01), E02B 15/00 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 2006100940/11: заявл. 10.01.2006: опубл. 27.12.2007 / Г.Я. Суков, А.Н. Вихарев.

Sukov G.Ya., Vikharev A.N. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. Patent RF no. RU 2313632, 2007. (In Russ.).

10. Патыкин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.

Patyakin V.I., Dmitriev Yu.Ya., Zaytsev A.A. *Water Log Movement*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 336 p. (In Russ.).

11. Посыпанов С.В., Козлов К.В. Теоретическое обоснование держащей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 141–151.

Posypanov S.V., Kozlov K.V. Theoretical Justification of the Holding Power of a Mobile Anchor for Holding Timber-Rafting Objects. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 141–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-141-151>

12. Таскаев В.Г. Береговые опоры лесосплава. Архангельск: АЛТИ, 1991. 84 с.

Taskaev V.G. *Shore Timber Rafting Anchors*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forestry Engineering Institute Publ., 1991. 84 p. (In Russ.).

13. Ткани Hanwha // Торговый дом «Технический Текстиль»: сайт. Режим доступа: https://ttex.ru/catalog/tkani_hanwha_koreya/ (дата обращения: 17.01.24).

Hanwha Fabrics. *The Website of the Trading House "Technical Textile"*. (In Russ.).

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Mechanics of Soils*: 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

15. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists*: 2nd ed. Heidelberg, Berlin, New York, Springer-Verlag, 1971, vol. 67. 360 p.
16. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*: 3rd ed. London, SAGE Publications, 2009. 821 p.
17. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Table of Integrals, Series and Products*: 6th ed. San Diego, Academic Press, 2000. 46 p.
18. Kleinstreuer C. *Modern Fluid Dynamics*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2010. 620 p.
19. Verruijt A. *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, 2012. 331 p.
20. Yam K.L. *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*. John Wiley & Sons, 2009. 1376 p. <https://doi.org/10.1002/9780470541395>

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 674.817

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-175-187

Конструкционные плиты из гидродинамически активированной коры сосны (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ

В.Д. Эскин[✉], аспирант; ResearcherID: [ABF-3729-2020](https://orcid.org/0000-0002-5221-9018),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5221-9018>

В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

А.И. Криворотова, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABF-3696-2020](https://orcid.org/0000-0003-3463-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3463-3837>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vladislaweskin@gmail.com[✉], vnermolin@yandex.ru, tkmkai@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.24 / Одобрена после рецензирования 26.06.24 / Принята к печати 28.06.24

Аннотация. Кора является крупнотоннажным отходом для целого ряда технологий деревопереработки, требующим эффективного применения. Одно из перспективных направлений использования коры – производство плит без синтетических связующих. Проведены исследования по получению конструкционных плит из коры сосны *Pinus sylvestris* без связующего. Способ основан на предварительной гидродинамической активации коры. Исходная кора проходит первичное измельчение в молотковой дробилке. После этого смешивается с водой в концентрации 6 %. Затем производится активация полученной массы в роторно-пульсационном диспергаторе, из нее формируется ковер, проводится холодная подпрессовка, а потом горячее прессование. В качестве критерия оценки степени активации массы принята водоудерживающая способность. Определены зависимости: между продолжительностью обработки и водоудерживающей способностью; прочностью плит и водоудерживающей способностью. Последнее позволило получить оптимальное значение показателя водоудерживающей способности – 290 %. Для разработки наилучшего режима горячего прессования был проведен многофакторный эксперимент. В результате найден оптимальный режим прессования плит: температура – 190 °С; удельная продолжительность процесса – 2,8 мин/мм; давление прессования – 4,4 МПа. Свойства плит, изготовленных при данном режиме: плотность – 980 кг/м³; предел прочности при изгибе – 24 МПа; разбухание при вымачивании в течение 24 ч – 5 %; водопоглощение – 9 %. Плиты после вымачивания и последующего высушивания до влажности 5 % сохраняют 75 % от прочности до вымачивания. При этом геометрические размеры возвращаются к первоначальным. Полученные плиты могут применяться в качестве листового отделочного и конструкционного материала, в строительстве – в качестве подложки напольных и кровельных материалов, при производстве мебели, особенно в тяжелых температурно-влажностных условиях. Проведенные исследования показывают возможность изготовления плитных материалов с высокими эксплуатационными свойствами из коры сосны без связующих веществ.

Ключевые слова: кора сосны, плиты, гидродинамическая активация, водоудерживающая способность, фракционный состав, прочность, разбухание, горячее прессование

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России на реализацию коллективом научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов» проекта «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов» (номер темы – FEFE-2024-0032).

Для цитирования: Эскин В.Д., Ермолин В.Н., Криворотова А.И. Конструкционные плиты из гидродинамически активированной коры сосны (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 175–187. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-175-187>

Original article

Structural Boards Made of Hydrodynamically Activated Pine (*Pinus sylvestris*) Bark without Binders

Vladislav D. Eskin[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [ABF-3729-2020](https://orcid.org/0000-0002-5221-9018)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5221-9018>

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Anna I. Krivorotova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABF-3696-2020](https://orcid.org/0000-0003-3463-3837), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3463-3837>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vladislaweskin@gmail.com[✉], vnermolin@yandex.ru, tkmkai@mail.ru

Received on April 1, 2024 / Approved after reviewing on June 26, 2024 / Accepted on June 28, 2024

Abstract. Bark is a large-tonnage waste in a number of wood processing technologies requiring efficient use. One of the promising areas of bark use is the production of boards without synthetic binders. Research has been conducted on the production of structural boards from *Pinus sylvestris* bark without a binder. The method is based on preliminary hydrodynamic activation of bark. The initial bark undergoes primary crushing in a hammer mill. After that, it is mixed with water at a concentration of 6 %. Then the resulting mass is activated in a rotary pulsation disperser, a carpet is formed from it, cold pressing is carried out, and then hot pressing. As a criterion for assessing the degree of mass activation, water-retaining capacity is adopted. The dependencies have been determined between the duration of treatment and water-retaining capacity, as well as the strength of the boards and water-retaining capacity. The latter made it possible to obtain the optimal value of the water-retaining capacity equal to 290 %. A multifactorial experiment has been conducted to develop the optimal hot pressing mode. As a result, the optimal mode for pressing the boards has been determined: temperature – 190 °C; specific process duration – 2.8 min/mm; pressing pressure – 4.4 MPa. The properties of the boards produced in this mode are: density – 980 kg/m³; bending strength – 24 MPa; swelling during soaking for 24 hours – 5 %; water absorption – 9 %. After soaking and subsequent drying to a moisture content of 5 %, the boards retain 75 % of their before soaking. In this case, the geometric dimensions return to the original ones. The resulting boards can be used as a sheet finishing and structural material, in house-building (as a base for floor and



roofing materials), in furniture production, especially in severe temperature and humidity conditions. The conducted research shows the possibility of producing board materials with high performance properties from pine bark without binders.

Keywords: pine bark, boards, hydrodynamic activation, water-retaining capacity, fractional composition, strength, swelling, hot pressing

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the staff of the “Biorefining of Forest Resources” scientific laboratory to implement the project “Study of the Patterns of Biodegradation Processes of Dead Stands for the Development of Scientifically Based Approaches to Obtaining New Functional Materials” (Topic ID no. – FEFE-2024-0032).

For citation: Eskin V.D., Ermolin V.N., Krivorotova A.I. Structural Boards Made of Hydrodynamically Activated Pine (*Pinus sylvestris*) Bark without Binders. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 175–187. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-175-187>

Введение

В целом ряде деревоперерабатывающих производств, таких как целлюлозно-бумажное, фанерное, плитное, лесопильное и др., окорка является либо обязательной, либо желательной технологической операцией. Кора составляет у разных пород от 4 до 30 % ствола дерева. В частности, у сосны – 10–16 % [16, 25]. Следовательно, кора – крупнотоннажный отход, который необходимо эффективно использовать. В настоящее время более половины объемов этого отхода складывается в отвалах, ухудшая экологическую обстановку и представляя пожарную опасность не только для предприятия, но и для прилегающих к нему территорий [24, 28].

Кора по химическому составу, строению и свойствам значительно отличается от древесины, что предопределено функциями, которые она выполняет в растущем дереве: проводящие, запасающие и защитные [9]. При этом для каждой породы характерны особенности. Функции внутреннего слоя коры – луба (флоэмы) – проводящая и запасающая. Наружный слой – корка (перидерма) – защищает от внешних воздействий. Содержание целлюлозы в коре сосны составляет от 14 до 19 % в корке и от 17 до 24 % в лубе [5], а лигнина – от 27 до 40 %. Для коры хвойных свойственно высокое содержание экстрактивных веществ – от 14 до 30 % – и пентозанов – от 7 до 15 %. Также в коре есть воски и суберин [17].

Клетки, образующие кору хвойных, по форме в основном являются паренхимными. Анализ работ [6, 9] показывает, что в коре много локальных участков, имеющих низкую прочность. Все это в совокупности с невысоким содержанием целлюлозы предопределяет то, что механические свойства коры значительно ниже, чем древесины [13].

В настоящее время наиболее распространенным способом использования коры является ее сжигание в котлах для обслуживания технологического процесса предприятия. Сухая кора при сжигании образует эквивалентное сухой древесине количество выделяемого тепла. По различным источникам, этот показатель варьирует от 16 до 20 МДж/кг [13, 22]. Однако существует ряд факторов, значительно затрудняющих процесс ее сжигания: высокая исходная

влажность (60–75 %), разнородный фракционный состав, плохая сыпучесть, усложняющая транспортировку и переработку, а также большая зольность, приводящая к быстрому засорению колосников котла и снижению его производительности [12].

Перспективным направлением является изготовление из коры топливных брикетов и гранул [18]. Отмечено, что пеллеты на основе коры обладают высокими прочностными свойствами. Это, по мнению авторов работы [29], в первую очередь связано с большим содержанием экстрактивных веществ и холоцеллюлозы. Другая гипотеза приведена в работе [23]. Автор связывает высокую прочность и низкую шероховатость гранул с большей в сравнении с древесиной чувствительностью коры к температуре и давлению. Как предполагается, это может быть обусловлено высоким содержанием лигнина в последней, что способствует увеличению плотности гранулированных материалов.

Еще одно направление использования отходов окорки – компостирование. В работе [3] предложен способ получения компостов из коры хвойных и лиственных пород с применением азотосодержащих добавок. Способ предполагает измельчение коры до фракции 3–10 мм, внесение в измельченную кору азотосодержащих добавок, выдерживание в буртах в течение 4 мес. с регулярным перемешиванием. Как показали исследования, применение данного продукта позволяет увеличить урожайность и устойчивость к болезням сельскохозяйственных культур. Подтверждением перспективности этого направления является то, что для компостирования можно использовать не только свежую кору, но и кору из отвалов [15, 24].

Кора – источник ценных веществ, которые могут быть использованы в химической, фармацевтической промышленности и сельском хозяйстве. Наибольший интерес представляют танины. Их применяют для дубления кожи и меха. В коре сосны содержится 15–25 % таннинов, лиственницы и ели – соответственно 8–19 и 5–15 % [26]. Таннины могут заменять фенол при изготовлении клеев для фанеры и древесно-стружечных плит [27]. Исследования физико-механических свойств древесно-стружечных плит, полученных с использованием карбамидоформальдегидной смолы с добавкой экстракта таннинов коры ели, показали повышение прочности плит [2]. Авторы выдвигают гипотезу, что таннины могут встраиваться в структуру связующего и участвовать в структурообразовании композита. Также ценный компонент древесной коры – суберин. Он локализуется в оболочках пробковых клеток и является химически стойким высокомолекулярным веществом, в результате чего клетки становятся непроницаемыми для газов и воды. Данное вещество может использоваться в качестве связующего в древесных плитах [11].

Использование коры как наполнителя в древесных плитных материалах могло бы быть наиболее легко реализуемым направлением применения коры. Однако проведенные исследования указывают на значительное снижение прочностных свойств плит при введении в их состав древесной коры [14]. Можно предположить, что снижение прочности плит обусловлено малой прочностью коры.

Одним из направлений улучшения показателей свойств плит с применением коры является уменьшение размера частиц, что позволяет нивелировать разнородность свойств по объему коры. Установлено, что при производстве

древесноволокнистых плит добавление измельченной коры в количестве 10 % дает хорошие результаты по прочности и разбуханию. С уменьшением размеров частиц характеристики готовых плит улучшаются [8].

Улучшение экологических свойств материалов, используемых в устройстве среды обитания человека, является трендом. Движением в этом направлении становится разработка способов получения древесных плит без связующего. Как правило, эти способы основаны на предварительной обработке исходного сырья, обеспечивающей последующее структурообразование материала.

В работе [19] приведены результаты исследований по изготовлению из коры черной ели теплоизоляционных плит без связующего. Кора измельчалась струей воды в процессе окорки, после чего мокрым способом получали плиты различной плотности, которые по теплофизическим свойствам соответствуют требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам, однако имеют низкую прочность.

Взрывной автогидролиз является способом активации растительного сырья. Его использовали для получения плит без связующего из коры сосны [10]. Изготовлены плиты различной плотности. При максимальной плотности, равной 530 кг/м³, прочность при статическом изгибе составляла 2,85 МПа. Авторы отмечают, что данный способ не позволяет получить плиты с высокими физико-механическими свойствами.

Высокие механические свойства древесных плит без связующего были достигнуты за счет предварительной гидродинамической обработки. Такие плиты при сопоставимой плотности имеют механические свойства, не уступающие свойствам древесно-стружечных плит и плит MDF. Есть все основания предполагать, что данный способ активации позволит получить из коры плиты с высокими механическими свойствами.

Цель исследования – разработка способа получения конструкционных плит из гидродинамически активированной коры сосны без использования связующего и изучение их свойств.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья при проведении экспериментального исследования использовалась кора сосны обыкновенной, отобранная после окорки древесины на станке типа ОК 63. Влажность исходной коры – 46,4 %. Фракционный состав (мм): 60 и более – 11 %; 40...60 – 33,7 %; 40...20 – 40,1 %; 20...6 – 15,2 %. Количество древесных отщепов в общей массе коры – не более 7,6 %. Первичное измельчение сырья производилось на лабораторной молотковой мельнице до фракции 5 мм и менее. Гидродинамическая активация осуществлялась в лабораторном роторно-пульсационном диспергаторе РГГД-1, конструкция которого подробно описана в работе [1]. Скорость вращения ротора установки – 2950 об./мин. Обработка выполнялась следующим образом. В смесительный бак, заполненный водой, помещалась измельченная кора – 6 % концентрации в пересчете на абсолютно сухую кору. В установке производилось циклическое прохождение коры через рабочую зону. Для оценки результатов влияния гидродинамической обработки на свойства массы принят показатель водоудер-

живающей способности (%), который определялся по методу G. Jaume [21]. Данный показатель широко используется в целлюлозно-бумажной и плитной промышленности [4]. Метод заключается в определении влажности массы после центрифугирования при 3000 об./мин. Центрифугирование осуществлялось на лабораторной центрифуге Т-23 (Janetzki, Германия).

Полученная пресс-масса на основе коры подвергалась 2-стадийному обезвоживанию. Первая стадия – отлив массы в коробе, дном которого является сетка с сечением ячеек 0,12 мм, без приложения давления. На рис. 1 представлена фотография пресс-массы после отлива.



Рис. 1. Пресс-масса на основе древесной коры после отлива без приложения давления

Fig. 1. The moulding material based on tree bark after casting without applying pressure

На второй стадии отбиралось требуемое количество массы, необходимое для получения плит с плотностью 1000 кг/м³, масса помещалась в пресс-форму и отжималась (подпрессовывалась) в холодном прессе при давлении 1 МПа. Сформированный ковер перекладывался на стальные поддоны и загружался в лабораторный пресс марки LabPro 100 (Голландия) для горячего прессования. Толщина материала фиксировалась толщиной дистанционных прокладок между поддонами. К исследованию приняты плиты толщиной 4 мм.

Полученные образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 ч, обрезались по формату и распиливались на образцы необходимых размеров для проведения испытаний согласно стандартным методикам: на предел прочности при статическом изгибе, водопоглощение, разбухание. Также для образцов устанавливались остаточная прочность и разбухание после вымачивания в течение 24 ч с последующей сушкой.

При определении оптимальных условий горячего прессования плитного материала на основе активированной коры использовался В-3 план. Факторы и уровни их варьирования приведены в таблице.

Факторы и уровни их варьирования при прессовании плит на основе древесной коры

The factors and levels of their variation during pressing the boards based on tree bark

Фактор	Уровень варьирования		
	нижний (-1)	основной (0)	верхний (1)
Температура прессования, °С	160	190	220
Давление прессования, МПа	3,6	4,3	5,0
Удельная продолжительность прессования, мин/мм	1,3	2,8	4,3

Обработка результатов эксперимента проводилась с использованием универсального многопрофильного пакета для статистической обработки данных Statgraphics 19.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты установления зависимости водоудерживающей способности от продолжительности гидродинамической обработки представлены на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость водоудерживающей способности от продолжительности обработки (τ) древесной коры в гидродинамическом диспергаторе

Fig. 2. The dependence of water-retaining capacity on the duration of treatment (τ) of tree bark in a hydrodynamic disperser

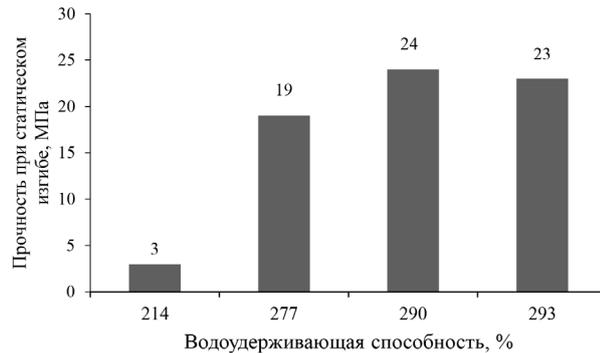


Из рис. 2 видно, что увеличение водоудерживающей способности массы до 290 % наблюдается при продолжительности обработки от 2 до 6–8 мин. После этого показатель стабилизируется и практически не возрастает, поэтому дальнейшую обработку проводить нецелесообразно. Стоит отметить, что при использовании в качестве сырья древесной коры водоудерживающая способность получаемой массы более высокая и достигается за более короткое время в сравнении с древесиной [7].

Результаты исследования влияния водоудерживающей способности на прочность плит при статическом изгибе показаны на рис. 3. Прочностные показатели плит представлены для водоудерживающей способности 214, 277, 290, 293 %, что соответствует продолжительности обработки 2, 6, 8 и 14 мин.

Рис. 3. Зависимость предела прочности плит на основе древесной коры от водоудерживающей способности

Fig. 3. The dependence of the ultimate strength of tree bark-based boards on the water-retaining capacity



Как видно из рис. 3, увеличение водоудерживающей способности приводит к росту прочности плит при статическом изгибе. По достижении показателем более 290 %, что соответствует продолжительности обработки более 8 мин, отмечается тенденция снижения прочности. Поэтому все последующие исследования проводились при показателе водоудерживающей способности обработанной массы, равном 290 %.

Изучение влияния режимных параметров процесса прессования на прочностные свойства плитных корьевых материалов проводилось с учетом представленных выше результатов.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить уравнение регрессии, выражающее зависимость прочности плит при статическом изгибе (МПа) от режима прессования:

$$\sigma_{\text{изг}} = -148,201 + 1,384T + 19,299P + 3,982\tau_{\text{уд}} - 0,0038T^2 - 2,245P^2 - 0,889\tau_{\text{уд}}^2 + 0,006TP + 0,0094T\tau_{\text{уд}} - 0,524P\tau_{\text{уд}},$$

где T – температура прессования, °С; P – давление прессования, МПа; $\tau_{\text{уд}}$ – удельная продолжительность прессования, мин/мм.

Коэффициент детерминации представленной модели, согласно проведенным расчетам, составляет 98,66 %, что говорит о высокой степени корреляции модели с результатами эксперимента. Оценку влияния исследуемых факторов на прочность при статическом изгибе проводили по стандартизованным картам Парето, графической интерпретации уравнения регрессии и графикам эффектов факторов и эффектов их взаимодействий.

Наибольшей значимостью из всех факторов обладают удельная продолжительность и температура прессования. Все зависимости имеют экстремальный характер. Диапазон изменения прочности для каждого рассматриваемого показателя режима прессования при нахождении 2 оставшихся параметров на основном уровне варьирования значительно отличается. Как следует из графических зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, наибольшее влияние на прочность при статическом изгибе оказывает удельная продолжительность прессования. Повышение этого показателя до 2,8 мин/мм увеличивает прочность более чем на 5 МПа. Это в первую очередь связано с особенностями формирования структуры материалов из мелкодисперсных древесных частиц. Увеличение удельной продолжительности выдержки при действии высокого давления и температуры приводит к деструкции материала в связи с чрезмерно быстрым удалением влаги, которая необходима для размягчения компонентов коры, участвующих в структурообразовании материала: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [20].

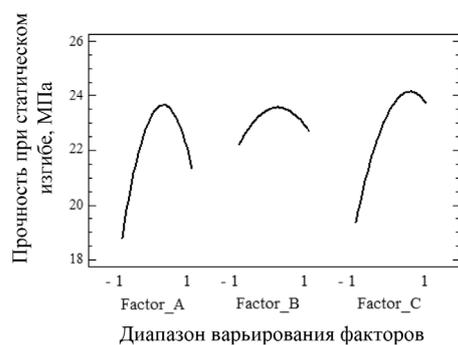


Рис. 4. График эффектов факторов для плитного материала на основе древесной коры (здесь и на рис. 5: А – температура прессования, °С; В – давление прессования, МПа; С – удельная продолжительность прессования, мин/мм)

Fig. 4. The graph of the effects of factors for the board material based on tree bark (here and in fig. 5: A – pressing temperature, °С; B – pressing pressure, МPa; C – specific pressing duration, min/mm)

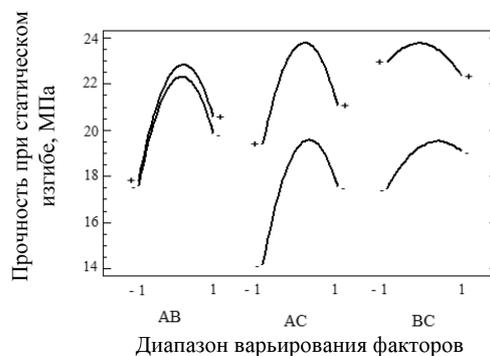
Температура прессования, оказывающая аналогичное влияние на прочность готовой плиты, в диапазоне от 160 до 190 °С приводит к увеличению прочности плиты от 19 до 23,5 МПа. Рост прочности плит в данном диапазоне можно объяснить процессом термохимической деградации коры и образованием соединений, готовых вступать в реакцию с лигнином и экстрактивными

веществами коры [18]. Дальнейшее повышение температуры прессования обуславливает снижение прочностных показателей плит. Наименьшее воздействие на прочность, согласно графику эффектов факторов, оказывает давление прессования. Изменение давления прессования практически не влияет на прочность, увеличивая или уменьшая ее от максимальной примерно на 1 МПа.

При рассмотрении совместного влияния факторов на прочность при статическом изгибе (рис. 5) можно отметить следующее. При увеличении температуры прессования и давления прессования на верхнем и нижнем уровнях варьирования наблюдаются аналогичные зависимости изменения прочностных свойств материала: при росте температуры прессования до 190 °С прочность увеличивается до 23 МПа, при дальнейшем повышении наблюдается снижение прочности. Рост температуры прессования при минимальной удельной продолжительности выдержки оказывает значительно меньшее влияние на прочностные свойства материала в сравнении с варьированием температуры при максимальной продолжительности выдержки. Разница между максимальными показателями прочности материала при варьировании данных факторов составляет более 4,5 МПа. При этом следует отметить одинаковый характер изменения прочности при совместном влиянии факторов. При рассмотрении действия давления и удельной продолжительности прессования на прочность при статическом изгибе установлен монотонный характер изменения прочности. Учитывая невыраженность изменения выходной величины на всем диапазоне варьирования давления прессования при максимальной и минимальной удельной продолжительности выдержки, можно утверждать о минимальном влиянии давления прессования на прочностные показатели плит, которое заключается только в изменении плотности изделия в процессе горячего прессования.

Рис. 5. График эффектов взаимодействий факторов для плит на основе древесной коры

Fig. 5. The graph of the effects of factor interactions for tree bark-based boards



С использованием пакета анализа программы Statgraphics была проведена оптимизация режимных параметров изготовления корьевых плит по показателю прочности при статическом изгибе. По результатам проведенной оптимизации определен режим прессования плитного материала на основе коры, обеспечивающий наилучшие физико-механические характеристики плит: температура прессования – 191 °С; удельное давление прессования – 4,4 МПа; удельная продолжительность прессования – 2,9 мин/мм. При такой комбинации параметров прогнозируемая прочность готового продукта составляет 24,1 МПа.

По данному режиму была изготовлена партия образцов, по которым изучены их свойства: плотность – 980 кг/м³; предел прочности при статическом

изгибе – 24 МПа; разбухание – 5 %; водопоглощение – 9 %. Данные плиты по механическим свойствам сопоставимы с широко распространенными плитами: MDF, древесноволокнистыми, древесно-стружечными, – поэтому могут иметь аналогичные сферы применения. Кроме того, плиты на основе коры обладают повышенной водостойкостью. Они имеют значительно меньшее разбухание, чем приведенные аналоги. При этом после вымачивания в течение 24 ч в воде с последующим высушиванием такие плиты сохраняют порядка 75 % от первоначальной прочности, размеры возвращаются к исходным. Это свидетельствует о том, что данные плиты могут эксплуатироваться в жестких температурно-влажностных условиях.

Полученные плиты (рис. 6) применимы в качестве листового отделочного материала, в т. ч. в помещениях с повышенной влажностью: ванные комнаты, бани, кухни; в домостроении – в качестве наружной отделки, подложки для напольных покрытий и кровельных материалов.



Рис. 6. Внешний вид изготовленных образцов плит

Fig. 6. The appearance of the manufactured board samples

Выводы

1. Проведенное исследование выявило принципиальную возможность получения из отходов окорки без применения связующих веществ плит с высокими физико-механическими свойствами.

2. Для достижения наибольших прочностных показателей необходимо проводить гидродинамическую обработку до достижения показателя водоудерживающей способности 290 %.

3. Разработан оптимальный режим прессования плитных материалов, обеспечивающий наилучшие прочностные характеристики: температура – 190 °С; удельная продолжительность процесса – 2,8 мин/мм; давление прессования – 4,4 МПа.

4. Полученные плиты имеют следующие показатели: плотность – 980 кг/м³; предел прочности при изгибе – 24 МПа; водопоглощение – 9 %; разбухание – 5 %.

5. Изготовленные плитные материалы обладают повышенной водостойкостью. После вымачивания в течение 24 ч и последующего высушивания до влажности 5 % плиты сохраняют порядка 75 % прочности от первоначальной. При этом после высушивания образцы приобретают исходные размеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Елисеев С.Г. Влияние механоактивации на аутогезионные свойства древесины // Хвойные бореал. 2013. Т. XXXI, № 1–2. С. 159–163.

Bayandin M.A., Ermolin V.N., Eliseev S.G. The Effect of Mechanical Activation on the Autohesive Properties of Wood. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2013, vol. XXXI, no. 1–2, pp. 159–163. (In Russ.).

2. Вахнина Т.Н. Использование отходов окорки для производства древесно-стружечных плит // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: IV Междунар. науч. экол. конф. (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины). Краснодар: КубГАУ им. И.Т. Трубилина, 2015. Ч. I. С. 355–358.

Vakhnina T.N. Use of Wastes of Debarking for Production of Wood Chipboards. *Problems of Reclamation of Household, Industrial and Agricultural Waste: IV International Scientific Ecological Conference (with the Participation of the Ecologists from Azerbaijan, Armenia, Belarus, Germany, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Latvia, Lebanon, Moldova, Transnistria, Russia, Slovakia, Uzbekistan and Ukraine)*. Krasnodar: KubSAU named after I.T. Trubilin, 2015, part 1, pp. 355–358. (In Russ.).

3. Девятловская А.Н., Журавлёва Л.Н., Девятловский Н.В. Утилизация древесной коры деревообрабатывающих предприятий // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2010. № 27. С. 51–54.

Devyatlovskaya A.N., Zhuravleva L.N., Devyatlovsky N.V. Utilization of Tree Bark from Wood Processing Enterprises. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2010, no. 27, pp. 51–54. (In Russ.).

4. Дулькин Д.А. Развитие научных основ и совершенствование процессов технологии бумаги и картона из макулатуры: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2008. 44 с.

Dul'kin D.A. *Development of Scientific Foundations and Improvement of the Processes of Paper and Cardboard Technology from Waste Paper*: Doc. Tech. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2008. 44 p. (In Russ.).

5. Евстигнеев Э.И. Химия древесины. СПб.: Политехн. ун-т, 2007. 147 с.
Evstigneev E.I. *Chemistry of Wood*. Saint-Petersburg, Polytechnic University Publ., 2007. 147 p. (In Russ.).

6. Еремин В.М. Сравнительная анатомия коры сосновых: дис. ... д-ра биол. наук. Воронеж, 1983. 547 с.

Eremin V.M. *Comparative Anatomy of Pine Bark*: Doc. Tech. Sci. Diss. Voronezh, 1983. 547 p. (In Russ.).

7. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 148–157.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Soft Wood Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 5, pp. 148–157. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.148>

8. Лазарева Л.И., Чистова Н.Г., Медведев С.О. Использование коры при получении древесно-волокнистых плит // Химия растит. сырья. 2013. № 1. С. 235–238.

Lazareva L.I., Chistova N.G., Medvedev S.O. The Use of Bark in Obtaining Wood-Fiber Plates. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2013, no. 1, pp. 235–238. (In Russ.).
<https://doi.org/10.14258/jcprm.1301235>

9. Лотова Л.И. Анатомия коры хвойных. М.: Наука, 1987. 160 с.

Lotova L.I. *Anatomy of the Bark of Conifers*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 160 p. (In Russ.).

10. Мусько Н.П., Беушева О.С., Саушкина С.С. Плитные материалы на основе модифицированной коры сосны // Ползунов. вестн. 2015. № 2. С. 136–138.

Mus'ko N.P., Beusheva O.S., Saushkina S.S. Slab Materials Based on Modified Pine Bark. *Polzunovskij vestnik*, 2015, no. 2, pp. 136–138. (In Russ.).

11. Судакова И.Г., Гарынцева Н.В., Кузнецов Б.Н. Получение древесных плитных материалов с использованием связующих на основе суберина березовой коры // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 65–68.

Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Kuznetsov B.N. Production of Wood-Based Panel Materials Using Binders Based on Birch Bark Suberin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2011, no. 3, pp. 65–68. (In Russ.).

12. Федосенко И.Г. Оценка возможности использования коры деревьев, произрастающих в Республике Беларусь, для производства гранул // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесн. хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 2(246). С. 284–289.

Fedosenko I.G. Evaluation of the Possibility of Using the Bark of Trees Growing in the Republic of Belarus for the Granulation. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2021, no. 2(246), pp. 284–289. (In Russ.). <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-246-36-284-289>

13. Цывин М.М. Использование древесной коры. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 94 с. Tsyvin M.M. *The Use of Tree Bark*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1973. 94 p. (In Russ.).

14. Черкасова А.И., Жученко А.Г., Хлюпина Л.П. Получение плит из коры со связующим // Технология древесных плит и пластиков: межвуз. сб. Вып. VII. Свердловск: УПИ, 1980. С. 76–82.

Cherkasova A.I., Zhuchenko A.G., Khlyupina D.P. Obtaining Slabs from Bark with a Binder. *Tekhnologii drevesnykh plit i plastikov*: Interuniversity Collection. Sverdlovsk, UPI Publ., 1980, iss. VII, pp. 76–82. (In Russ.).

15. Arzola-Alvarez A., Castillo-Castillo Y., Anderson R.C., Hume M., Ruiz-Barrera O., Min B.R., Arzola-Rubio A., Beier R.C., Salinas-Chavira J. Influence of Pine Bark Tannin on Bacterial Pathogens Growth and Nitrogen Compounds on Changes in Composted Poultry Litter. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 1–10. <https://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2018-0911>

16. Berendt F., Pegel E., Blasko L., Cremer T. Bark Proportion of Scots Pine Industrial Wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021, vol. 79, pp. 749–752. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01657-7>

17. Fedorov V.S., Ryazanova T.V. Optimization of the Extraction Process of *Pinus sylvestris* L. Pine Bark with Monoethanolamine. *VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, 2023, vol. 390, art. no. 05038. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005038>

18. Filbakk T., Jirjis R., Nurmi J., Høibø O. The Effect of Bark Content on Quality Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Pellets. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, iss. 8, pp. 3342–3349. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.011>

19. Gößwald J., Barbu M.-C., Petutschnigg A., Tudor E.M. Binderless Thermal Insulation Panels Made of Spruce Bark Fibres. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 11, art. no. 1799. <https://doi.org/10.3390/polym13111799>

20. Goring D.A.I. Thermal Softening, Adhesive Properties and Glass Transitions in Lignin, Hemicellulose and Cellulose. *Consolidation of the Paper Web*, 1965, pp. 555–568. <https://doi.org/10.15376/frc.1965.1.555>

21. Jayme G. *Zellstoff und Papier*, 1961, vol. 11, pp. 432–438. (In Germ.).

22. Kamperidou V., Lykidis C., Barmpoutis P. Utilization of Wood and Bark of Fast-Growing Hardwood Species in Energy Production. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64(4), pp. 164–170. <https://doi.org/10.17221/141/2017-JFS>

23. Lehtikangas P. Quality Properties of Pelletised Sawdust, Logging Residues and Bark. *Biomass and Bioenergy*, 2001, vol. 20, iss. 5, pp. 351–360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)
24. Margina Yu., Troegubov A., Kulikova Yu., Sliusar N. Composting Old Bark and Wood Waste in Cold Weather Conditions. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 14, art. no. 10768. <https://doi.org/10.3390/su151410768>
25. Millers M., Magaznieks J. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stem Wood and Bark Moisture and Density Influencing Factors. *Research for Rural Development*, 2012, pp. 91–97.
26. Nisca A., Ștefănescu R., Stegăruș D.I., Mare A.D., Farczadi L., Tanase C. Comparative Study Regarding the Chemical Composition and Biological Activity of Pine (*Pinus nigra* and *P. sylvestris*) Bark Extracts. *Antioxidants*, 2021, vol. 10, no. 2, art. no. 327. <https://doi.org/10.3390/antiox10020327>
27. Scalbert A. Antimicrobial Properties of Tannins. *Phytochemistry*, 1991, vol. 30, iss. 12, pp. 3875–3883. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)83426-L](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)83426-L)
28. Svoykin F., Birman A., Bacherikov I., Meter O., Bozhbov V. Perspectives of Bark Dump Recycling at Wood Processing Enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 817, art. no. 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012033>
29. Terzopoulou P., Kamperidou V., Lykidis C. Cypress Wood and Bark Residues Chemical Characterization and Utilization as Fuel Pellets Feedstock. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 8, art. no. 1303. <https://doi.org/10.3390/f13081303>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 66.021.3.001.57:532.529

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-188-202

**Эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов
содорегенерационного котла при производстве целлюлозы**

С.В. Анискин[✉], д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

В.С. Куров, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; asv-47@mail.ru[✉], vskurov18@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.23 / Одобрена после рецензирования 16.06.23 / Принята к печати 18.06.23

Аннотация. Несмотря на переход к шведской технологии регенерации черного щелока предприятий по производству целлюлозы, даже в тех регионах России, где достигнуты нормативные среднесуточные показатели по содержанию в воздухе населенных мест сероводорода и метилмеркаптана, остается ряд проблем с выбросами восстановленной серы. Во многих городах разовые концентрации восстановленной серы, особенно в ночное время суток, могут превышать допустимые. Кроме выбросов дымовых газов содорегенерационных котлов, существуют другие, менее интенсивные источники вредных выбросов в варочном, выпарном и лесохимическом цехах, в цехах каустизации и регенерации извести, есть выбросы из неорганизованных источников, с открытой поверхности сооружений очистки сточных вод. Население, живущее рядом с такими предприятиями, ощущает неприятный запах метилмеркаптана. Данное исследование направлено на разработку новой, применимой для разных источников технологии снижения газовых выбросов восстановленной серы в окружающую среду. Представлены результаты испытания промышленной установки очистки газовых выбросов содорегенерационного котла в скруббере с форсуночным орошением. На основании измерений технологических параметров режима работы газоочистой установки и определения состава орошающего раствора выполнен анализ полученных результатов. Во время испытаний был получен эффект высокой степени улавливания сероводорода при низком рН. Установлено, что улавливание сероводорода происходило в результате его окисления до попадания в орошающий раствор в мелких каплях конденсата, образующегося на микронных пылинках сульфата и карбоната натрия. Проведено сравнение результатов настоящей работы с результатами исследований Стенфордского университета и института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Проанализирована возможность образования пероксида водорода в условиях наших испытаний в поверхностном слое мелких капель, которые образуются в процессе конденсации паров воды на частицах пыли. Определена предполагаемая причина полученного эффекта, которая заключается в термомеханической деформации поверхностного слоя капель.

© Анискин С.В., Куров В.С., 2024



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

Ключевые слова: эжекторный скруббер Вентури, дымовые газы, сульфатная пыль, сероводород, самообразование пероксида водорода, конденсация, мелкие капли, окисление

Для цитирования: Анискин С.В., Куров В.С. Эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов содорегенерационного котла при производстве целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 188–202. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-188-202>

Original article

The Effect of Intensive Oxidation of Hydrogen Sulfide from Flue Gases of a Soda Recovery Boiler in the Production of Pulp

Sergey V. Aniskin[✉], Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

Victor S. Kurov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; asv-47@mail.ru[✉], vskurov18@mail.ru

Received on March 20, 2023 / Approved after reviewing on June 16, 2023 / Accepted on June 18, 2023

Abstract. Despite the transition to the Swedish technology for regenerating black liquor from pulp production plants, even in those regions of Russia where the standard daily average levels of hydrogen sulfide and methyl mercaptan in the air of populated areas have been achieved, a number of problems remain with emissions of reduced sulfur. In many cities, one-time concentrations of reduced sulfur, especially at night, may exceed the permissible ones. In addition to flue gas emissions from soda recovery boilers, there are other, less intensive sources of harmful emissions in the cooking, evaporation and wood-chemical workshops, in the causticization and lime regeneration workshops, there are emissions from unorganized sources and from the open surface of wastewater treatment facilities. The population living near such plants feels the unpleasant odor of methyl mercaptan. This study has aimed to develop a new technology for reducing gas emissions of reduced sulfur into the environment, applicable for different sources. The results of testing an industrial installation for purification of gas emissions from a soda recovery boiler in a scrubber with nozzle irrigation have been presented. Based on the measurements of the technological parameters of the operation mode of the gas purification plant and the determination of the composition of the irrigation solution, the analysis of the results obtained has been performed. During the tests, a high degree of hydrogen sulfide capture at a low pH value has been achieved. It has been established that hydrogen sulfide has been captured as a result of its oxidation before entering the irrigation solution in fine droplets of condensate formed on micron-sized particles of sulfate and sodium carbonate. The results of this study have been compared with the results of the studies conducted by Stanford University and the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The possibility of hydrogen peroxide formation under our test conditions in the surface layer of fine droplets formed during the condensation of water vapour on dust particles has been analyzed. The supposed cause of the obtained effect has been determined to be the thermomechanical deformation of the surface layer of the droplets.

Keywords: ejector Venturi scrubber, flue gases, sulfate dust, hydrogen sulfide, self-formation of hydrogen peroxide, condensation, fine droplets, oxidation

For citation: Aniskin S.V., Kurov V.S. The Effect of Intensive Oxidation of Hydrogen Sulfide from Flue Gases of a Soda Recovery Boiler in the Production of Pulp. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 188–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-188-202>

Введение

Любые промышленные предприятия строятся с соблюдением всех требований норм безопасности на момент их проектирования, в т. ч. и предприятия по производству целлюлозы. При длительной эксплуатации предприятия, с одной стороны, изнашивается и стареет оборудование, с другой – ужесточаются требования по безопасности. В настоящее время особенно значимыми стали нормы по выбросам вредных веществ в окружающую среду [15]. Предприятия вынуждены тратить миллиарды рублей на создание сооружений и оборудование для снижения выбросов [10]. При этом не всегда можно приобрести технологию и оборудование, в полной мере отвечающие экологическим требованиям. Для решения этой задачи в России принят федеральный закон «Об охране окружающей среды» (от 10.01.2002). В законе нормативные требования ограничиваются наилучшей существующей технологией [11]. Отсутствие такой технологии или слишком высокая стоимость ее внедрения является сдерживающим фактором при снижении выбросов в окружающую среду. Особую актуальность это приобретает при выбросе высокотоксичных веществ вблизи городских и сельских поселений. Известны примеры негативных последствий попадания в воздух большого количества сероводорода и метилмеркаптана в результате работы Сегежского [12] и Братского целлюлозно-бумажных комбинатов [8]. Дело № А78-4663/2020 о выбросах Селенгинского целлюлозно-бумажного комбината было завершено решением от 4 февраля 2021 г. арбитражным судом Забайкальского края [5].

Для абсорбции сероводорода обычно используют щелочные растворы с высоким рН. Известно, что щелочная абсорбция восстановленной серы в дымовых газах содорегенерационных котлов (СРК) затруднена наличием углекислого газа, но возможна. В работе [3] было достигнуто улавливание сероводорода в эжекторных скрубберах Вентури (ЭСВ) на 95 %, а метилмеркаптана – на 93 % при рН = 12–13. Недостаток этого способа заключается в потреблении большого количества каустической соды: расход сухого каустика составил 650 кг/ч (22 кг/т целлюлозы). Эффективная абсорбция при капельном орошении происходит только в случае наличия в растворе реагентов, обеспечивающих высокую скорость химических реакций с сорбируемым газом, которые переводят сопротивление переносу вещества в газовую фазу (например, каустическая сода). Альтернативным способом являются разнообразные методы окисления восстановленной серы в сорбирующем растворе. В работе [7] представлен обзор экономически выгодных и экологически безопасных вариантов очистки сероводородсодержащих природных вод. В статье [9] описано исследование известного способа окисления сероводорода пероксидом водорода, а в [14] – новое исследование электрохимического окисления содержащегося в воде се-

сероводорода кислородом на катализаторе из дробленого антрацита. Наибольший интерес в настоящее время представляет изучение химических процессов в мелкодисперсных каплях воды. В работах [20, 21] описано, что в каплях воды микрометрового размера (микрокаплях) происходит спонтанное восстановление органических молекул. Также было обнаружено [23] повышение скорости химических реакций в каплях малого размера, через 2 года после этого установлено [32], что скорость реакций может увеличиваться на порядки с уменьшением размера капель или толщины пленки. В работе [33] при поиске причины необычных свойств микрокапель на границе раздела их межфазной поверхности установлено сильное электрическое поле.

Реализация подобных технологических процессов возможна в ЭСВ [2]. Промышленные испытания такого устройства, разработанного в нашем университете, дали неожиданный результат, который может быть использован для новых поисков в этой области. При испытаниях получен эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов СРК без щелочной абсорбции.

Цель этой работы заключается в исследовании результатов наших испытаний с учетом современных знаний о самообразовании пероксида водорода и разработке новой технологии очистки газовых выбросов восстановленной серы на предприятиях по производству целлюлозы на основе скрубберов с капельным орошением.

Объекты и методы исследования

В отраслевой лаборатории нашего университета была разработана дедорационная установка, предназначенная для очистки выбросов дымовых газов СРК-350 (рис. 1).

Технология очистки сероводорода и метилмеркаптана в среде углекислого газа была основана на щелочной абсорбции каустической содой при высоких значениях pH в ЭСВ. Добиться хорошей селективности абсорбции сероводорода и метилмеркаптана в газовой среде с большим содержанием диоксида углерода предполагали, уменьшив продолжительность контакта капельной струи с газовым потоком. Для этого были спроектированы 2-ступенчатые ЭСВ с укороченными трубами Вентури 11 и 14. Установка содержала 8 параллельно работающих 2-ступенчатых аппаратов ЭСВ. Дымовые газы после электрофилтра разделялись на 2 потока через соответствующие газоходы, каждый из которых соединен с четырьмя 2-ступенчатыми ЭСВ.

Предварительные испытания оборудования проводили на оборотной воде при pH орошающего раствора 8,5, что устанавливалось в результате улавливания пыли, которая кроме сульфата натрия содержала 28,2 % карбоната натрия. Это позволяло рассчитывать на высокую эффективность улавливания диоксида серы и проверить работоспособность механических элементов большой дедорационной установки. После электрофилтра дымовые газы СРК-350 дымососом 17 подавались последовательно в 1-й скруббер 11 с орошением форсункой 7, затем во 2-й 14 с орошением форсункой 10. Далее газы направлялись в каплеуловитель 3 и дымовую трубу 1. Орошающий раствор циркулировал через бак 19 в скруббер 1-й ступени очистки 11, через переливную трубу попадал в бак 20, охлаждался в теплообменнике 21 и далее направлялся в скруббер 2-й ступени очистки 14.

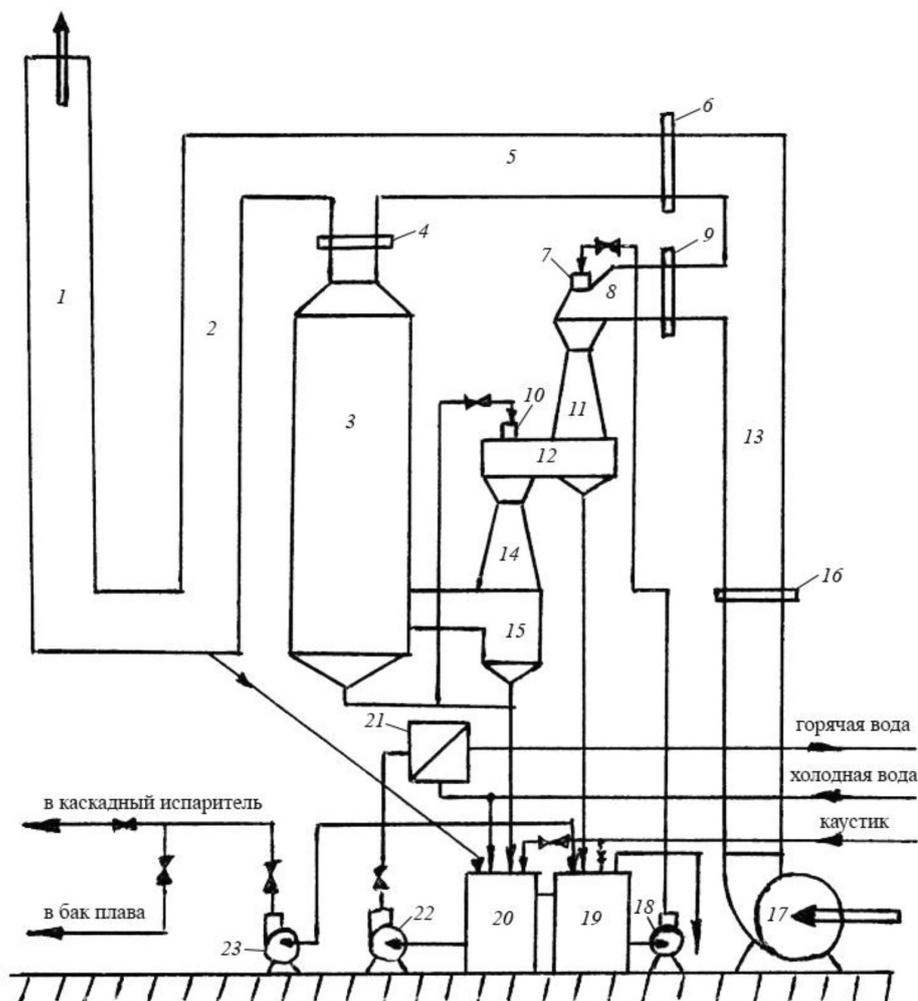


Рис. 1. Технологическая схема промышленной установки для очистки дымовых газов СРК: 1 – дымовая труба; 2 – отводящий газоход; 3 – каплеуловитель; 4, 6, 9, 16 – шиберы; 5 – обводной газоход; 7, 10 – форсунки 1-й и 2-й ступеней соответственно; 8, 13 – подводящие газоходы; 11, 14 – скрубберы 1-й и 2-й ступеней очистки соответственно; 12 – соединительный газоход; 15 – бункер; 17 – дымосос; 18, 22 – насосы циркулирующего раствора 1-й и 2-й ступеней соответственно; 19, 20 – баки циркулирующего раствора 1-й и 2-й ступеней соответственно; 21 – теплообменник; 23 – сливной насос

Fig. 1. The technological scheme of an industrial plant for purification of flue gases of a soda recovery boiler: 1 – chimney; 2 – exhaust gas flue; 3 – drip pan; 4, 6, 9, 16 – gates; 5 – bypass flue; 7, 10 – 1st and 2nd stage nozzles; 8, 13 – inlet flues; 11, 14 – scrubbers of the 1st and 2nd stages of purification, respectively; 12 – connecting flue; 15 – hopper; 17 – exhauster; 18, 22 – 1st and 2nd stage circulating solution pumps; 19, 20 – 1st and 2nd stage circulating solution tanks, respectively; 21 – heat exchanger; 23 – letdown pump

Первый скруббер 11 работал в режиме испарительного охлаждения до достижения газами состояния предельно насыщенных парами воды. Температура орошающего раствора на входе была равной температуре газа на выходе

из этого скруббера. Второй скруббер 14 орошался охлажденным раствором, что позволяло дополнительно снизить температуру насыщенного пара, обеспечивая интенсивный режим конденсации паров воды.

Параметры режима работы дезодорационной установки и состав орошающего раствора определяли по следующим методикам: расход газа – методом снятия скоростного поля с помощью пневмометрических трубок Прандтля; расход жидкости, ее давление, статическое давление в газоходе, температура газа и жидкости – стандартными контрольно-измерительными приборами, установленными в точках измерения и выведенными на щит управления; концентрацию ионов натрия – на пламенном фотометре; сероводорода и сульфида натрия – потенциометрическим титрованием; сернистого ангидрида – фуксин-формальдегидным способом; тиосульфата и сульфита – йодометрическим титрованием; сульфата натрия – титрованием трилоном Б; гидроксида натрия, карбоната и бикарбоната натрия – титрованием соляной кислотой.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлены основные характеристики режима работы дезодорационной установки:

Расход нормальных влажных газов.....	144 000 нм ³ /ч
Расход сухих нормальных газов.....	110 000 нм ³ /ч
Расход жидкости 1-й ступени очистки.....	196 нм ³ /ч
Расход жидкости 2-й ступени очистки.....	41 нм ³ /ч
Расход выводимой части раствора.....	9,4 нм ³ /ч
Расход воды на теплообменник.....	100 нм ³ /ч
Давление жидкости 1-й ступени.....	0,57 МПа
Давление жидкости 2-й ступени.....	0,63 МПа
Температура раствора на входе 1-й ступени.....	65 °С
Температура раствора на входе 2-й ступени.....	35 °С
Температура газов на входе.....	125 °С
Температура газов на выходе.....	62 °С
рН орошающего раствора.....	8,5

Состав орошающего раствора представлен в таблице.

Состав орошающего раствора
The composition of the irrigation solution

Размерность	Na ₂ S	Na ₂ SO ₃	Na ₂ S ₂ O ₃	Na ₂ CO ₃	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	Σ(Na)	Na _{нф}
Гмоль/л	0	0,0034	0,0162	0,0562	0,0836	0,1714	0,5780	0,5840
Г/л	0	0,43	2,56	6,07	7,19	24,34	–	–

Примечание: Na_{нф} – натрий, определенный на пламенном фотометре.

Эффективность улавливания диоксида серы достигла 84,9 % (концентрация на входе – 0,0505 г/нм³ сухих газов); пыли – 79,4 % (концентрация на входе – 5,95 г/нм³ сухих газов), а сероводорода – 73,0 % (концентрация на входе – 0,11 г/нм³ сухих газов).

Анализ результатов испытаний показал близкое соответствие эффективности улавливания диоксида серы с теоретическими расчетами при используемых габаритах ЭСВ и удельном орошении. Относительно низкая эффективность улавливания пыли объясняется низким средним размером пылевых частиц – ~ 1 мкм. Учитывая, что основным аппаратом улавливания пыли является электрофильтр, достигнутой эффективности было достаточно.

В испытаниях на оборотной воде при $\text{pH} = 8,5$ мы не предполагали значительного улавливания сероводорода. Результат испытаний оказался неожиданным. Сероводород улавливался почти как диоксид серы – на 73 %. Это чрезвычайно высокий показатель при столь низком pH .

Снижение концентрации сероводорода в газовой фазе в сочетании с отсутствием в циркулирующем растворе скрубберов сульфида натрия свидетельствовало об окислении сероводорода. Стало очевидным, что описанный результат не имеет прямого отношения к щелочной абсорбции, поэтому был проведен анализ полученного эффекта с целью определения места и механизма окисления сероводорода в скруббере.

Реакция окисления кислородом в водном растворе считается медленной, но продолжительность циркуляции раствора с учетом размеров бака относительно велика. Можно предположить, что сероводород поглощается каплями орошающего раствора карбоната натрия, образуя сульфид-ионы без окисления, а уже адсорбированный сероводород и сульфид-ионы окисляются в баке циркулирующего раствора.

Такая возможность была проверена следующим образом. В основе щелочной абсорбции лежит равновесие между концентрацией сероводорода на границе раздела в газовой и жидкой фазе, а также химическое равновесие между сероводородом и его продуктами реакций с гидроксил-ионом.

Абсорбция возможна только в случае превышения концентрации A_0 сероводорода в ядре газового потока над его концентрацией A у поверхности раствора в газовой фазе. Отношение концентрации (моль/л) уловленной серы в каплях к максимальной концентрации (моль/л сухих нормальных газов) сероводорода на входе в скруббер определено по следующей формуле:

$$\frac{S_{\text{ул}}}{A_0} = \frac{1}{100} \eta \frac{Q_{\text{г}}}{Q_{\text{ж1}} + Q_{\text{ж2}}} = 339, \quad (1)$$

где η – эффективность улавливания сероводорода, %; $Q_{\text{г}}$ – объемный расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$ сухих нормальных газов; $Q_{\text{ж1}}, Q_{\text{ж2}}$ – объемный расход орошающего раствора 1-й и 2-й ступеней соответственно.

В расчете использованы приведенные выше данные о параметрах установки.

Равновесное отношение концентрации растворенного сероводорода к концентрации сероводорода над поверхностью капли при низких pH определяется следующей формулой:

$$\frac{S}{c_1} = 1 + k_1 c_2, \quad (2)$$

где c_1, c_2 – концентрации сероводорода и гидроксил-ионов в жидкой фазе соответственно, моль/л; k_1 – константа равновесия, $\text{л} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Константа определялась по эмпирической формуле [16]:

$$\lg\left(\frac{k_1}{\text{He}}\right) = 7,855 - 0,0222T - 0,08(1 - 0,01T)I, \quad (3)$$

где He – константа Генри; T – температура раствора, °С; I – ионная сила, моль·л⁻¹.

Цифровые коэффициенты имеют размерности, приводящие формулы к безразмерному виду:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n z_i^2 c_i, \quad (4)$$

где z_i – электрический заряд i -го иона; c_i – концентрация i -го иона в растворе, моль·л⁻¹.

Равновесие между концентрациями сероводорода в газовой и жидкой фазах в уравнении (2) определяется константой Генри:

$$\frac{A}{c_1} = \text{He}. \quad (5)$$

Константа Генри зависит от состава водного раствора:

$$\lg\left(\frac{\text{He}}{\text{He}_w}\right) = -LL, \quad (6)$$

где He_w – константа Генри при растворении газа в воде; L – коэффициент, $L = 0,079$ л/моль в случае абсорбции раствором карбоната натрия.

Концентрацию гидроксил-ионов определяли по величине рН:

$$\text{pH} = \lg(c_2) + 14,62 - 0,0256T. \quad (7)$$

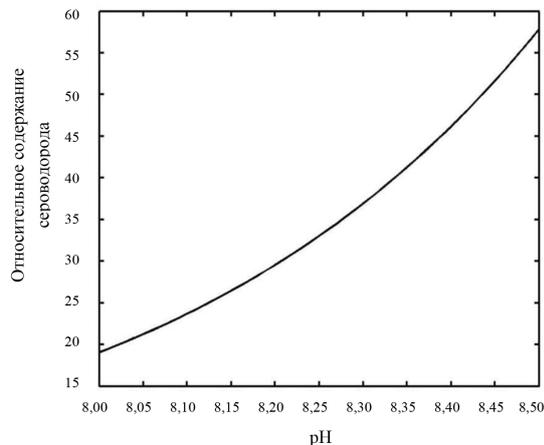
Общий вид искомой функции можно получить из уравнений (2) и (5):

$$\frac{S}{A} = \frac{1 + k_1 c_2}{\text{He}}. \quad (8)$$

Решение полученной системы уравнений (2)–(8) представлено на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость относительного содержания растворенного сероводорода от рН при равновесии в диапазоне рН – 8–8,5

Fig. 2. The dependence of the relative content of dissolved hydrogen sulfide on the рН at equilibrium in the рН range of 8–8.5



Уравнения (2)–(8) позволяют определить искомую зависимость и оценить возможность улавливания сероводорода при разных значениях рН.

Расчет по уравнению (8) проведен при низких значениях рН, характерных для работы скруббера при очистке дымовых газов СРК. Температура газа принята равной температуре раствора – 62 °С. Константа Генри для водного раствора сероводорода взята при 60 °С равной 1,037. При расчете влияния ионной силы на константу Генри использовали результаты определения состава раствора, представленные в таблице.

Качество измерения состава раствора определяли сравнением суммарного количества натрия с определенным на пламенном фотометре $Na_{пф}$. Расхождение составило 1 %. Результаты расчетов представлены на рис. 2 в области рН от 8 до 8,5. При рН = 8,5 получено равновесное отношение $S/A = 58$. Эта величина меньше определенной по количеству уловленного сероводорода (1) в 5,84 раза. Учитывая уменьшение концентрации по длине ЭСВ, а также короткую продолжительность диффузии в каплях, определяемую продолжительностью их движения (меньше 0,1 с), при котором сорбируемые вещества проникают только в тонкий поверхностный слой капли (капля не может заполниться), теоретическое относительное содержание серы будет значительно меньше 58, а расхождение с реальным соотношением значительно вырастет.

Из проведенных расчетов следует, что уловленный сероводород не мог проникнуть в раствор вследствие щелочной абсорбции. Сероводород окислялся до попадания в орошающий раствор. В этом случае окисление должно происходить или на поверхности капель, или в объеме газового потока в мелких каплях конденсата. Образованию таких капель способствует форсуночное орошение дымовых газов в ЭСВ. Как при режиме испарения орошающего раствора, так и при режиме конденсации в газовом потоке дымовые газы охлаждаются до состояния насыщения. Как показано в работе [1], частички сульфатной пыли в потоке дымовых газов СРК, насыщенных парами воды, являются очень эффективными ядрами конденсации мелких капель. В случае окисления сероводорода в мелких каплях конденсата вероятно попадание продуктов окисления в орошающий раствор в результате инерционного осаждения этих капель на крупных каплях системы форсуночного орошения. На 2-й ступени очистки газов ЭСВ, работавшей в режиме охлаждения орошающего раствора, капли конденсата могут продолжать расти в результате пересыщения парогазовой смеси и коалесценции, но для объяснения и дальнейшего использования полученного эффекта факта наличия капель конденсата недостаточно.

В сравнении с щелочной абсорбцией использование эффекта быстрого и дешевого окисления восстановленной серы не только в дымовых газах СРК, но и в других источниках различных производств очень привлекательно.

В настоящее время известно много исследований, в ходе которых наблюдалось интенсивное окисление восстановленной серы и других веществ в скрубберах или при орошении газов форсунками. Рассмотрим основные результаты этих работ.

Интенсивное окисление сероводорода в смеси с сернистым ангидридом при конденсации паров воды в скрубберах наблюдал Н.Г. Вилесов [4]. Он предполагал, что катализатором окисления является водяной пар.

Многие исследователи наблюдали окисление имеющих неприятный запах газов при распыливании мелкодисперсных капель менее 100 мкм. Такие работы проводились в США фирмой Quad Environmental Technologies Corporation. Эта компания занимается разработкой технологии систем промывки аэрозолем

вентиляционных выбросов в системах очистки сточных вод. Ее сотрудниками было установлено, что технология мокрой очистки газов с помощью мелко-дисперсных капель может быть эффективной как для очистки имеющих запах газов, так и при удалении летучих органических веществ. В рамках изучения темы фирмой зарегистрировано много патентов [24, 25, 28–31]. Авторы патентов утверждают, что интенсивность очистки связана с размером капель: чем они меньше, тем эффективнее очистка газов. В устройствах для очистки городских и промышленных сточных вод проведены испытания поставленного фирмой оборудования. Показано, что удаляется более 90 % примесей и токсичность снижается на 89–98 %. Галогенсодержащие углеродные вещества оказались самыми трудными для удаления. Работа была проверена независимым исследовательским центром CH2M of Hills Bellevue, Вашингтон [26]. По мнению исследовательского центра, в работе не определен механизм нейтрализации запахов.

Кроме США по этому направлению есть патенты других стран, например [18].

В последние годы сотрудниками Стэнфордского университета под руководством Р. Заре получены новые результаты исследований свойств мелко-дисперсных капель воды. Экспериментально показано образование пероксида водорода в каплях чистой воды размером 1–250 мкм, вытекающих под давлением из соплового отверстия [22]. Пероксид водорода является сильным окислителем, который может значительно ускорить окисление сероводорода. Авторы предполагают, что образование пероксида происходит в тонком поверхностном двойном электрическом слое капли на границе «вода–воздух» по схеме, представленной на рис. 3. Расположение источника пероксида водорода на поверхности подтверждается измерениями зависимости его концентрации $c_{\text{H}_2\text{O}_2}$ от диаметра капель d_k , которая имеет вид гиперболической функции:

$$c_{\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{\text{const}}{d_k} \sim \frac{F}{V},$$

где F , V – площадь поверхности, м^2 , и объем, м^3 , капли соответственно.

Рис. 3. Схема химических реакций образования пероксида водорода из молекул воды в поверхностном слое капли [22]

Fig. 3. The scheme of chemical reactions of hydrogen peroxide formation from water molecules in the surface layer of a drop [22]



Для образования H_2O_2 не требуется кислород воздуха или кислород, растворенный в воде. Другой важный вывод заключается в увеличении количества пероксида с возрастанием влажности воздуха. Такой же результат был получен в работе [17], где установлено образование H_2O_2 в микрокаплях тумана диаметром около 7 мкм с переменной относительной влажностью. Туман образовывался путем ультразвуковой кавитации воды при мало изменяющейся комнатной температуре (20–25 °С). Обнаружено, что концентрация пероксида водорода изменяется почти линейно от 2 до 6 частей на миллион при изменении относительной влажности в пределах 24–52 %.

Самообразование пероксида водорода в воде известно для многих других механических процессов. Изучено самообразование H_2O_2 в воде под действием звука. Такой процесс называют сонолиз. H_2O_2 появляется в водопадах, прибрежных волнах, при движении воды в трубах и мешалках, при обратном осмосе [27].

Сотрудниками института океанологии им. П.П. Ширшова РАН определена общая причина этих процессов, заключающаяся в механическом воздействии напряжения сдвига внутри воды – следствие ее 2-структурности, т. е. наличия в ней сравнительно крупных ассоциатов, в которых может происходить разрыв валентной связи Н-ОН с образованием радикалов Н· и ОН· [6]. Сравнение, проведенное П.А. Стунжасом [13], показывает много общего между механо-химической нестабильностью воды и результатами исследований в Стенфорде, но есть и разница.

В следующей работе, проведенной под руководством Заре [19], пероксид водорода был обнаружен в каплях, конденсируемых на поверхности твердой подложки без внешнего механического воздействия. Авторы этой работы считают причиной образования H_2O_2 контактную электризацию, при которой происходит обмен электронами, создающий гидроксильные радикалы. Кроме того, отмечен важный факт отсутствия образования пероксида, если нет конденсации на уже сформировавшейся капле.

Рассмотрим возможность самообразования H_2O_2 на поверхности мелких капель с учетом энергетике этого процесса.

На образование пероксида водорода из воды, в соответствии с законом Гессе, требуется значительная энергия. Это эндотермическая реакция:

$$285,8 - 120,4 = 165,4 \text{ кДж/моль.}$$

В отсутствие катализатора также требуется компенсировать энергию активации.

Образование пероксида водорода на поверхности капель может проходить следующим образом. Молекулы с высокой энергией образуются случайно в соответствии с распределением Максвелла. В группе молекул есть меньшая часть с высокой температурой, достаточной для химической реакции, и большая часть с низкой температурой. После химической реакции в этой части поверхности температура становится меньше средней, что приводит к неравномерности парциального давления паров воды над поверхностью и к неравномерности интенсивности конденсации по площади поверхности капли. От температуры зависит поверхностное натяжение, оно увеличивается с уменьшением температуры. Неравномерность распределения температуры по поверхности капли может создавать касательное напряжение сдвига, сжатие охлажденного участка. В результате вероятно возникновение локальной термомеханической деформации ассоциатов водной структуры двойного электрического слоя поверхности капли в месте протекания химической реакции, которая позволяет ускорить образование H_2O_2 . Возможно, открытый Заре эффект образования пероксида водорода в чистой воде является частным случаем теории Г.А. Домрачева и Д.А. Селивановского [6] с той разницей, что деформация термомеханическая.

Для продолжения эндотермической реакции должна быть компенсирована затрачиваемая энергия. Поскольку энергия, забираемая реакцией, поглощается на поверхности, то ее компенсация может быть достигнута переносом тепла извне посредством конденсации паров воды. Энергия конденсации пара – 42,5 кДж/моль при температуре 60 °С. Для образования 1 молекулы пероксида водорода необходимо сконденсировать минимум 4–5 молекул пара воды. В отсутствие конденсации температура поверхности падает и образование пероксида прекращается, что соответствует результатам экспериментов Заре.

Повышение интенсивности образования H_2O_2 при постоянной температуре воздуха с ростом влажности можно объяснить увеличением температуры поверхности капли, которая определяется тепловым равновесием. Дальнейший рост температуры поверхности в парогазовой среде, необходимый для повышения скорости образования пероксида водорода, может быть достигнут при более высоком давлении насыщенных паров воды.

Учитывая проведенный анализ, можно рассматривать образование пероксида водорода как основную причину высокой интенсивности окисления сероводорода в наших испытаниях газоочистной установки. Эксперименты Стенфордского университета показали, что H_2O_2 образуется на поверхности капель любого размера, но после диффузии в объем его концентрация возрастает больше в мелких каплях (3). Скорость окисления сероводорода пропорциональна концентрации реактива, поэтому скорость окисления в каплях 5 мкм в 100 раз больше, чем в каплях 500 мкм, которыми орошались наши скрубберы. Окисление сероводорода в мелких каплях при орошении дымовых газов СРК в скрубберах ЭСВ косвенно подтверждалось тем, что не было обнаружено сульфидной серы в орошающем растворе – ни на входе в скруббер, ни на выходе из него.

Температура дымовых газов, насыщенных парами воды, после 1-й ступени была 65 °С, а после 2-й – 62 °С, что на 40 °С больше, чем в опытах Заре. В соответствии с правилом Ван-Гоффа увеличение скорости химической реакции на каждые 10 °С повышает скорость реакции не менее чем в 2 раза. Концентрация пероксида в мелких каплях могла быть более высокой, чем в опытах Заре.

Проведенный анализ позволил нам прийти к заключению, что эффект интенсивного окисления и высокая степень улавливания сероводорода дымовых газов связаны с тем, что сероводород улавливался в мелких каплях конденсата, там же окислялся пероксидом водорода и только после этого попадал в орошающий раствор в результате инерционного улавливания мелких капель крупными при форсуночном орошении.

Рассмотренный механизм эффекта высокой степени очистки дымовых газов от сероводорода раствором с низким значением рН, полученного на установке очистки дымовых газов СРК, подтверждают испытания этой же установки в других условиях. При снижении концентрации пыли на входе в скруббер эффективность улавливания сероводорода снизилась до 56 %, а при дополнительном отключении охлаждения орошающего раствора – до 36 %. Полученные результаты подтверждают значимость для улавливания сероводорода количества сульфатной пыли и конденсации паров воды, а следовательно, высокую вероятность образования пероксида водорода в мелкодисперсных каплях конденсата.

Выводы

1. Дано научное обоснование эффекта интенсивного окисления сероводорода в промышленной установке очистки дымовых газов содорегенерационного котла от сероводорода на основе результатов современных исследований.

2. Теоретически установлена возможность образования пероксида водорода в результате термомеханической деформации поверхностного слоя мелких капель при их конденсации.

3. Обоснована возможность использования оборотной воды для улавливания сероводорода вместо раствора каустической соды с рН 12–13, что не-

сравнимо дешевле и может решить важные социальные задачи предприятий, их персонала и местного населения.

4. Данные проведенных испытаний реальной промышленной установки существенно отличаются от результатов лабораторных исследований. Поэтому представленный анализ требует экспериментального подтверждения и выполнения лабораторных исследований технологических условий достижения эффекта высокой степени окисления сероводорода как в дымовых газах содорегенерационного котла, так и в условиях других источников выбросов производства целлюлозы для разработки новой эффективной технологии и нового оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анишкин С.В. Конденсация сульфатной пыли дымовых газов содорегенерационных котлов в струйном газопромывателе // Вестн. СПГУТД. Сер. 1: Естеств. и техн. науки. 2018. № 3. С. 81–83.

Aniskin S.V. Condensation of Sulphate Dust of Flue Gases of Sodoregeneration Boilers in a Jet Gas Washer. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Science*, 2018, no. 3, pp. 81–83. (In Russ.).

2. Анишкин С.В., Куров В.С. Полидисперсная модель эжекции газа в прямоточных распылительных аппаратах вытеснения целлюлозного производства // Вестн. СПГУТД. Сер. 4: Пром. технологии. 2021. № 4. С. 91–102.

Aniskin S.V., Kurov V.S. Polydisperse Model of Gas Ejection in Direct-Flow Atomizing Devices of Pulp Production Displacement. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*, 2021, no. 4, pp. 91–102. (In Russ.). https://doi.org/10.46418/2619-0729_2021_4_11

3. Анишкин С.В., Яковлев В.А., Телюкин Г.В. Реконструкция установки для очистки дымовых газов // Бум. пром-сть. 1989. № 6. С. 12–13.

Aniskin S.V., Yakovlev V.A., Telyukin G.V. Reconstruction of the Flue Gas Purification Plant. *Bumazhnaya promyshlennost'*, 1989, no. 6, pp. 12–13. (In Russ.).

4. Вилесов Н.Г. О некоторых особенностях взаимодействия сернистого ангидрида с сероводородом во влажных газах // Журн. приклад. химии. 1980. Т. 53, № 1. С. 2401–2403.

Vilesov N.G. On Some Features of the Interaction of Sulfur Dioxide with Hydrogen Sulfide in Wet Gases. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1980, vol. 53, no. 1, pp. 2401–2403. (In Russ.).

5. Дело № А78-4663/2020 о выбросах Селенгинского целлюлозно-бумажного комбината. Режим доступа: <http://www.chita.arbitr.ru> (дата обращения: 25.09.24).

Case no. A78-4663/2020 on the Emissions from the Seleginsk Pulp and Paper Mill. Available at: <http://www.chita.arbitr.ru> (accessed 25.09.24). (In Russ.).

6. Домрачев Г.А., Селивановский Д.А. Роль звука и жидкой воды как динамически нестабильной полимерной системы в небиогенном происхождении кислорода и возникновении жизни на Земле. Препринт № 1. Горький: ИМХ АН СССР. 1990. 17 с.

Domrachev G.A., Selivanovsky D.A. *The Role of Sound and Liquid Water as a Dynamically Unstable Polymer System in the Non-Biogenic Origin of Oxygen and the Emergence of Life on Earth*. Preprint no. 1. Gorky, Institute of Organometallic Chemistry of the USSR Academy of Sciences, 1990. 17 p. (In Russ.).

7. Косиченко Ю.М., Сильченко В.Ф. Технологии удаления сероводорода в процессе обработки подземных вод // Экология и вод. хоз-во. 2020. № 1(04). С. 43–59.

Kosichenko Yu.M., Silchenko V.F. Hydrogen Sulfide Removal Technologies in Groundwater Treatment. *Ekologiya i vodnoe khozyajstvo = Ecology and Water Management*, 2020, no. 1(04), pp. 43–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-1-43-59>

8. Латынина С. Группа «Илим» приговорила Братск к вечному запаху метилмеркаптана // МК-Байкал. 16.12.2014. Режим доступа: <https://baikal.mk.ru/articles/2014/12/16/gruppa-ilm-prigovorila-bratsk-k-vechnomu-zapakhu-metilmerkaptana.html> (дата обращения: 19.09.24).

Latynina S. The "Ilim" Group Has Condemned Bratsk to the Eternal Smell of Methylmercaptan. *MK-Baikal*, 16.12.2014. (In Russ.).

9. Марьяш С.А., Дровозова Т.И. Очистка подземных вод, содержащих сероводород, пероксидом водорода // Инженер. вестн. Дона. 2017. № 4(47). Ст. № 176. Режим доступа: vdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4444 (дата обращения: 19.09.24).

Mariach S.A., Drovovozova T.I. Purification of Hydrogen Sulfide-Containing Groundwater by Hydrogen Peroxide. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2017, no. 4(47), art. no. 176. (In Russ.).

10. Мошкова Н. Больше не «горячая точка»! Производство, которое заботится об экологии // АиФ Архангельск. 04.03.2020. Режим доступа: https://arh.aif.ru/money/bolshe_ne_goryachaya_tochka_proizvodstvo_kotoroe_zabotitsya_ob_ekologii (дата обращения: 19.09.24).

Moshkova N. No Longer a "Hot Spot"! Production that Cares about the Environment. *AiF Arkhangelsk*, 04.03.2020. (In Russ.).

11. Наилучшие существующие технологии в целлюлозно-бумажной промышленности: сб. Ч. 1, 2. СПб.: Экология и бизнес, 2004.

The Best Available Technologies in the Pulp and Paper Industry: Collection. Part 1, 2. St. Petersburg, *Ekologiya i biznes Publ.*, 2004. 509 p. (In Russ.).

12. Обнародованы результаты эко-экспертизы, проведенной по требованиям жителей Сегежи // КарелИнформ. 10.09.2020.

The Results of the Eco-Expertise Conducted at the Request of Segezha Residents Have Been Made Public. *Karelinform*. 10.09.2020. (In Russ.).

13. Стунжас П.А. Механохимическая нестабильность воды // Физика водных растворов: сб. тр. Второй всерос. конф. М., 2019. С. 28–30.

Stunzhas P.A. Mechanochemical Instability of Water. *Fizika vodnykh rastvorov = Physics of Aqueous Solutions: Book of Abstracts of the 2nd Russian Conference*. Moscow, 2019, pp. 28–30. (In Russ.).

14. Фесенко Л.Н., Бабаев А.А., Игнатенко С.И., Черкесов А.Ю. Каталитическая очистка воды от сероводорода кислородом методом сухой фильтрации на антрацитовый загрузке // Водоснабжение и водоотведение: качество и эффективность: сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: ЭКСПО-Сибирь, 2008. С. 55–60.

Fesenko L.N., Babaev A.A., Ignatenko S.I., Cherkesov A.Yu. Catalytic Purification of Water from Hydrogen Sulfide with Oxygen by Dry Filtration on Anthracite Medium. *Water Supply and Sanitation: Quality and Efficiency*: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Kemerovo, EKSP0 Sibir' Publ., 2008, pp. 55–60. (In Russ.).

15. Широков Ю.А. Экологическая безопасность на предприятии. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 360 с.

Shirokov Yu.A. *Environmental Safety at the Enterprise*. 3rd ed., reprint. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022. 360 p. (In Russ.).

16. Яковлев В.А., Григорьева Н.В., Макаренко В.А., Верх Е.А., Полторацкий Г.М. Изучение равновесий, имеющих место при абсорбции серосодержащих соединений из газовых выбросов ЦБП // Изв. вузов. Лесн. журн. 1991. № 2. С. 91–93.

Yakovlev V.A., Grigorieva N.V., Makarenko V.A., Verkh E.A., Poltoratsky G.M. The study of Equilibria Occurring during the Absorption of Sulfur-Containing Compounds from Gas Emissions of the Pulp and Paper Industry. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1991, no. 2, pp. 91–93. (In Russ.).

17. Dulay M.T., Huerta-Aguilar C.A., Chamberlayne C.F., Zare R.N., Davide A., Vukovic S. Effect of Relative Humidity on Hydrogen Peroxide Production in Water Droplets. *QRB Discovery*, 2021, vol. 2, art. no. e8. <https://doi.org/10.1017/qrd.2021.6>
18. Katsuhiko K., Takayuki F. *Gas Purification Method*. Patent Japan no. 3-109, 1991.
19. Lee J.K., Han H.S., Chaikasetin S., Marron D.P., Waymouth R.M., Prinz F.B., Zare R.N. Condensing Water Vapor to Droplets Generates Hydrogen Peroxide. *PNAS*, 2020, vol. 117(49), pp. 30934–30941. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020158117>
20. Lee J.K., Samanta D., Nam H.G., Zare R.N. Micrometer-Sized Water Droplets Induce Spontaneous Reduction. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, vol. 141, iss. 27, pp. 10585–10589. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b03227>
21. Lee J.K., Samanta D., Nam H.G., Zare R.N. Spontaneous Formation of Gold Nano-Structures in Aqueous Microdroplets. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, art. no. 1562. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04023-z>
22. Lee J.K., Walker K.L., Han H.S., Kang J., Prinz F.B., Waymouth R.B., Nam H.G., Zare R.N. Spontaneous Generation of Hydrogen Peroxide from Aqueous Micro-droplets. *PNAS*, 2019, vol. 116(39), pp. 19294–19298. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911883116>
23. Mondal S., Acharya S., Biswas R., Bagchi B., Zare R.N. Enhancement of Reaction Rate in Small-Sized Droplets: A Combined Analytical and Simulation Study. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, vol. 148, iss. 24, art. no. 244704. <https://doi.org/10.1063/1.5030114>
24. Rafson H.J. *Method for Removing Volatile Organic Compounds from Air Streams*. Patent US no. 4844874, 1990.
25. Rafson H.J., Vries de E. *Apparatus for Neutralizing Odors*. Patent US no. 4308040, 1981.
26. Study Reveals Benefits of Atomized Mist Scrubbing at Waste Water Plants. *Water and Sewage International*, 1991, no. 13, art. no. 12.
27. Veselov Yu.S. Effect of Hydrogen Peroxide Accumulation at Reverse-Osmosis Freshening of Seawater Desalination. *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, 1991, vol. 13, no. 8, pp. 741–745.
28. Vries de E. *Condensation*. Patent US no. 4308241, 1981.
29. Vries de E. *Method and Means of Operating Mist Scrubber*. Patent US no. 4844874, 1989.
30. Vries de E. *Removal of Odors from Gas Streams*. Patent US no. 4238461, 1980.
31. Vries de E. *Two-Stage Odor Control System*. Patent US no. 4416861, 1983.
32. Wei Z., Li Y., Cooks G., Yan X. Accelerated Reaction Kinetics in Microdroplets: Overview and Recent Developments. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2020, vol. 71, pp. 31–51. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-121319-110654>
33. Xiong H., Lee J.K., Zare R.N., Min W. Strong Electric Field Observed at the Interface of Aqueous Microdroplets. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, vol. 11, iss. 17, pp. 7423–7428. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c02061>

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 66-935.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-203-213

Результаты исследования взаимосвязи вязкости и механической прочности блененой лиственной сульфатной целлюлозы

Т.А. Королева¹✉, канд. техн. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-5651-2020](https://orcid.org/0000-0002-9477-5864),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-5864>

В.В. Медведев², инж.; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

Ю.В. Помелов³, нач. участка диоксида хлора; ResearcherID: [KHU-2203-2024](https://orcid.org/0009-0004-1019-9495),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1019-9495>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; tataak@mail.ru✉

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; parker2005@mail.ru

³АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская обл., Россия, 164900; pomelov.yuri@appm.ru

Поступила в редакцию 09.04.24 / Одобрена после рецензирования 27.06.24 / Принята к печати 30.06.24

Аннотация. Проведена оценка взаимосвязи вязкости и механической прочности промышленных образцов лиственной сульфатной блененой целлюлозы. Для производства данного вида полуфабриката использовали древесину березы и осины, которая была заготовлена на территории Северо-Западного региона Российской Федерации. Вязкость раствора высокомолекулярных полимеров дает представление о средней длине волокон и, соответственно, об их степени деструкции. В свою очередь, от длины волокна в значительной мере зависят механические свойства волокнистого полуфабриката и прочность изготовленной из него продукции. В связи с тем, что для определения вязкости раствора высокомолекулярных полимеров требуется не более 2 ч, а для получения стандартных характеристик механической прочности 8–10 ч, анализ вязкости можно считать экспресс-методом, дающим информацию о механической прочности полуфабриката. В представленной работе вязкость полуфабриката определялась в соответствии с международным стандартом ISO 5351:2010 в растворе куприэтилендиамина. Для промышленных образцов лиственной блененой сульфатной целлюлозы с вязкостью более 800 мл/г были выявлены высокие значения характеристик механической прочности. Для образцов целлюлозы установлена корреляционная связь только между числом двойных перегибов и вязкостью. Дальнейшее исследование выполнено для образцов блененой лиственной сульфатной целлюлозы с различной степенью деструкции волокна, которые были изготовлены при варьировании параметров обработки гипохлоритом натрия. Результаты позволили получить диапазон значений критической вязкости для блененой лиственной сульфатной целлюлозы, который составил 600...700 мл/г, и полиномиальную зависимость между сопротивлением раздиранию, разрывной длиной, числом двойных перегибов и вязкостью при высоком коэффициенте достоверности аппроксимации данных – не менее 0,89. Показано, что вязкость может стать аналитическим инструментом в экспресс-диагностике механической прочности волокнистого полуфабриката на

промежуточных стадиях производства бленной лиственной сульфатной целлюлозы и при контроле качества готового полуфабриката.

Ключевые слова: сульфатная целлюлоза, отбелка, вязкость целлюлозы, характеристики механической прочности, гипохлорит натрия

Для цитирования: Королева Т.А., Медведев В.В., Помелов Ю.В. Результаты исследования взаимосвязи вязкости и механической прочности бленной лиственной сульфатной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 203–213. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-203-213>

Original article

The Results of the Study of the Relationship between Viscosity and Mechanical Strength of Bleached Hardwood Kraft Pulp

*Tatiana A. Koroleva*¹✉, Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [ABB-5651-2020](https://orcid.org/0000-0002-9477-5864), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-5864>

*Vasily V. Medvedev*², Engineer; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

*Yuri V. Pomelov*³, Chlorine Dioxide Section Manager; ResearcherID: [KHU-2203-2024](https://orcid.org/0009-0004-1019-9495),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1019-9495>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prosp., 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; tataak@mail.ru✉

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; parker2005@mail.ru

³Arkhangelsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk Region, 164900, Russian Federation; pomelov.yuri@ppm.ru

Received on April 9, 2024 / Approved after reviewing on June 27, 2024 / Accepted on June 30, 2024

Abstract. An assessment has been made of the relationship between viscosity and mechanical strength of industrial samples of bleached hardwood kraft pulp. To produce this type of semi-finished product, birch and aspen wood has been used, which has been harvested in the Northwestern region of the Russian Federation. The viscosity of a solution of high-molecular polymers provides an idea of the average length of the fibers and, accordingly, their degree of destruction. In turn, the mechanical properties of the fibrous semi-finished product and the strength of the products made from it largely depend on the length of the fiber. Since it takes no more than 2 hours to determine the viscosity of a solution of high-molecular polymers, and 8–10 hours to obtain standard mechanical strength characteristics, viscosity analysis can be considered an express method that provides information on the mechanical strength of a semi-finished product. In this work, the ISO 5351:2010 international standard in cupriethylenediamine solution has been used to analyze the viscosity of the semi-finished product. High values of mechanical strength characteristics have been detected for industrial samples of bleached hardwood kraft pulp with a viscosity of more than 800 ml/g. For pulp samples, a correlation has been established only between the number of double folds and viscosity. Further research has been carried out on samples of bleached hardwood kraft pulp with different degrees of fiber destruction, which have been produced with varying the parameters of sodium hypochlorite treatment. The results have made it possible to establish



a range of critical viscosity values for bleached hardwood kraft pulp, which has amounted to 600...700 ml/g, and a polynomial relationship between tear resistance, breaking length, a number of double folds and viscosity with a high confidence coefficient of data approximation of no less than 0.89. It has been shown that viscosity can become an analytical tool in the express diagnostics of the mechanical strength of a fibrous semi-finished product at the intermediate stages of production of bleached hardwood kraft pulp and in quality control of the ready-made semi-finished product.

Keywords: kraft pulp, bleaching, pulp viscosity, mechanical strength characteristics, sodium hypochlorite

For citation: Koroleva T.A., Medvedev V.V., Pomelov Yu.V. The Results of the Study of the Relationship between Viscosity and Mechanical Strength of Bleached Hardwood Kraft Pulp. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 203–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-203-213>

Введение

Беленая лиственная сульфатная целлюлоза (БЛСЦ) является востребованным товарным продуктом на мировом рынке лесной индустрии [4]. В Российской Федерации данный вид полуфабриката остается основным сырьем для производства писчих и печатных видов бумаг. Химико-технологический процесс получения БЛСЦ предполагает множество окислительно-восстановительных превращений древесной лигноуглеводной матрицы, направленных на удаление лигнина, сохранение целлюлозных волокон и придания им определенных свойств.

Целлюлоза и гемицеллюлозы древесины в условиях химической переработки подвержены реакциям модификации и деполимеризации [1, 17], что приводит к потере прочности волокнистого полуфабриката и, соответственно, снижению объема производства.

На ступенях варки и отбелки механическую прочность полуфабриката оценивают по стандартным характеристикам: прочности на разрыв и удлинению при растяжении с постоянной скоростью (разрывная длина), сопротивлению раздиранию, прочности на излом при многократных перегибах (число двойных перегибов). Продолжительность определения характеристик механической прочности составляет 10–12 ч. Временной график лабораторных испытаний и последовательность технологических ступеней не дают возможности согласовывать оперативное регулирование технологических параметров, главным образом температуры и расхода химических реагентов, в соответствии с полученными лабораторными данными.

Необходим метод, который позволил бы прогнозировать механическую прочность волокнистых полуфабрикатов за меньшее время, что в итоге сделало бы производственный процесс более гибким и экономичным. Такой экспресс-метод существует. Примерно с 1940 г. прочность и степень деструкции волокон оценивали по вязкости полуфабриката в медно-аммиачном растворе [9, 13]. Продолжительность данного метода не превышает 2 ч, и он нашел широкое применение при производстве целлюлозы, предназначенной для дальнейшей

химической переработки. Растворы волокнистых полимеров находятся в двухфазном жидкокристаллическом состоянии и, как правило, относятся к неньютоновским системам [3]. Такие системы характеризуются повышением вязкости из-за обилия водородных связей внутри и между молекулярными углеводными цепями, а также дисперсионного и диполь-дипольного взаимодействия [2, 18]. Сегодня для определения вязкости волокнистых полуфабрикатов используют раствор куприэтилендиамина [12], в силу того что он более устойчив, чем раствор медноаммиачного комплекса, и окисление целлюлозы в нем значительно меньше [15].

Вязкость раствора высокомолекулярных полимеров дает представление о средней длине волокон и, соответственно, об их степени деструкции [10, 14]. В свою очередь, между морфологическими характеристиками волокна и физико-механическими свойствами волокнистого полуфабриката, бумаги и картона существует тесная взаимосвязь [5, 8, 11]. Длина волокна в значительной мере определяет механические свойства волокнистого полуфабриката и прочность изготовленной из него продукции. Наличие корреляционной связи между длиной волокна и индексом разрыва установлено для небеленой лиственной (НЛСЦ) и хвойной сульфатной целлюлозы [10, 14]. Также была обнаружена корреляционная зависимость между вязкостью и сопротивлением продавливанию, раздиранию для НЛСЦ. Для небеленой хвойной сульфатной целлюлозы – между вязкостью и разрывной длиной, сопротивлением продавливанию и прочностью на излом при многократных перегибах [5]. Определены критические значения вязкости в растворе куприэтилендиамина для НЛСЦ – это 1000...1100 мл/г – и небеленой хвойной сульфатной целлюлозы – 900...950 мл/г. При вязкости ниже критической наблюдается резкое уменьшение прочностных свойств полуфабриката [5].

Тема взаимосвязи между вязкостью беленой лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы и ее прочностными характеристиками была затронута в ряде работ зарубежных авторов [10, 11, 16]. Для беленой сульфатной целлюлозы также были установлены критические значения вязкости: для лиственной – 630...800 мл/г, для хвойной – 800...915 мл/г [10].

Таким образом, приведенная информация свидетельствует о возможности использования вязкости волокнистого полуфабриката в качестве характеристики, прогнозирующей его прочностные свойства. В то же время химические, физико-механические свойства волокнистого полуфабриката и морфологические характеристики волокна зависят от множества факторов: географии происхождения древесины, породы древесного сырья и условий его хранения, качества производственной воды, применяемых технологий варки и отбелики и т. п. Поэтому применение вязкости в предложенном качестве требует индивидуального лабораторного исследования, ограниченного такими условиями, как вид волокнистого полуфабриката, используемые древесное сырье и технология его переработки.

Цель работы – изучение взаимосвязи вязкости и прочностных свойств БЛСЦ, полученной из древесины, заготовленной на территории Северо-Западного региона, и возможности использования данных о вязкости для диагностики прочностных свойств БЛСЦ.

Объекты и методы исследования

Образцы БЛСЦ были отобраны на одном из целлюлозно-бумажных предприятий Северо-Западного региона России. Древесное сырье для производства БЛСЦ включало 60 % березы и 40 % осины. Согласно регламенту предприятия, в перечень характеристик контроля качества небеленой и беленой целлюлозы включены: число Каппа для небеленой целлюлозы, яркость для беленой целлюлозы и показатели механической прочности: разрывная длина, сопротивление раздиранию и число двойных перегибов – для обоих видов полуфабрикатов. Периодичность производственного контроля характеристик механической прочности полуфабриката составляет 12 ч, его осуществляют в соответствии с временным графиком прохождения целлюлозной массы от участка хранения небеленой целлюлозы до участка хранения беленой целлюлозы. Схема отбора проб была согласована с регламентом предприятия, для каждого образца целлюлозы фиксировали производственные данные по перечисленным показателям качества исходной небеленой и беленой целлюлозы. Всего отобрано 65 образцов БЛСЦ. Все они разбиты на 6 групп по числу Каппа исходной небеленой целлюлозы в интервале от 12,0 до 14,5: 12,0 (5 образцов), 12,5 (6 образцов), 13,0 (12 образцов), 13,5 (6 образцов), 14,0 (14 образцов), 14,5 (6 образцов). В каждой группе выбрано по 2 образца со стабильными числами Каппа и механической прочностью. Для этих образцов определена вязкость в растворе куприэтилendiамина с использованием капиллярного вискозиметра по международному стандарту ISO 5351:2010 (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики качества лиственной сульфатной целлюлозы до и после отбелки
The quality characteristics of hardwood kraft pulp before and after bleaching

№ образца	НЛСЦ				БЛСЦ				
	Число Каппа	Разрывная длина, км	Сопротивление раздиранию, мН	Число двойных перегибов	Яркость, %	Разрывная длина, км	Сопротивление раздиранию, мН	Число двойных перегибов	Вязкость, мЛ/г
1	12,0	9,7	56	1710	89,5	9,1	65	910	816
2	12,0	8,9	58	1560	89,0	8,6	57	720	815
3	12,5	10,3	55	1510	89,5	8,8	57	1260	922
4	12,5	9,7	60	1750	89,5	8,7	62	1120	930
5	13,0	10,5	54	1780	89,0	9,2	57	1180	997
6	13,0	9,5	55	1420	89,5	8,8	65	1080	950
7	13,5	8,7	56	1800	89,0	7,0	58	1230	900
8	13,5	9,5	55	1720	90,0	8,9	59	1210	980
9	14,0	10,1	50	1600	89,0	9,0	57	1080	930
10	14,0	10,1	58	1620	90,0	8,5	66	1100	993
11	14,5	10,9	57	1730	89,0	9,7	59	1270	980
12	14,5	9,0	55	1900	89,5	9,7	62	1350	1020

В процессе анализа полученных данных (рис. 1) для образцов БЛСЦ с достаточно высокими механической прочностью и вязкостью не выявлены взаимосвязи между сопротивлением раздиранию, разрывной длиной и вязкостью.

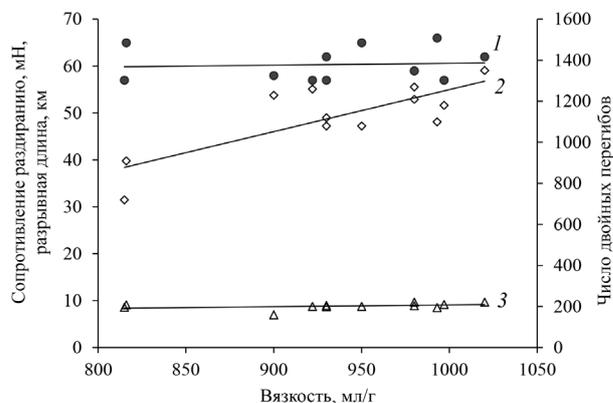


Рис. 1. Предварительные данные взаимосвязи вязкости и механической прочности блененой лиственной сульфатной целлюлозы (1 – вязкость / сопротивление раздиранию; 2 – вязкость / число двойных перегибов; 3 – вязкость / разрывная длина)

Fig. 1. The preliminary data on the relationship between viscosity and mechanical strength of bleached hardwood kraft pulp (1 – viscosity / tear resistance; 2 – viscosity / number of double folds; 3 – viscosity / tear length)

Корреляционная связь была обнаружена только между вязкостью и числом двойных перегибов с достоверностью 0,63 при уровне значимости 0,01 [19]. Высокие механическая прочность БЛСЦ и вязкость полуфабриката свидетельствуют об относительно незначительной степени деструкции целлюлозных волокон.

Для поиска интервала значений, в которых возможно выявление зависимости вязкости и механической прочности, было принято решение о проведении дополнительных лабораторных обработок, обеспечивающих принудительную деградацию углеводной составляющей волокнистого полуфабриката. Для этой цели были выбраны химический реагент – гипохлорит натрия (NaClO) – и специальные условия обработки БЛСЦ: концентрация массы – 8 % при pH 6...7 [6, 7], расход гипохлорита натрия – 8...15 кг/т в ед. активного хлора, температура – 65...85 °C, продолжительность – 60...180 мин (табл. 2).

Таблица 2

Условия обработки блененой лиственной сульфатной целлюлозы гипохлоритом натрия

The conditions for treating bleached hardwood kraft pulp with sodium hypochlorite

№ образца	Расход NaClO , кг/т в ед. активного хлора	Температура, °C	Продолжительность, мин
2	8,0	65	60
3	7,0	85	60
4	10,0	85	60
5	12,5	85	90
6	15,0	85	60
7	15,0	85	90
8	15,0	85	120
9	15,0	85	180

Обработку гипохлоритом натрия проводили в герметично закрытых стеклянных банках, которые погружали в емкость лабораторной бани ЭКРОС ПЭ-4310, заполненной водой. Регулирование температуры в емкости бани осуществлялось автоматически.

Производственный образец целлюлозы, не предназначенный для проведения обработок NaClO , был отобран после ступеней отбеливания D_{01} (диоксид хлора) – D_{02} (диоксид хлора) – ЩП_1 (пероксид водорода в щелочных условиях) – D_1 (диоксид хлора) – ЩП_2 (пероксид водорода в щелочных условиях) и имел следующие характеристики: вязкость – 1000 мл/г, разрывная длина – 9 км, сопротивление раздиранию – 57 мН, число двойных перегибов – 1420. Данному образцу был присвоен номер 1.

Образцы БЛСЦ были размолоты на аппарате центробежного действия до 60° ШР при концентрации массы 6 %. Отливки массой 75 г/м^2 для механических испытаний изготовлены на листоотливном аппарате. Сопротивление раздиранию оценивали в соответствии с ГОСТ 13525.3–97 «Полуфабрикаты волокнистые и бумага. Метод определения сопротивления раздиранию (метод Эльмендорфа)», прочность на излом при многократных перегибах (ч.д.п.) – в соответствии с ГОСТ ИСО 5626–97 «Бумага. Определение прочности на излом при многократных перегибах (методы Шоппера, Ломаржи, Келер-Молина, М1Т)», разрывную длину – по ГОСТ 13525.1–79 «Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении».

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания лабораторных образцов показали (табл. 3, рис. 2), что увеличение расхода гипохлорита натрия, температуры и продолжительности обработки приводит к общему снижению вязкости и прочностных свойств БЛСЦ. Значимое уменьшение механической прочности было зафиксировано для образца № 6 при снижении вязкости целлюлозы до 500 мл/г.

Таблица 3

Экспериментальные данные о характеристиках механической прочности образцов целлюлозы после обработки гипохлоритом натрия
The experimental data on the mechanical strength characteristics of pulp samples after treatment with sodium hypochlorite

№ образца	Вязкость, мл/г	Разрывная длина, км	Сопротивление раздиранию, мН	Число двойных перегибов
1	1000	9,0	57	1420
2	900	8,8	58	1100
3	850	8,8	53	1120
4	700	8,7	50	1010
5	600	8,7	48	880
6	500	8,4	42	730
7	500	8,4	41	580
8	500	8,4	40	470
9	500	8,3	33	290

Сопротивление раздиранию снижалось незначительно, и только увеличение продолжительности обработки от 150 до 180 мин привело к его резкому уменьшению до 33 мН (образец № 9). Максимальное снижение числа двойных перегибов (до 22,5 %) было зафиксировано после первой обработки, ужесточение условий в каждой последующей обработке сопровождалось падением этого показателя в среднем на 8,5 % (образец № 2).

Изменение вязкости полуфабриката отличалось от поведения характеристик механической прочности. На рис. 2 хорошо видно, что при достижении вязкости 500 мл/г (образец № 6) последующее ужесточение условий обработки, а именно увеличение продолжительности от 60 до 180 мин при постоянных расходе NaClO 15 кг/т и температуре 85 °С (образцы № 7–9), не привело к ее дополнительному снижению.

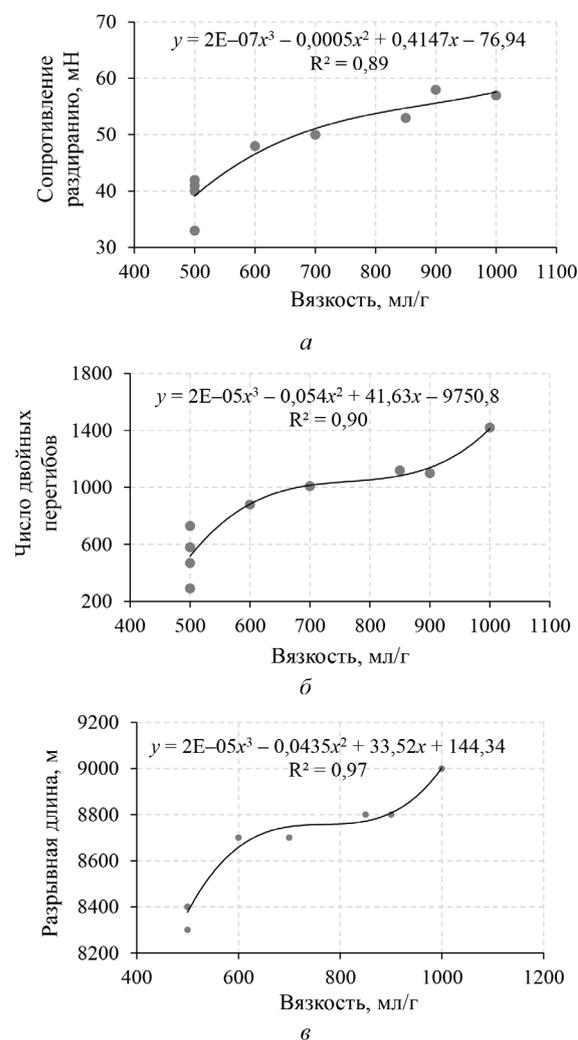


Рис. 2. Взаимосвязь вязкости и механической прочности бленой лиственной сульфатной целлюлозы: *а* – вязкость / сопротивление раздиранию; *б* – вязкость / число двойных перегибов; *в* – вязкость / разрывная длина

Fig. 2. The relationship between viscosity and mechanical strength of bleached hardwood kraft pulp: *a* – viscosity / tear resistance; *б* – viscosity / number of double folds; *в* – viscosity / breaking length

Здесь следует обратить внимание на то, что при достижении вязкости 500 мл/г сопротивление раздиранию в образцах № 6–9 и число двойных перегибов в образце № 9 достигли 33–42 мН и 290 соответственно, и эти значения ниже приведенных в ГОСТ 28172–89 «Целлюлоза сульфатная бленая из смеси

лиственных пород древесины». В то же время при вязкости 600 мл/г в образцах БЛСЦ сопротивление раздиранию и число двойных перегибов превышают требуемые значения, приведенные в этом же ГОСТе для всех марок беленой целлюлозы. Таким образом, резкое снижение механической прочности при падении вязкости БЛСЦ с 600 до 500 мл/г позволило определить критическую вязкость БЛСЦ, которая соответствует диапазону 600...700 мл/г.

Математическая обработка экспериментальных данных показала наличие полиномиальной зависимости между вязкостью и сопротивлением раздиранию, числом двойных перегибов, разрывной длиной с высокими коэффициентами достоверности аппроксимации данных – не менее 0,89.

Заключение

Данные, полученные при проведении лабораторного эксперимента, позволили выявить полиномиальную зависимость между вязкостью беленой лиственной сульфатной целлюлозы и сопротивлением раздиранию, разрывной длиной, числом двойных перегибов при высоком коэффициенте достоверности аппроксимации. Определен диапазон критической вязкости для беленой лиственной сульфатной целлюлозы, который составил 600...700 мл/г. При вязкости 700 мл/г и выше обеспечиваются характеристики механической прочности в соответствии с ГОСТ 28172–89, при вязкости ниже 600 мл/г происходит резкая потеря механической прочности беленой лиственной сульфатной целлюлозы.

Таким образом, показано, что вязкость может стать аналитическим инструментом в экспресс-диагностике механической прочности беленой лиственной сульфатной целлюлозы на стадиях производства, где присутствуют процессы деградации волокна, а именно после кислородно-щелочной обработки и делигнифицирующих ступеней отбелки, а также для контроля качества готового полуфабриката. Это позволит сделать процесс изготовления беленой целлюлозы более гибким и экономичным, кроме того, оценка прочности целлюлозы по вязкости существенно упростит модернизацию схем отбелки в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богомолов Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 399 с.
Bogomolov B.D. *Chemistry of Wood and Basic Chemistry of High Molecular Weight Compounds*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 399 p. (In Russ.).
2. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 438 с.
Vinogradov G.V., Malkin A.Ya. *Rheology of Polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 438 p. (In Russ.).
3. Вшивков С.А., Русинова Е.В., Салех А.С.А. Реологические свойства жидкокристаллических растворов производных целлюлозы // Высокомолекуляр. соединения. Сер. А. 2021. Т. 63, № 4. С. 243–248.
Vshivkov S.A., Rusinova E.V., Abo Saleh A.S. Rheological Properties of Liquid Crystalline Solutions of Cellulose Derivatives. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A = Polymer Science. Series A*, 2021, vol. 63, no. 4, pp. 243–248. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2308112021040088>

4. Камчатова Е.Ю., Перевозчикова А.К. Тенденции развития целлюлозно-бумажной промышленности Российской Федерации // Уч. зап. Рос. акад. предпринимательства. 2022. Т. 21, № 2. С. 43–49.

Kamchatova E.Yu., Perevozchikova A.K. Trends in the Development of the Pulp and Paper Industry of the Russian Federation. *Uchenye zapiski Rossijskoj akademii predprinimatel'stva* = Scientific Notes of the Russian Academy of Entrepreneurship, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2022-21-2-43-49>

5. Карманова Т.Е. Взаимосвязь вязкости сульфатных небеленых целлюлоз с фундаментальными, деформационными и прочностными свойствами: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 143 с.

Karmanova T.E. *Relationship between the Viscosity of Sulfate Unbleached Pulps and Fundamental, Deformation and Strength Properties*: Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2012. 143 p. (In Russ.).

6. Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Севастьянова Ю.В., Казаков Я.В., Белоглазов В.И. Промывка и отбелка целлюлозы. 2-е изд. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 192 с.

Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Sevastyanova Yu.V., Kazakov Ya.V., Beloglazov V.I. *Washing and Bleaching of Pulp*. 2nd ed. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2019. 192 p. (In Russ.).

7. Муллина Э.Р., Чупрова Л.В., Ершова О.В., Лыгина Е.Г., Корниенко Н.Д., Пинчукова К.В. Влияние химической природы отбеливающих реагентов на свойства целлюлозного волокна // Успехи соврем. естествознания. 2015. № 11. С. 74–77.

Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Lygina E.G., Kornienko N.D., Pinchukova K.V. Influence of the Chemical Nature of the Bleaching Reagents on Properties of Cellulose fibre. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2015, no. 11, pp. 74–77. (In Russ.).

8. Anjos O., Santos A.J.A., Simões R., Pereira H. Morphological, Mechanical, and Optical Properties of Cypress Papers. *Holzforschung*, 2014, vol. 68, iss. 8, pp. 867–874. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0125>

9. Annergren G.E. Strength Properties and Characteristics of Bleached Chemical and (Chemi)mechanical Pulps. *Pulp Bleaching: Principles and Practice. Section VII: The Properties of Bleached Pulp*, 1996, chapt. 3, pp. 717–748.

10. Brogdon B.N., Lucia L.A. Kraft Pulp Viscosity as a Predictor of Paper Strength: Its Uses and Abuses. *TAPPI Journal*, 2023, vol. 22, no. 10, pp. 631–643. <https://doi.org/10.32964/TJ22.10.631>

11. Fišerová M., Gigac J., Balberčák J. Relationship between Fibre Characteristics and Tensile Strength of Hardwood and Softwood Kraft Pulps. *Cellulose Chemistry & Technology*, 2010, vol. 44, no. 7–8, pp. 249–253.

12. Hänninen T., Thygesen A., Mehmood S., Madsen B., Hughes M. Mechanical Processing of Bast Fibres: The Occurrence of Damage and its Effect on Fibre Structure. *Industrial Crops and Products*, 2012, vol. 39, pp. 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.025>

13. Lapiere L., Bouchard J., Berry R. On the Relationship between Fibre Length, Cellulose Chain Length and Pulp Viscosity of a Softwood Sulfite Pulp. *Holzforschung*, 2006, vol. 60, no. 4, pp. 372–377. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.058>

14. Lapiere L., Bouchard J., Berry R. The Relationship Found between Fibre Length and Viscosity of Three Different Commercial Kraft Pulps. *Holzforschung*, 2009, vol. 63, iss. 4, pp. 402–407. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.072>

15. Liu J., Zhang J., Zhang B., Zhang X., Xu L., Zhang J., He J., Liu C.-Y. Determination of Intrinsic Viscosity-Molecular Weight Relationship for Cellulose in BmimAc/DMSO Solutions. *Cellulose*, 2016, vol. 23, iss. 4, pp. 2341–2348. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0967-1>

-
16. Oglesby R.J., Moynihan H.J., Santos R.B., Ghosh A., Hart P.W. Does Kraft Hardwood and Softwood Pulp Viscosity Correlate to Paper Properties. *Tappi Journal*, 2016, vol. 15, no. 10, pp. 643–651. <https://doi.org/10.32964/TJ15.10.643>
17. Schaubeder J.B., Spirk S., Fliri L., Orzan E., Biegler V., Palasingh C., Selinger J., Bakhshi A., Bauer W., Hirn U., Nypelö T. Role of Intrinsic and Extrinsic Xylan in Softwood Kraft Pulp Fiber Networks. *Carbohydrate Polymers*, 2024, vol. 323, art. no. 121371. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121371>
18. Seddiqi H., Oliaei E., Honarkar H., Jin J., Geonzon L.C., Bacabac R.G., Klein-Nulend J. Cellulose and its Derivatives: Towards Biomedical Applications. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 1893–1931. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03674-w>
19. Weber E. *Grundriss der Biologischen Statistik*. 4 aufl. Jena, VEB G. Fischer, 1961. 252 p. (In Germ.).

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



Научная статья

УДК 634.71:57.082.261

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-214-226

Совершенствование технологического цикла клонального микроразмножения *Rubus chamaemorus* L.

А.М. Антонов¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [R-4605-2019](https://orcid.org/0000-0002-7076-233X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7076-233X>

А.И. Чудецкий², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

Ю.С. Черятова³, канд. биол. наук, доц.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2225>

И.Б. Кузнецова³, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

Е.И. Куликова⁴, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-8290-2021](https://orcid.org/0000-0002-5981-2690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5981-2690>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; a.antonov@narfu.ru

²Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; a.chudetsky@mail.ru[✉], u.cheryatova@rgau-msha.ru

³Костромская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Учебный городок, д. 34, п. Караваево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; sonnereiser@yandex.ru

⁴Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; elena-kulikova@list.ru

Поступила в редакцию 05.02.24 / Одобрена после рецензирования 06.05.24 / Принята к печати 11.05.24

Аннотация. Приведены результаты исследования микроклонального размножения морошки приземистой (*Rubus chamaemorus* L.) форм Ленинградская и Кондинская на этапах собственно микроразмножения и укоренения микропобегов в культуре *in vitro*. *R. chamaemorus* – одно из самых востребованных болотных ягодных растений стран Северной Европы и северных регионов России, обладающее высокоценными пищевыми и фармакологическими свойствами. Для интенсификации промышленного ягодоводства в России и удовлетворения рыночного спроса на ягодную продукцию в условиях импортозамещения необходимо использование высокотехнологичных способов получения посадочного материала. Для сохранения ценного генофонда и ускоренного производства большого количества оздоровленного посадочного материала форм *R. chamaemorus* требуются совершенствование и оптимизация технологий микроклонального размножения данного вида. Наибольшие число (в среднем 9,6–9,9 шт.) и суммарная длина (16,4–19,5 см) микропобегов *R. chamaemorus* в культуре *in vitro* на этапе

собственно микроразмножения наблюдались на культуральной среде Мурасиге–Скуга. Повышение концентрации препарата «Дропп» от 0,1 до 0,2 мг/л в культуральной среде способствовало увеличению числа микропобегов *R. chamaemorus* (в среднем в 1,8–2,4 раза), их суммарной длины у формы Кондинская (в 1,25 раза) и ее уменьшению у формы Ленинградская (в 1,1 раза). Наибольшее число (в среднем 3,9–4,6 шт.) и суммарная длина (13,2–14,0 см) корней *R. chamaemorus* на этапе укоренения микропобегов *in vitro* отмечены на культуральной среде Мурасиге–Скуга. Повышение концентрации индолилмасляной кислоты от 0,5 до 1,0 мг/л в культуральной среде способствовало росту числа корней (в среднем в 1,4 раза) *R. chamaemorus* и снижению их суммарной длины (в 1,15–1,25 раза).

Ключевые слова: морошка приземистая, лесные ягодные растения, *in vitro*, регуляторы роста, культуральная среда, клональное микроразмножение

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2022-317 от 20 апреля 2022 г. о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

Для цитирования: Антонов А.М., Чудецкий А.И., Черятова Ю.С., Кузнецова И.Б., Куликова Е.И. Совершенствование технологического цикла клонального микроразмножения *Rubus chamaemorus* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 214–226. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-214-226>

Original article

Improving the Technological Cycle of Microclonal Propagation of *Rubus chamaemorus* L.

*Aleksandr M. Antonov*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [R-4605-2019](https://orcid.org/0000-0002-7076-233X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7076-233X>

*Anton I. Chudetsky*², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

*Yuliya S. Cheryatova*², Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2225>

*Irina B. Kuznetsova*³, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

*Elena I. Kulikova*⁴, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAL-8290-2021](https://orcid.org/0000-0002-5981-2690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5981-2690>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; a.antonov@narfu.ru

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; a.chudetsky@mail.ru, u.cheryatova@rgau-msha.ru

³Kostroma State Agricultural Academy, Uchebny Gorodok, Karavayevskaya s/a, 34, Karavaevo Settlement, Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation; sonnereiser@yandex.ru

⁴Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Schmidta, 2, Molochnoe Village, Vologda, Vologda Region, 160555, Russian Federation; elena-kulikova@list.ru

Received on February 5, 2024 / Approved after reviewing on May 6, 2024 / Accepted on May 11, 2024

Abstract. The results of the study of the microclonal propagation of the cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) of the Leningradskaya and Kondinskaya forms at the stages of microclonal propagation itself and rooting of microshoots in *in vitro* culture are presented. *R. chamaemorus* is one of the most popular bog berry plants in the countries of Northern Europe and the northern regions of Russia, possessing highly valuable nutritional and pharmacological properties. In order to intensify industrial berry growing in Russia and meet the market demand for berry products in the context of import substitution, it is necessary to use high-tech methods for obtaining planting material. In order to preserve the valuable gene pool and accelerate the production of a large amount of healthy planting material of *R. chamaemorus* forms, it is necessary to improve and optimize the technologies or microclonal propagation of this species. The largest number (on average 9.6–9.9 pcs.) and the total length (16.4–19.5 cm) of *R. chamaemorus* microshoots in *in vitro* culture at the stage of microclonal propagation itself have been observed on the Murashige and Skoog culture medium. An increase in the concentration of the “Dropp” preparation from 0.1 to 0.2 mg/l in the culture medium has contributed to an increase in the number of *R. chamaemorus* microshoots (on average by 1.8–2.4 times), an increase in their total length in the Konsinskaya form (by 1.5 times) and its decrease in the Leningradskaya form (by 1.1 times). The largest number (on average 3.9–4.6 pcs.) and the total length (13.2–14.0 cm) of *R. chamaemorus* roots at the stage of microshoot rooting *in vitro* have been noted on the Murashige and Skoog culture medium. An increase in the concentration of indolebutyric acid from 0.5 to 1.0 mg/l in the culture medium has contributed to an increase in the number of *R. chamaemorus* roots (on average by 1.4 times) and a decrease in their total length (by 1.15–1.25 times).

Keywords: cloudberry, forest berry plants, *in vitro*, growth regulators, culture medium, microclonal propagation

Acknowledgements: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation as part of the Agreement no. 075-15-2022-317 of April, 20 2022 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: Antonov A.M., Chudetsky A.I., Cheryatova Yu.S., Kuznetsova I.B., Kulikova E.I. Improving the Technological Cycle of Microclonal Propagation of *Rubus chamaemorus* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 214–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-214-226>

Введение

В условиях необходимости импортозамещения на сегодняшний день интенсификация отрасли отечественного ягодоводства требует широкого использования высокотехнологичных приемов. Сокращение сроков создания новых генотипов ягодных культур с улучшенными хозяйственно-ценными признаками, ускорение их внедрения в сельскохозяйственное производство являются первоочередными задачами. Как известно, основные сорта ягодных культур возникли в результате сложных скрещиваний и характеризуются высоким уровнем гетерозиготности, поэтому их размножение традиционным семенным способом не позволяет сохранить весь набор хозяйственно-значимых признаков исходной формы [20, 24]. Для большинства ягодных культур эту проблему можно решить с помощью технологий микрочлониального раз-

множения, которые с каждым годом набирают все большую популярность в плодоводстве.

Сегодня микроклональное размножение культурных растений широко распространено во всех странах мира для тиражирования растений в целях их промышленного выращивания [28]. Такой способ позволяет при наличии единичных маточных экземпляров обеспечить массовое производство высококачественного оздоровленного посадочного материала перспективных видов и сортов ягодных культур, пользующихся повышенным спросом среди населения. К главным достоинствам данного метода относятся: возможность производства необходимого количества посадочного материала, свободного от вирусных, грибных и бактериальных болезней; ускоренное размножение ценного клона растения; получение вегетативного потомства трудно размножаемых традиционными способами форм растений; возможность круглогодичной работы в лабораторных условиях, планирования выпуска растений к установленному календарному сроку, а также длительного хранения растительного материала без контакта с внешней средой. При этом обеспечивается не только полное сохранение генотипа материнского растения, но и более быстрый переход растений в репродуктивный период развития. Кроме того, установлено, что регенеранты тканевых ягодных культур демонстрируют быстрый вегетативный рост, увеличенные ризогенез, образование корневищ и урожайность ягод, а также их плоды и листья обладают более высокой антиоксидантной активностью [17].

Для большинства ягодных растений биотехнологические методы выращивания разработаны и научно обоснованы [8, 18, 21, 25, 35, 36]. Однако вопросы разработки и оптимизации способов микроклонального размножения остаются актуальными в связи с постоянным увеличением сортимента включенных в коммерческое производство ягодных культур и возрастающей конкуренцией в области получения посадочного материала, которая требует повышения качества саженцев и снижения их себестоимости.

В настоящее время у населения растет спрос на продукцию дикорастущих лесных и болотных ягодных растений, которые имеют высокую пищевую и лекарственную ценность, в т. ч. и на морошку. Однако в нашей стране недостаточно плантаций данного вида для полного удовлетворения потребностей отечественного рынка [10]. Проблема состоит в малой разработанности методов размножения этой ценной культуры и отсутствии высококачественного посадочного материала.

Морошка приземистая (*Rubus chamaemorus* L.) – гипоарктический болотный вид арктических и умеренно-северных широт Северной Америки, Норвегии, Финляндии, Швеции, Англии и России. В нашей стране *R. chamaemorus* широко распространена в таежной и лесотундровой зонах европейской части, Сибири, встречается на Дальнем Востоке. Обычно морошка произрастает на моховых (торфяных) болотах, в заболоченных лесах, сырых моховых и мохово-лишайниковых тундрах, иногда может подниматься в горы до подгорного пояса; в тундровой зоне встречается за полярным кругом, но имеет там более низкую урожайность [2, 5, 15].

В зрелых плодах *R. chamaemorus*, сочных многокостянках, содержатся: сахара (6 %), белки (0,8 %), клетчатка (3,8 %), органические кислоты – лимон-

ная и яблочная (0,8 %); витамины: А, В (0,02 мг), С (30–200 мг), РР (0,15 %); минеральные вещества: калий, фосфор, железо, кобальт и др. Также в плодах морошки много пектиновых и дубильных веществ, флавоноидов, каротиноидов (ликопин и зеаксантин) [11]. Хорошие вкусовые свойства этой ягоды позволяют употреблять ее плоды как в свежем виде, так и в виде соков, компотов, варенья, повидла, джемов, добавок для кондитерских, хлебобулочных изделий [12]. Следует особо отметить, что плоды морошки долго хранятся в моченом виде [23].

В последние годы внимание ученых привлекают содержащиеся в растениях морошки группы фенольных соединений, которые являются природными антиоксидантами, обладают противовирусными, антибактериальными и другими фармакологическими свойствами [13–15, 22, 29]. Экстракты плодов и листьев *R. chamaemorus* демонстрируют высокую антиоксидантную и биологическую активность, что делает их перспективным источником пищевых добавок, косметики и фармацевтических препаратов [19, 31, 32].

Поскольку морошка представляет собой ледниковый реликт, разработка и совершенствование методов *in vitro* для микроразмножения данного растения могут быть полезны не только в сельскохозяйственном производстве, но и при сохранении и искусственном поддержании численности популяций *R. chamaemorus* во многих странах мира [34]. Существующие в настоящее время технологии размножения морошки *in vitro* [4, 16, 26, 30, 33] требуют их всесторонней доработки для полного обеспечения необходимого объема посадочного материала этой ценной культуры, в т. ч. с учетом генетических особенностей форм, полученных из северных регионов европейской части России и Сибири.

Цель – изучить влияние состава культуральной среды и концентрации росторегулирующих веществ на органогенез растений-регенерантов *R. chamaemorus* форм, отобранных в северных регионах России, на этапах образования побегов и корней в культуре *in vitro*.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2020–2024 гг. по общепринятым методикам микрклонального размножения растений [7]. Изучали дикорастущие формы *R. chamaemorus*, отобранные в местах естественного произрастания, – Ленинградскую (Выборгский р-н Ленинградской обл.) и Кондинскую (Кондинский р-н Ханты-Мансийского автономного округа – Югры). Выбор районов отбора обоснован наличием популяций наиболее урожайных и крупноплодных форм. На этапе собственно микроразмножения растения-регенеранты выращивали в условиях световой комнаты при температуре воздуха +23...+25 °С, его относительной влажности 75–80 %, фотопериоде 16/8 ч на культуральной среде по прописи Мурасиге–Скуга (МС) [27], в т. ч. в вариантах с разбавлением минеральной основы в 2 и 4 раза (уровень кислотности среды рН_{КСl} – 5,3...5,5). Для регулирования ростовых процессов на этапе собственно микроразмножения в культуральную среду добавляли дефолиант с цитокининовой активностью «Дропп» в концентрациях 0,1 и 0,2 мг/л, на этапе укоренения микропобегов *in vitro* – индолмасляную кислоту (ИМК) в концентрациях 0,5 и 1,0 мг/л. Проводили учет количества и длины микропобегов и корневой си-

стемы в расчете на 1 растение-регенерант. Повторность опыта 3-кратная, по 10 растений в каждой. Для оценки достоверности различий между средними данными вариантов опытов использовали 2-факторный дисперсионный анализ с наименьшей существенной разностью для 5%-го уровня значимости ($НСР_{05}$) [3], где фактор А – состав культуральной среды; Б – концентрация росторегулирующего вещества.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что при микроклональном размножении *R. chamaemorus* на этапе собственно микроразмножения наибольшее число побегов у растений формировалось при использовании культуральной среды МС: у формы Ленинградская – 9,6 шт., у формы Кондинская – 9,9 шт. Это в 1,4–1,5 раза больше, чем на средах $\frac{1}{2}$ МС и $\frac{1}{4}$ МС (табл. 1).

Таблица 1

Число побегов *in vitro* микрорастений *R. chamaemorus* в зависимости от состава культуральной среды и концентрации препарата «Дропп», шт.
The number of shoots of *R. chamaemorus* microplants *in vitro* depending on the composition of the culture medium and the “Dropp” preparation concentration, pcs.

Форма	Состав культуральной среды	Концентрация препарата «Дропп», мг/л		Среднее по фактору Б
		0,1	0,2	
Ленинградская	МС	5,9	13,3	9,6
	$\frac{1}{2}$ МС	6,1	10,2	8,2
	$\frac{1}{4}$ МС	5,5	8,6	7,1
	Среднее по фактору А	5,8	10,7	–
Кондинская	МС	5,5	14,2	9,9
	$\frac{1}{2}$ МС	5,3	12,1	8,7
	$\frac{1}{4}$ МС	4,2	9,4	6,8
	Среднее по фактору А	5,0	11,9	–

Примечание: Для формы Ленинградская $НСР_{05}$: А = 0,74; Б = 0,86; АБ = 1,09; для формы Кондинская: $НСР_{05}$: А = 0,69; Б = 0,93; АБ = 0,99.

При повышении концентрации препарата «Дропп» в культуральной среде от 0,1 до 0,2 мг/л наблюдалось увеличение числа микропобегов у растений-регенерантов *R. chamaemorus* в среднем в 1,8 раза у формы Ленинградская, в 2,4 раза – у формы Кондинская.

Средняя длина микропобегов у растений *R. chamaemorus* исследуемых форм *in vitro* была наибольшей на культуральной среде МС и составляла в среднем 2,0–2,4 см, тогда как на среде $\frac{1}{2}$ МС она была меньше в 1,2–1,3 раза, на среде $\frac{1}{4}$ МС – в 1,3–1,4 раза (табл. 2).

Таблица 2

Средняя длина побегов *in vitro* микрорастений *R. chamaemorus* в зависимости от состава культуральной среды и концентрации препарата «Дропп», см
The average length of shoots of *R. chamaemorus* microplants *in vitro* depending on the composition of the culture medium and the “Dropp” preparation concentration, cm

Форма	Состав культуральной среды	Концентрация препарата «Дропп», мг/л		Среднее по фактору Б
		0,1	0,2	
Ленинградская	МС	3,2	1,5	2,4
	½ МС	2,5	1,2	1,9
	¼ МС	1,9	1,0	1,5
	Среднее по фактору А	2,5	1,2	–
Кондинская	МС	2,6	1,3	2,0
	½ МС	1,9	1,0	1,5
	¼ МС	2,1	1,2	1,7
	Среднее по фактору А	2,2	1,2	–

Примечание: Для формы Ленинградская НСР₀₅: А = 0,54; Б = 0,81; АБ = 0,92; для формы Кондинская: НСР₀₅: А = 0,64; Б = 0,87; АБ = 1,03.

При увеличении концентрации дефолианта «Дропп» в культуральной среде от 0,1 до 0,2 мг/л средняя длина микропобегов *in vitro* у исследуемых форм *R. chamaemorus* уменьшалась в 1,8–2,1 раза.

Суммарная длина микропобегов растений *R. chamaemorus in vitro* была значительно большей на культуральной среде МС, где достигала в среднем 19,5 см у формы Ленинградская и 16,4 см у формы Кондинская (табл. 3).

Таблица 3

Суммарная длина побегов *in vitro* микрорастений *R. chamaemorus* в зависимости от состава культуральной среды и концентрации препарата «Дропп», см
The total length of shoots of *R. chamaemorus* microplants *in vitro* depending on the composition of the culture medium and the “Dropp” preparation concentration, cm

Форма	Состав культуральной среды	Концентрация препарата «Дропп», мг/л		Среднее по фактору Б
		0,1	0,2	
Ленинградская	МС	18,9	20,0	19,5
	½ МС	15,3	12,2	13,8
	¼ МС	10,5	8,6	9,6
	Среднее по фактору А	14,9	13,6	–
Кондинская	МС	14,3	18,5	16,4
	½ МС	10,1	12,0	11,1
	¼ МС	8,8	11,3	10,1
	Среднее по фактору А	11,1	13,9	–

Примечание: Для формы Ленинградская НСР₀₅: А = 0,92; Б = 0,86; АБ = 1,13; для формы Кондинская: НСР₀₅: А = 1,13; Б = 1,02; АБ = 1,42.

С увеличением концентрации дефолианта «Дропп» в культуральной среде от 0,1 до 0,2 мг/л суммарная длина микропобегов *in vitro* у растений *R. chamaemorus* формы Ленинградская снижалась в среднем в 1,1 раза, тогда как у формы Кондинская увеличивалась в 1,25 раза.

На этапе укоренения микропобегов *in vitro* установлено, что наибольшее число корней у растений *R. chamaemorus* формировалось на культуральной среде МС и составляло у формы Ленинградская в среднем 3,9 шт., у формы Кондинская – 4,3 шт., в то время как на среде $\frac{1}{2}$ МС оно было меньше в 1,2 раза, а на среде $\frac{1}{4}$ МС – в 1,9–2,3 раза (табл. 4).

Таблица 4

Число корней *in vitro* микрорастений *R. chamaemorus* в зависимости от состава культуральной среды и концентрации ауксина ИМК, шт.
The number of roots of *R. chamaemorus* microplants *in vitro* depending on the composition of the culture medium and indolebutyric acid auxin concentration, pcs.

Форма	Состав культуральной среды	Концентрация ИМК, мг/л		Среднее по фактору Б
		0,5	1,0	
Ленинградская	МС	3,3	4,5	3,9
	$\frac{1}{2}$ МС	2,5	3,9	3,2
	$\frac{1}{4}$ МС	1,9	2,3	2,1
	Среднее по фактору А	2,6	3,6	–
Кондинская	МС	3,5	5,0	4,3
	$\frac{1}{2}$ МС	3,0	4,2	3,6
	$\frac{1}{4}$ МС	1,6	2,1	1,9
	Среднее по фактору А	2,7	3,8	–

Примечание: Для формы Ленинградская НСР₀₅: А = 0,80; Б = 0,79; АБ = 0,99; для формы Кондинская НСР₀₅: А = 0,72; Б = 0,87; АБ = 0,94.

С повышением концентрации ИМК от 0,5 до 1,0 мг/л в культуральной среде число корней *in vitro* у растений *R. chamaemorus* исследуемых форм увеличивалось в среднем в 1,4 раза.

Наибольшую среднюю длину корней *in vitro* (3,2–3,7 см) растения *R. chamaemorus* обеих форм имели при выращивании на культуральной среде МС. При этом на среде $\frac{1}{2}$ МС данный показатель был меньше в среднем в 1,5 раза, на среде $\frac{1}{4}$ МС – в 2,1–2,3 раза (табл. 5).

Повышение концентрации ИМК в культуральной среде от 0,5 до 1,0 мг/л способствовало значительному уменьшению средней длины корней *R. chamaemorus in vitro*: в среднем в 1,8 раза у формы Ленинградская, в 1,6 раза – у формы Кондинская.

Суммарная длина корней *in vitro* у растений *R. chamaemorus* также была наибольшей на культуральной среде МС и достигала: у формы Ленинградская – 14,0 см, у формы Кондинская – 13,2 см. В то же время при выращивании растений на культуральной среде $\frac{1}{2}$ МС данный показатель был меньше в среднем в 1,8–2,0 раза, на среде $\frac{1}{4}$ МС – в 4,5–4,7 раза (табл. 6).

Таблица 5

Средняя длина корней *in vitro* микрорастений *R. chamaemorus* в зависимости от состава культуральной среды и концентрации ауксина ИМК, см
The average length of roots of *R. chamaemorus* microplants *in vitro* depending on the composition of the culture medium and indolebutyric acid auxin concentration, cm

Форма	Состав культуральной среды	Концентрация ИМК, мг/л		Среднее по фактору Б
		0,5	1,0	
Ленинградская	МС	4,5	2,9	3,7
	½ МС	3,2	1,5	2,4
	¼ МС	2,0	1,0	1,5
	Среднее по фактору А	3,2	1,8	–
Кондинская	МС	4,0	2,5	3,2
	½ МС	2,6	1,6	2,1
	¼ МС	1,9	1,2	1,6
	Среднее по фактору А	2,8	1,8	–

Примечание: Для формы Ленинградская НСР₀₅: А = 0,69; Б = 0,90; АБ = 1,11; для формы Кондинская – НСР₀₅: А = 0,73; Б = 0,82; АБ = 1,02.

Таблица 6

Суммарная длина корней *in vitro* микрорастений *R. chamaemorus* в зависимости от состава культуральной среды и концентрации ауксина ИМК, см
The total length of roots of *R. chamaemorus* microplants *in vitro* depending on the composition of the culture medium and indolebutyric acid auxin concentration, cm

Форма	Состав культуральной среды	Концентрация ИМК, мг/л		Среднее по фактору Б
		0,5	1,0	
Ленинградская	МС	14,9	13,1	14,0
	½ МС	8,0	5,9	6,9
	¼ МС	3,8	2,3	3,1
	Среднее по фактору А	8,9	7,1	–
Кондинская	МС	14,0	12,5	13,2
	½ МС	7,8	6,7	7,3
	¼ МС	3,0	2,5	2,8
	Среднее по фактору А	8,3	7,2	–

Примечание: Для формы Ленинградская НСР₀₅: А = 0,65; Б = 0,86; АБ = 0,96; для формы Кондинская НСР₀₅: А = 0,78; Б = 0,90; АБ = 1,01.

С повышением концентрации ИМК в культуральной среде от 0,5 до 1,0 мг/л наблюдалось значительное снижение суммарной длины корней *in vitro* *R. chamaemorus*: у формы Ленинградская – в среднем в 1,25 раза, у формы Кондинская – в 1,15 раза.

Полученные данные согласуются с положительными результатами других исследований, где изучалось влияние различных питательных составов и росторегулирующих веществ на органогенез растений-регенерантов *R. chamaemorus* при клональном микроразмножении на этапах собственно ми-

кроразмножения и укоренения микропобегов [1, 4, 6, 9]. Следует отметить, что впервые используемый для данного вида растений дефолиант «Дроп» не уступает 6-бензиламинопурина (6-БАП) и 2-изопентиладенину (2-иР) по влиянию на число и длину образуемых побегов морошки в культуре *in vitro*, а его применение является экономически более выгодным с учетом себестоимости препаратов и необходимости довольно низких концентраций. Однако здесь также следует учитывать возможные генотипические различия между исследуемыми образцами и формами.

Заключение

Таким образом, при микроклональном размножении форм *R. chamaemorus* из Ленинградской области и Ханты-Мансийского автономного округа – Югры число, средняя и суммарная длина микропобегов и корней растений были значительно больше на культуральной среде Мурасиге–Скуга, чем в вариантах использования данной среды с разбавлением минеральной основы в 2 и 4 раза. При повышении концентрации в культуральной среде дефолианта «Дроп» от 0,1 до 0,2 мг/л на этапе собственно микроразмножения наблюдалось увеличение числа микропобегов растений *R. chamaemorus* в 1,8 раза у формы Ленинградская и в 2,4 раза у формы Кондинская. С повышением в культуральной среде концентрации ауксина – индолилмасляной кислоты от 0,5 до 1,0 мг/л на этапе укоренения микропобегов *in vitro* отмечено повышение числа корней у растений-регенерантов *R. chamaemorus* исследуемых форм в среднем в 1,4 раза. Полученные результаты можно использовать для усовершенствования технологии микроклонирования морошки приземистой с использованием дикорастущих форм, отобранных в местах естественного произрастания в северных регионах России, на этапе собственно микроразмножения, а также для дальнейшей селекционной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антонов А.М., Макаров С.С., Куликова Е.И., Кульчицкий А.Н., Кузнецова И.Б., Орлова Е.Е. Особенности корнеобразования мужских растений морошки приземистой (*Rubus chamaemorus* L.) северно-российского происхождения в культуре *in vitro* // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2023. № 4(102). С. 125–130.

Antonov A.M., Makarov S.S., Kulikova E.I., Kulchitsky A.N., Kuznetsova I.B. Peculiarities of Root Formation of Male Plants of Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) of Northern Russian Origin in *in vitro* Culture. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2023, no. 4(102), pp. 125–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-125-130>

2. Ареалы лекарственных и родственных им растений СССР (Атлас) / под ред. В.М. Шмидта. Л.: Ленингр. ун-т, 1983. 208 с.

Distribution Areas of Medicinal and Related Plants of the USSR (Atlas). Ed. by V.M. Shmidt. Leningrad, Leningrad University Publ., 1983. 208 p. (In Russ.).

3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 6-е изд. М.: Альянс, 2011. 350 с.

Dospikhov B.A. *Field Experiment Methodology (with the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. 6th ed. Moscow, Al'yans Publ., 2011. 350 p. (In Russ.).

4. Зонтиков Д.Н., Зонтикова С.А., Малахова К.В. Влияние состава питательных сред и регуляторов роста при клональном микроразмножении некоторых хозяйственно ценных представителей рода *Rubus* L. // *Агрохимия*. 2021. № 6. С. 36–42.

Zontikov D.N., Zontikova S.A., Malahova K.V. Influence of the Composition of Nutrient Media and Growth Regulators during Clonal Micropropagation of Some Economically Valuable Representatives of the Genus *Rubus* L. *Agrokhimiya = Eurasian Soil Science*, 2021, no. 6, pp. 36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002188121060144>

5. Косицын В.Н. Морошка: биология, ресурсный потенциал, введение в культуру: моногр. М.: ВНИИЛМ, 2001. 140 с.

Kositsyn V.N. *Cloudberry: Biology, Resource Potential, Introduction to Culture*: Monograph. Moscow, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 2001. 140 p. (In Russ.).

6. Макаров С.С., Антонов А.М., Куликова Е.И., Кузнецова И.Б., Кульчицкий А.Н. Корнеобразование женских растений морошки приземистой (*Rubus chamaemorus* L.) *in vitro* // *Вестн. КрасГАУ*. 2023. № 10(199). С. 138–144.

Makarov S.S., Antonov A.M., Kulikova E.I., Kuznetsova I.B., Kulchitsky A.N. Root Formation of Female Plants of Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) *in vitro*. *Vestnik KrasGAU = the Bulletin of KrasGAU*, 2023, no. 10(199), pp. 138–144. (In Russ.).

7. Макаров С.С., Антонов А.М., Куликова Е.И., Чудецкий А.И., Соловьев А.В. Биотехнология в садоводстве. Выращивание плодовых и редких ягодных растений в культуре *in vitro*. Лабораторный практикум. СПб.: Лань, 2023. 128 с.

Makarov S.S., Antonov A.M., Kulikova E.I., Chudetsky A.I., Solov'ev A.V. *Biotechnology in Horticulture. Growing Fruit and Rare Berry Plants in in vitro Culture*: Laboratory Tutorial. St. Petersburg, Lan' Publ., 2023. 128 p. (In Russ.).

8. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Упадышев М.Т., Родин С.А., Чудецкий А.И. Особенности клонального микроразмножения клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 1. С. 67–76.

Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Upadyshev M.T., Rodin S.A., Chudetsky A.I. Clonal Micropropagation of Cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.). *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology*, 2021, vol. 51, no. 1, pp. 67–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-67-76>

9. Макаров С.С., Упадышев М.Т., Сунгурова Н.Р., Тюкавина О.Н., Куликова Е.И., Кузнецова И.Б. Клональное микроразмножение лесных ягодных растений рода *Rubus* // *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54, № 1. С. 60–70.

Makarov S.S., Upadyshev M.T., Sungurova N.R., Tyukavina O.N., Kulikova E.I., Kuznetsova I.B. Clonal Micropropagation of Wild Berry Plants of the Genus *Rubus*. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology*, 2024, vol. 54, no. 1, pp. 60–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2488>

10. Склярченко М. Ягоды растут // *Эксперт Северо-Запад*. 2019. № 11(772). С. 18–21.

Sklyarenko M. Berries are Growing. *Ekspert Severo-Zapad*, 2019, no. 11(772), pp. 18–21. (In Russ.).

11. Страх Я.Л., Игнатовец О.С. Химический состав и биологическая активность метаболитов *Rubus chamaemorus* L. // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2022. Т. 67, № 3. С. 321–331.

Strakh Ya.L., Ignatovets O.S. Chemical Composition and Biological Activity of Metabolites of *Rubus chamaemorus* L. *Vesci Nacyjanal'naj akademii navuk Belarysi. Seryja bijalagichnych navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 321–331. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-3-321-331>

12. Шароглазова Л.П., Рыгалова Е.А., Величко Н.А. Обоснование сроков хранения и товароведная оценка сокосодержащего напитка на основе ягод рода *Rubus* // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 3(156). С. 129–134.

Sharoglazova L.P., Rygalova E.A., Velichko N.A. The Justification of the Shelf Life and the Quality Assessment of Juice-Containing Drinks Based on Genus *Rubus* Berries. *Vestnik KrasGAU = the Bulletin of KrasGAU*, 2020, no. 3(156), pp. 129–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-3-129-134>

13. Aguilera-Correa J.J., Fernández-López S., Cuñas-Figueroa I.D., Pérez-Rial S., Alakomi H.L., Nohynek L., Oksman-Caldentey K.M., Salminen J.P., Esteban J., Cuadros J., Puupponen-Pimiä R., Perez-Tanoira R., Kinnari T.J. Sanguin H-6 Fractionated from Cloudberry (*Rubus chamaemorus*) Seeds Can Prevent the Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Biofilm Development during Wound Infection. *Antibiotics*, 2021, vol. 10, no. 12, art. no. 1481. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10121481>

14. Aguilera-Correa J.J., Nohynek L., Alakomi H.L., Esteban J., Oksman-Caldentey K.M., Puupponen-Pimiä R., Kinnari T.J., Perez-Tanoira R. Reduction of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Biofilm Growth and Development Using Arctic Berry Extracts. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2023, vol. 13, art. no. 1176755. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1176755>

15. Brown A.O., McNeil J.N. Pollination Ecology of the High Latitude, Dioecious Cloudberry (*Rubus chamaemorus*; Rosaceae). *American Journal of Botany*, 2009, vol. 96, iss. 6, pp. 1096–1107. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800102>

16. Debnath S.C. A Two-Step Procedure for *in vitro* Multiplication of Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) Shoots Using Bioreactor. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 2007, vol. 88, pp. 185–191. <https://doi.org/10.1007/s11240-006-9188-x>

17. Debnath S.C., Ghosh A. Phenotypic Variation and Epigenetic Insight into Tissue Culture Berry Crops. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, art. no. 1042726. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1042726>

18. Debnath S.C., Goyal J.C. *In vitro* Propagation and Variation of Antioxidant Properties in Micropropagated *Vaccinium* Berry Plants – A Review. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 4, art. no. 788. <https://doi.org/10.3390/molecules25040788>

19. Faleva A.V., Ul'yanovskii N.V., Onuchina A.A., Falev D.I., Kosyakov D.S. Comprehensive Characterization of Secondary Metabolites in Fruits and Leaves of Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.). *Metabolites*, 2023, vol. 13, no. 5, art. no. 598. <https://doi.org/10.3390/metabo13050598>

20. Gao X.-F., Xiong X.-H., Boufford D.E., Gao Y.-D., Xu B., Zhang C. Phylogeny of the Diploid Species of *Rubus* (Rosaceae). *Genes*, 2023, vol. 14, no. 6, art. no. 1152. <https://doi.org/10.3390/genes14061152>

21. Huerta-Olalde A.M., Hernández-García A., López-Gómez R., Fernández-Pavía S.P., Zavala-Páramo M.G., Salgado-Garciglia R. *In vitro* Selection of Blackberry (*Rubus fruticosus* ‘Tupy’) Plants Resistant to *Botrytis cinerea* Using Gamma Ray-Irradiated Shoot Tips. *Plant Biotechnology*, 2022, vol. 39, iss. 2, pp. 165–171. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.22.0312b>

22. Kellogg J., Wang J., Flint C., Ribnicky D., Kuhn P., Mejia de E.G., Raskin I., Lila M.A. Alaskan Wild Berry Resources and Human Health Under the Cloud of Climate Change. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, vol. 58, iss. 7, pp. 3884–3900. <https://doi.org/10.1021/jf902693r>

23. Kolosova V., Belichenko O., Rodionova A., Melnikov D., Sõukand R. Foraging in Boreal Forest: Wild Food Plants of the Republic of Karelia, NW Russia. *Foods*, 2020, vol. 9, no. 8, art. no. 1015. <https://doi.org/10.3390/foods9081015>

24. Leišová-Svobodová L., Phillips J., Martinussen I., Holubec V. Genetic Differentiation of *Rubus chamaemorus* Populations in the Czech Republic and Norway after the Last Glacial Period. *Ecology and Evolution*, 2018, vol. 8, iss. 11, pp. 5701–5711. <https://doi.org/10.1002/ece3.4101>
25. Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I., Rodin S.A. Obtaining High-Quality Planting Material of Forest Berry Plants by Clonal Micropropagation for Restoration of Cutover Peatlands. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 2, pp. 21–29. <https://doi.org/10.17238/0536-1036-2021-2-21-29>
26. Martinussen I., Nilsen G., Svenson L., Junttila O., Rapp K. *In vitro* Propagation of Cloudberry (*Rubus chamaemorus*). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2004, vol. 78, pp. 43–49. <https://doi.org/10.1023/B:TICU.0000020392.85854.28>
27. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bioassays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, vol. 15, iss. 3, pp. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
28. Murthy H.N., Joseph K.S., Paek K.Y., Park S.Y. Bioreactor Systems for Micropropagation of Plants: Present Scenario and Future Prospects. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 14, art. no. 1159588. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1159588>
29. Mutanen M., Pajari A.M., Paivarinta E., Misikangas M., Rajakangas J., Marttinen M., Oikarinen S. Berries as Chemopreventive Dietary Constituents – a Mechanistic Approach with the ApcMin/+ Mouse. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2008, vol. 17, suppl. 1, pp. 123–125.
30. Nohynek L., Bailey M., Tähtiharju J., Seppänen-Laakso T., Rischer H., Oksman-Caldentey K.-M., Puupponen-Pimiä R. Cloudberry (*Rubus chamaemorus*) Cell Culture with Bioactive Substances: Establishment and Mass Propagation for Industrial Use. *Engineering in Life Sciences*, 2014, vol. 14, iss. 6, pp. 667–675. <https://doi.org/10.1002/elsc.201400069>
31. Pajari A.-M., Päivärinta E., Paavolainen L., Vaara E., Koivumäki T., Garg R., Heiman-Lindh A., Mutanen M., Marjomäki V., Ridley A.J. Ellagitannin-Rich Cloudberry Inhibits Hepatocyte Growth Factor Induced Cell Migration and Phosphatidylinositol 3-Kinase/AKT Activation in Colon Carcinoma Cells and Tumors in Min Mice. *Oncotarget*, 2016, vol. 7, no. 28, pp. 43907–43923. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.9724>
32. Pemmari T., Hämäläinen M., Ryyti R., Peltola R., Moilanen E. Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) Supplementation Attenuates the Development of Metabolic Inflammation in a High-Fat Diet Mouse Model of Obesity. *Nutrients*, 2022, vol. 14, no. 18, art. no. 3846. <https://doi.org/10.3390/nu14183846>
33. Thiem B. Micropropagation of Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) by Initiation of Axillary Shoots. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2001, vol. 70, no. 1, pp. 11–16.
34. Thiem B. *Rubus chamaemorus* L. – a Boreal Plant Rich in Biologically Active Metabolites: a Review. *Biological Letters*, 2003, vol. 40, pp. 3–13.
35. Turdiyev T., Kovalchuk I., Mukhitdinova Z., Hunger O., Frolov S., Kabyzbekova B. Micropropagation of Berry Crops for Creation of Germplasm Cryobanks. *Brazilian Journal of Biology*, 2023, vol. 84, art. no. e266975. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.266975>
36. Zakaria H., Hussein G.M., Abdel-Hadi A.H.A., Abdallah N.A. Improved Regeneration and Transformation Protocols for Three Strawberry Cultivars. *GM Crops & Food*, 2014, vol. 5, iss. 1, pp. 27–35. <https://doi.org/10.4161/gmcr.27229>

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