

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

4

2022

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)

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
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)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
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)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
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)
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

4

2022

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)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
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)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
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)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
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)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- В.В. Фомин, Н.С. Иванова, С.В. Залесов, А.П. Михайлович.* Общеввропейские подходы к классификации местообитаний, растительности и типов леса..... 9
- А.Ф. Осипов, И.Н. Кутявин, А.В. Манов, М.А. Кузнецов, К.С. Бобкова.* Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми..... 25
- A.V. Kul'kova, N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, Y.Zh. Kentbaev, B.A. Kentbaeva.* Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment..... 39
- А.К. Мухин.* Особенности динамики лишайниковых сосняков в условиях подтопления Рыбинским водохранилищем..... 52
- В.П. Макаров, О.Ф. Малых, Т.В. Желибо.* Изменчивость признаков генеративных органов лиственницы Гмелина в условиях Восточного Забайкалья..... 70
- А.Н. Соболев, П.А. Феклистов, Л.Ф. Попова.* Ветрозащитная роль березового криволесья на Большом Соловецком острове..... 91
- Т.Е. Галдина, А.И. Чернодубов.* Продуктивность лиственницы различного происхождения в условиях Воронежской области..... 101
- Л.В. Зарубина.* Влияние удобрений на суточный рост сосны на торфяно-болотных почвах..... 115
- А.С. Манаенков, А.С. Пономарев.* Лесопригодность экотопов Волго-Ахтубинской поймы для культур сосны..... 127

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев.* Обоснование показателя гибкости плота из сплоточных единиц..... 146
- М.В. Мацнев, Н.Г. Пономарева, О.Н. Тверитнев, П.В. Тихомиров, Д.М. Левушкин, А.Н. Брюховецкий.* Расчет величины задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог..... 156

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Е.В. Томина, А.И. Дмитренко, К.В. Жужукин. Использование наноразмерного ZnO в составах для защитной обработки древесины.....* 173
- I.V. Susoeva, T.N. Vakhnina, A.A. Titunin, V.E. Romyantseva. Processing Factors and Properties of Thermal Insulation Boards Made of Plant Fillers* 185

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

- И.А. Паламарчук, М.Е. Белоусова, О.С. Бровко, В.В. Старицын, А.Д. Иванов, А.А. Слобода. Содержание фенольных соединений в лишайниках в зонах тектонических разломов.....* 198
-

 CONTENTS

FORESTRY

- V.V. Fomin, N.S. Ivanova, S.V. Zalesov, A.P. Mikhailovich.* Pan-European Approaches to the Classification of Habitats, Vegetation and Forest Types 9
- A.F. Osipov, I.N. Kutuyavin, A.V. Manov, M.A. Kuznetsov, K.S. Bobkova.* Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic..... 25
- A.V. Kul'kova, N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, Y.Zh. Kentbaev, B.A. Kentbaeva.* Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment..... 39
- A.K. Mukhin.* Features of the Dynamics of Lichen Pine Forests under Flooding by the Rybinsk Reservoir..... 52
- V.P. Makarov, O.F. Malykh, T.V. Zhelibo.* Variability in Traits of Gmelin Larch Generative Organs in Eastern Transbaikalia..... 70
- A.N. Sobolev, P.A. Feklistov, L.F. Popova.* Windproof Role of Birch Crooked Forests on Bolshoy Solovetsky Island..... 91
- T.E. Galdina, A.I. Chernodubov.* Productivity of Larch of Different Origin in the Voronezh Region..... 101
- L.V. Zarubina.* Daily Pine Growth on Highmoor Peat Soil under the Influence of Fertilizers..... 115
- A.S. Manaenkov, A.S. Ponomarev.* Forest Sustainability of Ecotopes of the Volga-Akhtuba Floodplain when Cultivating Pine Plantations..... 127

LOGGING TECHNOLOGIES

- V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev.* Flexibility Justification of a Raft Made of Raft Units 146
- M.V. Matsnev, N.G. Ponomareva, O.N. Tveritnev, P.V. Tikhomirov, D.M. Levushkin, A.N. Briukhovetskii.* Calculating the Groundwork Volume for the Construction of Logging Roads..... 156

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- E.V. Tomina, A.I. Dmitrenkov, K.V. Zhuzhukin.* The Use of Nanosized ZnO in Compositions for Wood Protective Treatment..... 173

I.V. Susoeva, T.N. Vakhnina, A.A. Titunin, V.E. Rumyantseva. Processing Factors and Properties of Thermal Insulation Boards Made of Plant Fillers 185

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

I.A. Palamarchuk, M.E. Belousova, O.S. Brovko, V.V. Staritsyn, A.D. Ivakhnov, A.A. Sloboda. The Content of Phenolic Compounds in Lichens in the Tectonic Fault Zones..... 198




Обзорная статья

УДК 630*187

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-9-24

Общеввропейские подходы к классификации местообитаний, растительности и типов леса

В.В. Фомин¹ , *д-р биол. наук, доц.*; *ResearcherID: J-3404-2017.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

Н.С. Иванова^{1,2}, *д-р биол. наук*; *ResearcherID: O-8367-2019.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>

С.В. Залесов¹, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: H-2605-2019.*

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

А.П. Михайлович³, *ст. преподаватель*; *ResearcherID: AAN-5903-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; fomval2011@yandex.ru[✉], zalesovsv@m.usfeu.ru

²Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; i.n.s@bk.ru

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002; anna.mikhailovich@gmail.com

Поступила в редакцию 05.11.20 / Одобрена после рецензирования 08.02.21 / Принята к печати 10.02.21

Аннотация. Рассмотрены классификации лесов, местообитаний и растительности на общеввропейском уровне на примере классификации европейских типов леса (EFT), классификации местообитаний EUNIS и созданной фитосоциологами Европейского обследования растительности (EVS) классификации растительности Европы. Тип леса в EFT – крупная единица лесной растительности, выделяемая в пределах биогеографических регионов по общности лесорастительных условий, структуре и продуктивности насаждения, степени антропогенной трансформации. Учет сукцессионной динамики лесных биогеоценозов прорабатывается на теоретическом уровне. Практически учет возможен за счет информации из классификации местообитаний EUNIS, которая связана с классификацией EVS кросс-ссылками. Классификация EUNIS представляет собой общеввропейский эталонный набор единиц местообитаний. При ее создании были использованы результаты предыдущих масштабных исследований, завершившихся созданием ряда классификаций биотопов, почвенного покрова и морских местообитаний. Классификация EVS – это всеобъемлющая иерархическая синтаксономическая система союзов, порядков и классов синтаксономии Брауна-Бланке для произрастающих в Европе сосудистых растений, мхов, лишайников и водорослей. Достоинствами EFT являются включение антропогенных воздействий в число ключевых диагностических признаков типа леса, которые оцениваются за счет выявления степени натуральности лесов, количества лесных видов, характера и интенсивности антропогенного воздействия; наличие перекрестных связей с другими системами классификации раститель-



ности, местообитаний и типов леса, применяемыми как в рамках национальных систем инвентаризации лесов, так и на уровне ЕС. Использование реализованного в классификации фитоценологических альянсов, в настоящее время известной под названием EVS, эколого-флористического подхода Браун-Бланке дает возможность проведения детального экологического анализа, учета не только продуктивности древостоя, но и уровня биоразнообразия в нем, что делает классификацию более полезной для научных исследований и охраны природы.

Ключевые слова: лесотипологические исследования, классификация растительности, классификация европейских типов леса, классификация местообитаний EUNIS, классификация фитосоциологических альянсов, классификация EVS, классификация EFT
Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-14-50422) и по грантам Министерства науки и высшего образования FEUG 2020-0013 и FEUZ 2021-0014.

Для цитирования: Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Михайлович А.П. Обще-европейские подходы к классификации местообитаний, растительности и типов леса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 9–24. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-9-24>

Review article

Pan-European Approaches to the Classification of Habitats, Vegetation and Forest Types

Valery V. Fomin^{1✉}, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [J-3404-2017](https://orcid.org/0000-0002-9211-5627),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

Natalya S. Ivanova^{1,2}, Doctor of Biology; ResearcherID: [O-8367-2019](https://orcid.org/0000-0003-0845-9433),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>

*Sergey V. Zalesov*¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

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

*Anna P. Mikhailovich*³, Senior Lecturer; ResearcherID: [AAN-5903-2020](https://orcid.org/0000-0002-8282-9431),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

¹Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; fomval2011@yandex.ru[✉], zalesovsv@m.usfeu.ru

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202 a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; i.n.s@bk.ru

³Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, ul. Mira, 19, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; anna.mikhailovich@gmail.com

Received on November 5, 2020 / Approved after reviewing on February 8, 2021 / Accepted on February 10, 2021

Abstract. The article describes the approaches and features of classification of forests, habitats and vegetation at the Pan-European level on the example of the classification of European forest types (EFT), the EUNIS habitat classification and the Europe vegetation classification created by the phytosociologists of the European Vegetation Survey (EVS). The forest type in the EFT classification is a large forest vegetation unit distinguished within biogeographic regions by the similarity of forest site conditions, structure and productivity of the plantation, and the degree of anthropogenic transformation of forests. Accounting for the successional dynamics of forest biogeocoenosis is worked out at the theoretical level, in practice, the accounting is possible due to the information obtained from the EUNIS habitat classification, which is linked



to the EVS classification by cross-references. The EUNIS classification is a Pan-European reference set of habitat units. It was created using the results of previous large-scale studies in Europe, which resulted in the creation of a number of classifications of biotopes, soil cover and marine habitats. The EVS classification is a comprehensive hierarchical syntaxonomic system of unions, orders and classes of Brown-Blanquet syntaxonomy for vascular plants, mosses, lichens and algae native to Europe. The great advantage of the EFT classification is the inclusion of anthropogenic impacts among the key diagnostic features of a forest type, which are defined by assessing the degree of naturalness of forests, the number of forest species, the type and intensity of anthropogenic impacts. The strength of the EFT classification is to establish cross-links with other forest type classification systems used both within national forest inventory systems and at the EU level. The use of the Braun-Blanquet ecological and floristic approach implemented in the classification of phytosociological alliances makes it possible to conduct a detailed ecological analysis and taking into account not only the stand productivity, but also the level of stand biodiversity, which makes the classification more useful for scientific research and nature preservation.

Keywords: forest typological studies, vegetation classification, European forest type classification, EUNIS habitat classification, phytosociological alliance classification, EVS classification, EFT classification

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR grant No. 20-14-50422) and the Ministry of Science and Higher Education (projects FEUG-2020-0013 and FEUZ 2021-0014).

For citation: Fomin V.V., Ivanova N.S., Zalesov S.V., Mikhailovich A.P. Pan-European Approaches to the Classification of Habitats, Vegetation and Forest Types. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 9–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-9-24>

Интенсивное лесопользование и климатические изменения привели к стремительной деградации лесов и сокращению их площадей во всем мире [18]. Это становится причиной не только региональных экологических кризисов, но и глобального снижения устойчивости биосферы и потери биоразнообразия [9, 14]. В связи с этим актуально восстановление лесов и их функций, для чего в первую очередь необходим крупномасштабный мониторинг динамики лесной растительности.

Развитие ГИС-технологий позволяет организовать поступление огромного потока требуемой для этой цели информации. Возникает проблема ее структурирования и анализа, а совершенствование подходов к классифицированию природных комплексов оказывается в числе самых важных задач современного лесоведения и фитоценологии [11–13].

От решения данной проблемы во многом зависит понимание процессов, происходящих в лесах, успех сохранения биоразнообразия и организации устойчивого лесопользования [1, 3, 17]. Поэтому для мировой науки очень полезным является опыт создания единой европейской классификации типов леса [2], когда общими усилиями специалистов разных научных направлений были соединены системой кросс-связей 3 классификации: европейских типов леса EFT (European Forest Types), местообитаний EUNIS (European Union Nature Information System – Европейская информационная система о природе) и флористическая классификация EVS (European Vegetation Survey – Европейское обследование растительности). Успешная реализация такого подхода – пример взаимного дополнения, детализации или обобщения классификаций единиц

растительного покрова, а также условий местопроизрастания без необходимости отрицания полученных ранее результатов и создания новых классификаций.

Цель работы – описание и сравнительный анализ основных положений 3 классификаций, используемых в странах Европейского союза: европейских типов леса EFT, местообитаний EUNIS и флористической классификации EVS.

Классификация европейских типов леса

Общеввропейский добровольный политический процесс высокого уровня для межправительственного диалога и сотрудничества по вопросам лесной политики в Европе под эгидой Министерской конференции по защите лесов в Европе (Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe) получил название «Лесная Европа» [15]. В рамках этой конференции в 2006 г. Международный консорциум экспертов представил результаты исследований по типам европейских лесов в виде научно-технического отчета [2], в том числе классификацию европейских типов леса EFT на основе индикаторов устойчивого управления лесами (табл. 1). Создание классификации было обусловлено необходимостью повышения эффективности устойчивого лесопользования в Европе и упрощения представления отчетности странами-членами ЕС.

До создания классификации EFT на общеевропейском уровне идентификация лесных сообществ была возможна по классификации местообитаний EUNIS [10] и классификации фитосоциологических альянсов, в настоящее время известной под названием «Европейское обследование растительности» [20]. Однако несмотря на то, что эти классификации являются научно обоснованными и активно используются, они имеют ряд ограничений: избыточное количество классов и неинформативность некоторых из них; трудность для понимания конечными пользователями, не являющимися специалистами в области фитосоциологии; отсутствие четкой связи между показателями биоразнообразия лесов и вопросами политики его сохранения; недостаточная эффективность удовлетворения потребностей в отчетности конференции по защите лесов [2, 3].

Авторы классификации EFT выделили группы ключевых факторов, влияющих на биоразнообразие лесов в Европе:

структурные (физические характеристики) – общая площадь лесов, которая определяется следующими факторами: официальный статус (использование или защита), владелец лесов, видовой состав древесных растений и их возраст, старовозрастность леса или оставление его для свободного развития, снижение или возрастание облесенности территории;

факторы состава – естественные виды или виды, нетипичные для данных условий местопроизрастания;

функциональные – естественные нарушения, обусловленные последствиями пожаров, ветра и снега; биологические нарушения; влияние человека, включая ведение лесного хозяйства, выпас скота, другие виды землепользования, загрязнения.

Классификация EFT имеет иерархическую структуру, состоящую из 2 уровней – категорий и типов. В основу их ранжирования положен принцип увеличения схожести лесных участков в естественных и антропогенных условиях, влияющих на 5 базовых индикаторов: натуральность, количество видов растений, запас древостоя, распределение значений возраста и диаметра деревьев, запас мертвой древесины.

Таблица 1

Особенности классификации европейских типов леса EFT**Characteristics of the EFT classification**

Характеристика	Описание
Авторы	А. Барбати (A. Barbati), П. Корона (P. Corona), М. Марчетти (M. Marchetti)
Объем понятия типа леса	Крупная единица, категория леса, определенная его составом и/или факторами, характеризующими условия местопроизрастания. Каждой страной классифицируется в соответствии с ее потребностями. Категории и типы леса представлены только для лесных земель
Граница типа леса	В пределах биогеографических регионов Европы. Границы большей части типов леса обусловлены широтно-высотной зональностью европейской растительности или деятельностью человека. Границы могут быть определены в пределах единиц классификации местообитаний EUNIS или флористической классификации EVS
Классификационные признаки для определения типа лесорастительных условий	Единицы классификации местообитаний EUNIS и Приложение 1 Директивы о местообитаниях 92/43/ЕЕС
Классификационные признаки фитоценоза для определения типа леса	Натуральность, количество обнаруженных видов лесной растительности, запас древостоя, распределение значений возраста и диаметра деревьев, запас мертвой древесины. Дополнительная информация может быть получена через кросс-связи с классификационными единицами EUNIS и кросс-связи последней с синтаксонами флористической классификации EVS
Учет сукцессионной динамики	В основном на теоретическом уровне. В некоторых случаях возможен за счет информации из классификации местообитаний EUNIS
Учет влияния антропогенных факторов	Один из ключевых показателей, характеризующих степень натуральности лесов. Используется для выделения категорий и типов леса. В пределах типа леса приведено краткое описание основных антропогенных воздействий
Уровень внедрения в лесо-устроительные работы и ведения лесного хозяйства. Регионы внедрения	Используется на общеевропейском уровне для отчетности в рамках Панъевропейского процесса (ранее Министерской конференции по защите лесов в Европе)

Уровень категорий предложен для выявления и отражения в общеевропейском масштабе наиболее значимых (переломных) моментов в континууме природных и антропогенных факторов, влияющих на перечисленные выше показатели. В качестве примера фундаментального переломного момента можно привести смену аборигенной растительности лесного участка искусственной, что является признаком резкого изменения естественности. Это изменение можно оценить по упрощению структуры лесного насаждения (лесные культуры, как правило, состоят из одновозрастных и монопородных древостоев с равномерным распределением деревьев в пространстве), генетическому

разнообразию местообитания и видовому составу в пределах местообитания (естественная лесная растительность вытесняется древостоями из интродуцированных видов, причем некоторые из них становятся способными подавлять естественную растительность – инвазивные виды).

Первоначально в классификации EFT было представлено 75 типов леса, которые были сгруппированы в 14 категорий [2]. Позже количество типов леса увеличено до 78 [3]. На рис. 1 приведена схема, дающая представление о категориях и типах леса классификации EFT. Так как в ней используются индикаторы лесных насаждений и местообитаний на пробных площадях национальных систем инвентаризации лесов, каждая из стран ЕС может провести переклассификацию своих типов леса в типы леса EFT по решающим правилам.

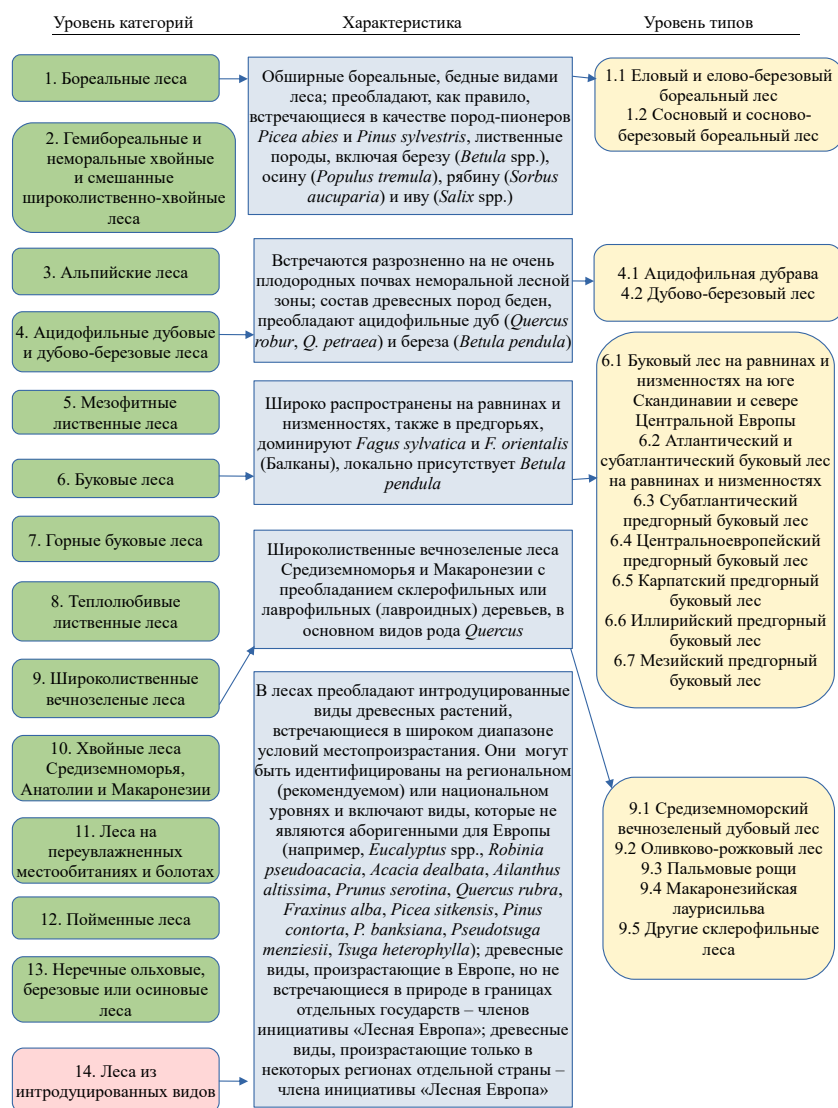


Рис. 1. Список категорий и отдельные характеристики некоторых из них, включая названия типов леса по классификации EFT

Fig. 1. List of categories and individual characteristics of some of them, including the names of forest types of the EFT classification

В номенклатуре EFT при описании лесов указывается их связь с единицами местообитаний классификации EUNIS и Приложения 1 Директивы по местообитаниям [8]. В классификации EFT также предусмотрена возможность связи данных национальных систем инвентаризации лесов с данными ETF для тех европейских стран, где уже существуют схемы типов лесов. Это осуществимо при условии, что классификации основаны на тех же диагностических критериях, которые использованы для ETF. Таким образом, на уровне типа леса в классификации EFT установлены перекрестные связи с другими системами классификации типов леса, применяемыми как в рамках национальных систем инвентаризации лесов, так и на уровне ЕС, что позволяет систематически идентифицировать и характеризовать категории и типы лесов в Европе. Типы леса связаны с классами на 3-м уровне классификации EUNIS и с Приложением 1 Директивы ЕС по местообитаниям [3].

Например, для типа леса «Дубово-березовые леса» категории 4 «Ацидофильные дубовые и дубово-березовые леса» приводятся:

область распространения лесов, относящихся к данному типу, – на Северо-Европейской равнине от Ютландии до Фландрии, встречаются в Арденах, на среднем и верхнем Рейнском хребтах, в северо-западной Франции, Нормандии, Бретани, Парижском бассейне, Морване и Великобритании, к данному типу леса относят естественные березово-дубовые дюнные леса к востоку от Эльбы в пределах Германно-Балтийских флювиогляциальных внутренних дюнных систем;

видовой состав насаждений – *Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh., часто в составе с *Sorbus aucuparia* L. и *Populus tremula* L.;

характеристики почв – очень олиготрофные, часто песчаные и подзолистые или гидроморфные почвы;

информация о связи с Приложением 1 по местообитаниям (9190 – «Старые ацидофильные дубовые леса с *Quercus robur* L. на песчаных равнинах») и классификацией местообитаний EUNIS (G1.8 – «Ацидофильные дубовые леса с преобладанием дуба»).

ETF снабжена ключом и номенклатурой. Авторами классификации составлены блок-схемы в виде дерева ветвлений, позволяющие определить тип леса. На рис. 2 приведена схема из фрагментов 2 блок-схем, которые используются для определения типа леса в данной классификации.

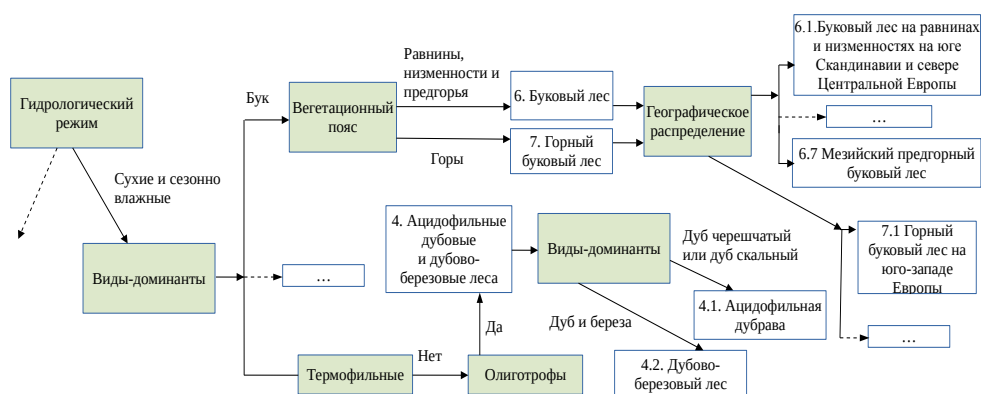


Рис. 2. Блок-схема для определения типа леса в классификации европейских типов леса EFT

Fig. 2. Flowchart for determining a forest type in the EFT classification

Так как ЕТФ тесно связана с другими классификациями растительности и местообитаний, в первую очередь с Европейской информационной системой о природе EUNIS и классификацией EVS, которая наряду с другими классификациями была использована при создании EUNIS, целесообразно привести краткую характеристику этих классификаций.

Классификация местообитаний EUNIS

Европейский тематический центр по биологическому разнообразию – международный консорциум, сотрудничающий с Европейским агентством по окружающей среде, – разработал европейскую информационную систему о природе EUNIS [25]. В ней представлена информация о видах живых организмов, типах местообитаний и особо охраняемых территориях [10]. Данная классификация также используется для отчетности о типах местообитаний на общеевропейском уровне.

При создании EUNIS были использованы следующие результаты исследований и разработок: классификация биотопов и номенклатура почвенного покрова CORINE, классификация палеарктических местообитаний, Приложение 1 Директивы ЕС по местообитаниям, классификация местообитаний Северных стран, классификация морских местообитаний BioMar. В классификацию местообитаний EUNIS были введены критерии для идентификации каждой единицы местообитаний, при этом обеспечена соотносимость с перечисленными выше более ранними классификационными системами. Некоторые из них, в частности классификация биотопов CORINE и классификация палеарктических местообитаний, в значительной степени основывались на традиционной фитосоциологии [10].

Классификация EUNIS представляет собой общеевропейский эталонный набор единиц местообитаний для удовлетворения требований в отношении политических целей и вспомогательных приложений, связанных с мониторингом и отчетностью по биоразнообразию [7].

EUNIS – это иерархическая классификация наземных, пресноводных и морских местообитаний всей Европы, содержащая 4 уровня. Морские местообитания в свою очередь ранжированы на 4 уровня, а наземные и пресноводные – на 3 (до 3-го уровня включительно). Для наземных местообитаний, относящихся к 3-му уровню, указывается аналог среди широко встречающихся в данном регионе европейских фитосоциологических синтаксонов [7]. Выделение местообитаний EUNIS основано на физиогномических и физических признаках, а также на некоторых флористических критериях. Остальные уровни местообитаний (ниже указанных) в основном были заимствованы из других систем практически без изменений [10].

В EUNIS 1-й уровень является высшим. Он состоит из 10 категорий, обозначенных заглавными латинскими буквами от А до J: А – морские местообитания; В – береговые местообитания; С – водные объекты под землей; D – болота, трясины и топи; Е – луга и земли с преобладанием разнотравья, мхов или лишайников; F – пустоши, кустарники и тундра; G – лесные земли и леса; H – внутренние необитаемые и редко занятые растительностью среды обитания; I – регулярно или недавно культивируемые сельскохозяйственные, садовые и окультуренные местообитания; J – промышленные и другие искусственные среды обитания.

Определение типа местообитания конкретного участка земной поверхности или водной среды в системе EUNIS на первых 3 уровнях выполняется с использованием блок-схем и ключей. На рис. 3 приведен пример установления местообитаний сосновых, лиственничных и еловых таежных лесов – блок-схема, составленная из фрагментов блок-схем, применяемых в классификации EUNIS (для определения местообитаний на уровнях от 1-го до 3-го включительно). При выборе вариантов ветвления используются ключи, которые обозначены индексами «Gi», «Gii» или «g» с номером. Ключи представляют собой текстовые пояснения.

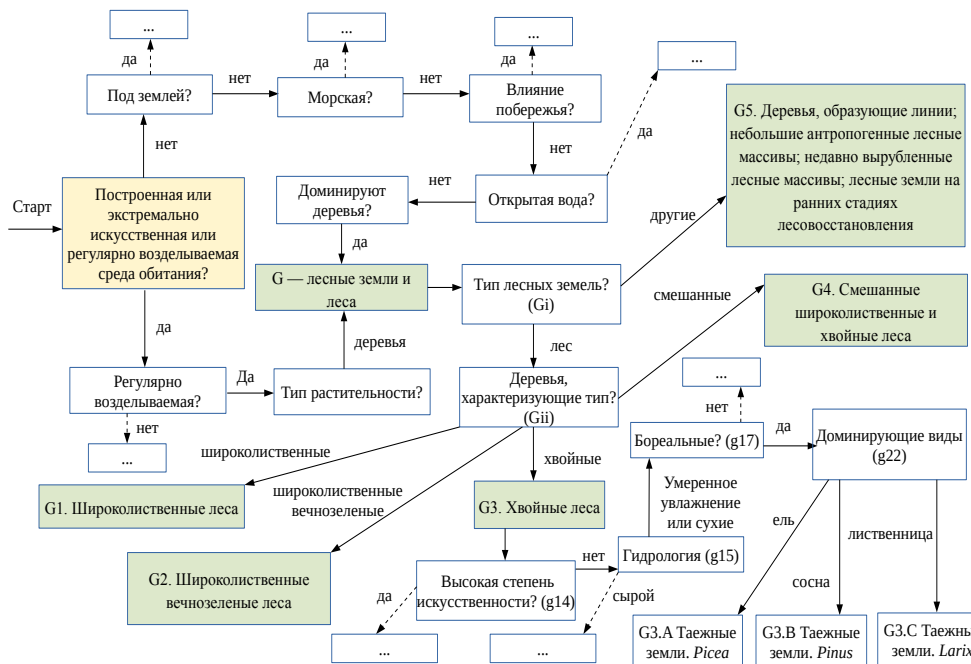


Рис. 3. Определение типа местообитания по классификации EUNIS

Fig. 3. Defining a habitat type by the EUNIS habitat classification

В ключе «Gi» подробно описано, что можно относить к лесным местообитаниям: «естественные древостои площадью более 0,5 га и сомкнутостью крон более 10 % для деревьев с высотой более 5 м; естественные древостои на участках площадью менее 0,5 га и сомкнутостью крон более 10 % и высотой деревьев более 5 м с более или менее естественной наземной флорой (т. е. не подверженные сильному влиянию человека в результате управления или повреждений)...» [10]. В ключе «Gii» приведены варианты доминирующих древесных пород в составе, например к хвойным лесам относятся участки, на которых более 75 % проективного покрытия составляют хвойные породы.

Другие ключи как дают возможность выбора характеристик условий местообитания, так и детализируют варианты породного состава насаждений. Например, ключ «g15» содержит следующее описание: «Различают два гидрологических режима: влажный (с уровнем грунтовых вод на поверхности или вблизи нее не менее полугод) и средний или сухой» [10]. Выбор варианта режи-

ма «средний или сухой» ведет к элементу «Бореальные?» с ключом «g17» (среднеувлажненные или сухие местообитания с хвойными лесами, характерные для бореальной зоны, с ответом «да»). Положительный ответ приводит к элементу «Доминирующие виды» с ключом «g22» (хвойные леса бореальной зоны, которые отличаются доминированием в составе деревьев родов *Pinus*, *Larix* и *Picea*).

База данных классификации местообитаний EUNIS содержит карточки с информацией о местообитании, объемом, как правило, до полутора страниц формата А4 [10]. Для каждого типа местообитания дается следующая информация: английское и научное названия местообитания (т. е. используются научные названия видов организмов); описание местообитания; источник описания, чаще всего научная публикация; правовые документы, которые регулируют сохранение данного местообитания; его краткое описание или диагностические параметры под несколькими заголовками; родственные фитосоциологические единицы [20], если они есть. В табл. 2 в качестве примера приведена карточка для местообитания «G3.В Тажные земли. *Pinus*» [10].

Таблица 2

**Характеристика местообитания «G3.В Тажные земли. *Pinus*»
классификации местообитаний EUNIS**

Habitat characteristics “G3.B Pine taiga woodland” of the EUNIS habitat classification

Параметр	Описание
Местообитание EUNIS: код; названия (английское, научное)	G3.В; «Pine taiga woodland», <i>Pinus taiga woodland</i>
Описание	Бореальные сосновые леса Фенноскандии, северо-восточной Польши, Прибалтики, Белоруссии и европейской части России. Вместе с местообитанием «G3.А Тажные земли. <i>Picea</i> » образуют самый западный участок непрерывного евразийского пояса северной тайги
Источник	Hill, M.O., Moss, D. & Davies, C.E. (2004)
Правовые документы: правовой документ; законодательно закрепленное местообитание; код	Приложение 1 Директивы ЕС о местообитаниях; западная тайга; 9010
Климатическая зона	Бореальная
Уровни использования местообитания (при использовании в критериях)	Низкий уровень использования / нарушений, без воздействия человека
Доминирующие жизненные формы	Деревья, деревья высотой более 5 м / высокие деревья, хвойные деревья, деревья рода сосна
Проективное покрытие (когда используется в качестве критерия)	Деревья с сомкнутостью крон более 10 %
Характеристики влажности или сухости	Влажные / среднее увлажнение, сухие
Родственные фитосоциологические единицы	<i>Aconito septentrionalis-Piceion obovatae</i> , <i>Athyrio-Piceetalia</i> , <i>Cytiso ruthenici-Pinion</i> , <i>Dicrano-Pinion</i> , <i>Phyllodoco-Vaccinion myrtilli</i>

В интернет-ориентированной системе EUNIS на странице конкретного местообитания может приводиться дополнительная информация, которая вносится авторами классификации. Например, для «G3.B» [19] приведена связь данного типа местообитания с классификационными единицами «CORINE Земной покров» (CORINE Land Cover), «BEAR Типы леса для оценки биоразнообразия» (BEAR Forest Types for Biodiversity Assessment), «Палеарктическая классификация местообитаний» (Palearctic Habitat Classification 200112). В разделе «История» содержатся ссылки на документы предыдущих ревизий данной классификации.

Классификация фитосоциологических альянсов

В первые десятилетия XX в. в Европе сформировалось научное направление, получившее название фитосоциология [17]. Его родоначальником является швейцарский ботаник и эколог Д. Браун-Бланке. В прошлом столетии было опубликовано значительное количество фитосоциологической литературы и сформировано множество научных школ, отличающихся разными подходами к классификации растительности [16], особенно в Южной и Восточной Европе. При этом в Великобритании и некоторых североевропейских странах направление не имело большой популярности [20].

В 2002 г. группой европейских ученых был представлен обзор фитосоциологических альянсов [20]. Данная публикация рассматривалась авторами в качестве связующего звена между классификацией местообитаний EUNIS и международными научными экологическими исследованиями [4–6, 21, 22]. Классификация фитосоциологических альянсов является 4-уровневой иерархической структурой. Ее нижний уровень (4-й) составлен альянсами (союзами) (933), альянсы сгруппированы в порядки (233), порядки формируют классы (80), а классы – формации (15). Названия синтаксонов даны согласно международному кодексу фитосоциологической номенклатуры [23, 24].

Для создания целостной картины растительности в Европе и укрепления сотрудничества фитосоциологов Европейского обследования растительности EVS – рабочей группы Международной ассоциации науки о растительности (International Association for Vegetation Science) – с 1992 г. проводятся семинары и совещания, посвященные различным аспектам классификации растительного покрова. Параллельно с этой деятельностью EVS также разработала обзор типов растительности Европы до уровня альянсов, включая Макаронезию и европейскую часть бывшего СССР [20].

В 2016 г. группой исследователей EVS была представлена «Растительность Европы: иерархическая флористическая система классификации сообществ сосудистых растений, мхов и лишайников, а также водорослей» для Европы и некоторых прилегающих к ней территорий в рамках границ тектонических структур [17]. Создание данной классификации было призвано решить следующие задачи: представить всеобъемлющую иерархическую синтаксономическую систему союзов, порядков и классов синтаксономии Брауна-Бланке для перечисленных выше организмов, произрастающих на территории Европы; кратко охарактеризовать с эколого-географической точки зрения принятые синтаксономические понятия; связать все доступные синонимы с этими понятиями; предоставить список диагностических видов для каждого принятого класса.

В ходе работы над данной классификацией ее авторы проанализировали около 10 тыс. библиографических источников и составили исчерпывающий список ранее предложенных исследователями синтаксономических единиц. Для каждой из них проведена оценка на предмет флористической и экологической отчетливости, ясности географического распределения и соответствия номенклатурному коду. Принятые единицы были собраны в 3 системы классов, порядков и союзов, в так называемый европейский контрольный список растительности (EuroVegChecklist – EVC), состоящий в свою очередь из 3 контрольных списков для сообществ, в которых преобладают сосудистые растения (EVC1), мхи и лишайники (EVC2), а также водоросли (EVC3). Для сообществ с преобладанием сосудистых растений выделили 1108 альянсов, 300 порядков и 109 классов. Список EVC2 включает в себя 27 классов, 53 порядка и 137 альянсов, а EVC3 – 13 классов, 24 порядка и 53 альянса [17].

В отличие от более ранних классификаций здесь использован альтернативный подход к упорядочению классов, который следует концептуальным основам зональности растительности и связанным с ней понятиям азональности и интразональности. На верхнем уровне классификации находится список типичных для биомов зональных классов. Их описание произведено по расположению с севера на юг. Интразональная растительность представлена в виде отдельных групп классов, связанных с соответствующими зонами. Азональная растительность, которая встречается в нескольких биомах/зонах, объединяется по основным экологическим факторам, таким как режим увлажнения или уровень засоления [17].

Данная классификация представлена в виде базы данных в интернет-ориентированной информационной системе [26]. Точками входа в базу данных на верхнем (1-м) уровне являются перечисленные 3 группы организмов. Все сообщества высших растений разделены на 2 зональных класса (2-й уровень): зональная и интразональная растительность; азональная растительность.

В пределах зональной и интразональной растительности выделены следующие группы классов растительных сообществ (3-й уровень): А – растительность арктической зоны, В – растительность бореальной зоны, С – растительность неморальной зоны, D – растительность степной зоны, Е – растительность континентальной зоны пустынь, F – растительность средиземноморской зоны, G – растительность Канарских островов, Мадейры и Азорских островов.

Для интразональной растительности (3-й уровень) выделены 10 групп классов: Н – аллювиальные леса и кустарники; I – леса и кустарники на болотах; J – растительность прибрежных скал и дюн; K – растительность скальных расщелин и осыпей; L – арктико-альпийская растительность насыщенных снегом местообитаний; M – растительность соленых и солоноватых вод и болот; N – водная растительность пресных водоемов; O – растительность пресноводных источников, береговых линий и болот; P – растительность заболоченных территорий и болот; Q – антропогенная растительность.

На 4-м уровне базы данных информационной системы находятся классы (1-й уровень) – всего 109. Для их обозначения используют заглавные буквы, начиная с «А», и названия классов. Буква указывается слева от названия класса. На 5-м уровне приведены кодированные обозначения и названия порядков (всего – 300), относящиеся ко 2-му уровню флористической классификации. Код

порядка формируется путем добавления слева от кодированного обозначения класса 2-значного номера (01, 02 и т. д.). На 6-м уровне в базе данных информационной системы приводятся кодированные обозначения альянсов (всего – 1108), которые образуются добавлением заглавной буквы слева от кода порядка, начиная с буквы «А», и их названия (3-й уровень классификации).

Например, для типа местообитания сосновых таежных земель «G3.B *Pinus taiga woodland*» в информационной системе классификации EUNIS приведена ссылка на название альянса «*Dicrano-Pinion* (Libbert 1933) W. Matuszkiewicz 1962». В информационной системе флористической классификации этот альянс находится в разделе: «Зональная и интразональная растительность» → «B – растительность бореальной зоны» → «BA (PIC) – *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939» → «BA03 (PIC-03) – *Pinetalia sylvestris* Oberd. 1957» → «BA03A (PIC-03A) – *Dicrano-Pinion sylvestris* (Libbert 1933) W. Matuszkiewicz 1962 nom. conserv. Propos».

Таким образом, общими усилиями большого количества специалистов разных научных направлений удалось соединить системой кросс-связей 3 классификации: европейских типов леса EFT, местообитаний EUNIS и флористическую классификацию EVS. Успешная реализация данного подхода является хорошим примером взаимного дополнения, детализации или обобщения классификаций единиц растительного покрова, а также условий местопроизрастания растительности без необходимости отрицания полученных ранее результатов и создания новых классификаций.

Необходимо отметить, что реализация географического принципа в европейской классификации типов леса сближает ее с российскими генетическими типологиями. При этом тип леса в EFT более крупная единица растительного покрова по сравнению с типом леса в генетической и тем более в естественных российских классификациях. EFT также в меньшей степени учитывает особенности лесовосстановления после катастрофических воздействий, чем генетическая классификация.

Учет сукцессионной динамики лесных сообществ в европейской классификации леса обозначен на теоретическом уровне и реально возможен только за счет информации, полученной из классификации местообитаний EUNIS. При этом учет антропогенных воздействий посредством включения их в диагностические признаки типа леса является важным достоинством данной классификации.

Успешно реализованный опыт установления взаимосвязей между единицами растительного покрова 3 разработанных европейскими учеными классификаций указывает на направление возможных исследований: становится очевидной необходимость дальнейших научных изысканий в области классификации типов леса и других классификаций растительного покрова, создания информационных систем, реализующих возможность установления взаимосвязи между типами леса разных лесотипологических классификаций, а также единицами растительного покрова других классификаций растительности Российской Федерации.

Выводы

1. Тип леса в европейской классификации типов леса EFT – крупная единица лесной растительности, выделяемая в пределах биогеографических регионов по общности лесорастительных условий, структуре и продуктивности

растительности, степени антропогенной трансформации. Учет лесорастительных условий и соблюдение географического принципа сближают ЕФТ и генетическую лесную типологию. Однако полной аналогии нет: тип леса по первой из классификаций – более крупная единица растительного покрова, чем по второй (и тем более, чем по естественным российским классификациям), также ЕФТ в меньшей степени учитывает особенности лесовосстановления после катастрофических воздействий.

2. Учет сукцессионной динамики лесных биогеоценозов прорабатывается на теоретическом уровне. Практически учет возможен за счет информации, полученной из классификации местообитаний EUNIS (Европейская информационная система о природе).

3. Достоинством классификации ЕФТ является включение антропогенных воздействий в число ключевых диагностических признаков типа леса. Принятие во внимание данного вида воздействия осуществляется посредством оценки степени натуральности лесов, количества лесных видов, характеристики и интенсивности антропогенного воздействия.

4. Классификация ЕФТ устанавливает перекрестные связи с другими системами классификации типов леса, применяемыми как в рамках национальных систем инвентаризации лесов, так и на уровне ЕС.

5. Использование реализованного в классификации фитоценологических альянсов, известной в настоящее время как EVS (Европейское обследование растительности), эколого-флористического подхода Брауна-Бланке дает возможность детального экологического анализа, учета не только продуктивности древостоя, но и уровня биоразнообразия в типе леса, что делает классификацию более полезной для научных исследований и охраны природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванова Н.С. Лесотипологические особенности биоразнообразия и восстановительно-возрастной динамики растительности горных лесов Южного и Среднего Урала: дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2019. 304 с.

Ivanova N.S. *Forest Typological Features of Biodiversity and Restoration-Age Dynamics of Mountain Forest Vegetation of the Southern and Middle Urals*: Dr. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2019. 304 p. (In Russ.).

2. Barbati A., Corona P., Marchetti M. *European Forest Types*. EEA Technical Report No. 9/2006. Copenhagen, European Environment Agency, 2007. 98 p. Available at: https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2006_9 (accessed 05.11.20).

3. Barbati A., Marchetti M., Chirici G., Corona P. European Forest Types and Forest Europe SFM Indicators: Tools for Monitoring Progress on Forest Biodiversity Conservation. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 321, pp. 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.004>

4. Biondi E. Phytosociology Today: Methodological and Conceptual Evolution. *Plant Biosystems*, 2011, vol. 145, iss. sup1, pp. 19–29. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602748>

5. Blasi C., Frondoni R. Modern Perspectives for Plant Sociology: The Case of Ecological Land Classification and the Ecoregions of Italy. *Plant Biosystems*, 2011, vol. 145, iss. sup1, pp. 30–37. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602747>

6. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie*. Wien, Springer, 1964. 866 p. (In Ger.). <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>
7. Caudullo G., Pasta S., Giannetti F., Barbati A., Chirici G. European Forest Classifications. *European Atlas of Forest Tree Species*. Ed. by J. San-Miguel-Ayanz, D. de Rigo, G. Caudullo, T. Houston Durrant, A. Mauri. Luxembourg, Publication Office of the European Union, 2016, pp. 32–33. <https://doi.org/10.2760/233115>
8. Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora. *Official Journal of the European Communities*, 1992, vol. 206, pp. 7–50.
9. D'Annunzio R., Sandker M., Finegold Y., Min Z. Projecting Global Forest Area Towards 2030. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 352, pp. 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.014>
10. Davies C.E., Moss D., Hill M.O. *EUNIS Habitat Classification Revised 2004*. European Environment Agency, 2004. 307 p.
11. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic Forest Typology as a Scientific and Methodological Basis for Environmental Studies and Forest Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 609, art. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>
12. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Popov A., Terekhov G. Development of Ideas Within the Framework of the Genetic Approach to the Classification of Forest Types. *Baltic Forestry*, 2021, vol. 27, iss. 1, art. 466. <https://doi.org/10.46490/BF466>
13. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Development of Forest Typology in Russia. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 298–303. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2014.00572.7>
14. Maiti R., Rodriguez H.G., Ivanova, N.S. *Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications*. UK, Wiley Blackwell, 2016. 352 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
15. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. *Forest Europe*. 2021. Available at: <https://foresteurope.org/> (assessed 06.03.21).
16. Mucina L. Classification of Vegetation: Past Present and Future. *Journal of Vegetation Science*, 1997, vol. 8, iss. 6, pp. 751–760. <https://doi.org/10.2307/3237019>
17. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K., Theurillat J., Raus T., Čarni A. et al. Vegetation of Europe: Hierarchical Floristic Classification System of Vascular Plant, Bryophyte, Lichen, and Algal Communities. *Applied Vegetation Science*, 2016, vol. 19, iss. S1, pp. 3–264. <https://doi.org/10.1111/avsc.12257>
18. Parrotta J.A. Present Challenges to Global Forests and the Role of IUFRO. *iForest*, 2019, vol. 12, iss. 6, pp. 488–490. <https://doi.org/10.3832/ifor0066-012>
19. *Pinus* Taiga Woodland. European Environment Agency. 2021. Available at: <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/1758#legal> (assessed 06.05.21).
20. Rodwell J.S., Schaminée J.H.J., Mucina L., Pignatti S., Dring J., Moss D. *The Diversity of European Vegetation*. Wageningen, National Reference Centre for Agriculture, Nature and Fisheries, 2002. 115 p.
21. Russo G., Pedrotti F., Gafta D. Typology and Synecology of Aspen Woodlands in the Central-Southern Apennines (Italy): New Findings and Synthesis. *iForest*, 2020, vol. 13, pp. 202–208. <https://doi.org/10.3832/ifor3315-013>
22. Schaminée J.H.J., Janssen J.A.M., Hennekens S.M., Ozinga W.A. Large Vegetation Databases and Information Systems: New Instruments for Ecological Research, Nature Conservation, and Policy Making. *Plant Biosystems*, 2011, vol. 145, iss. sup1, pp. 85–90. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602744>

23. Theurillat J.-P., Willner W., Fernández-González F., Bültmann H., Čarni A., Gigante D., Mucina L., Weber H. International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th Edition. *Applied Vegetation Science*, 2021, vol. 24, iss. 1, art. e12491. <https://doi.org/10.1111/avsc.12491>

24. Weber H.E., Moravec J., Theurillat J.-P. International Code of Phytosociological Nomenclature. 3rd Edition. *Journal of Vegetation Science*, 2000, vol. 11, iss. 5, pp. 739–768. <https://doi.org/10.2307/3236580>

25. Welcome to EUNIS, the European Nature Information System. *European Environment Agency*. 2021. Available at: <https://eunis.eea.europa.eu> (assessed 06.05.21).

26. Vegetation of Europe. Hierarchical Floristic Classification System of Vascular Plant, Bryophyte, Lichen, and Algal Communities. *European Vegetation Survey*. Available at: <https://www.synbiosys.alterra.nl/evc/> (accessed 05.11.20).

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 630*187:582.475

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-25-38

Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми

А.Ф. Осипов[✉], канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9583-2015](https://orcid.org/0000-0003-0618-9660),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

И.Н. Кутявин, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

А.В. Манов, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

М.А. Кузнецов, канд. биол. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9870-2015](https://orcid.org/0000-0001-6331-9578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6331-9578>

К.С. Бобкова, д-р биол. наук, гл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9476-2015](https://orcid.org/0000-0003-0346-2879),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0346-2879>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, ГСП-2, г. Сыктывкар, Россия, 167982; osipov@ib.komisc.ru[✉], kutjavin-ivan@rambler.ru, manov@ib.komisc.ru, kuznetsov_ma@ib.komisc.ru, bobkova@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 16.10.20 / Одобрена после рецензирования 10.01.21 / Принята к печати 15.01.21

Аннотация. Цель исследования – оценить запасы фитомассы произрастающих в Республике Коми северотаежных сосняков зеленомошных и сфагновых типов. Работа выполнена в 2016–2019 гг. на постоянных пробных площадях, расположенных на территории Зеленоборского лесного стационара Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. По данным модельных деревьев выведены степенные уравнения зависимости массы отдельных фракций от диаметра ствола на высоте 1,3 м для основных лесобразующих пород – сосна, ель, лиственница, береза, – принадлежащих к зеленомошным или сфагновым типам леса. Исследованные параметры характеризуются тесной корреляцией с высокими коэффициентами аппроксимации тренда ($R^2 = 0,72–0,92$). Рассчитан индекс листовой поверхности. Сосняки зеленомошных типов отличаются довольно высокими запасами фитомассы – 136–211 т/га. В древостоях сосняков сфагновых типов сосредоточено 89–96 т/га фитомассы. Несмотря на примесь других древесных пород, ведущий пул – деревья сосны, а основная фракция (46–56 %) – стволовая древесина. Ее вклад и ствола в целом (кора + древесина) выше в сосняках зеленомошных типов по сравнению со сфагновыми, тогда как доля корней в двух этих типах леса примерно одинакова. Участие крон деревьев (хвоя/листья + ветви) в общих запасах фитомассы сосновых насаждений на автоморфных почвах достоверно ниже (в среднем 17 %), чем в сообществах на полугидроморфных и гидроморфных почвах (в среднем 22 %). Относительно большая масса хвои и листьев стала причиной высокого индекса листовой поверхности, который изменялся от 8,8 до 17,8 и от 7,7 до 9,8 га/га соответственно в сосняках зеленомошных и сфагновых типов. Установлена высокая достоверная ($R = 0,88$; $p = 0,004$) взаимосвязь индекса листовой поверхности с суммой площадей сечений деревьев, тогда как с густотой и запасом древесины она статистически незначима. Рассчитаны конверсионные коэффициенты для перевода объема древесины в запасы фитомассы отдельных фракций и пород в целом.



Приведенные данные полезны для оценки продуктивности сосновых экосистем в разных условиях произрастания при проведении мониторинга лесов (в т. ч. методами дистанционного зондирования), а также при планировании лесохозяйственных мероприятий с целью повышения продуктивности сосновых лесов.

Ключевые слова: сосняк, фитомасса, северная тайга, Республика Коми, зеленомошный тип леса, сфагновый тип леса, индекс листовой поверхности, конверсионный коэффициент

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» (регистрационный номер 1021051101417-8-1.6.19). Авторы благодарят Н.В. Торлопову, А.И. Патова и С.И. Наймушину за помощь в проведении полевых работ.

Для цитирования: Осипов А.Ф., Кутявин И.Н., Манов А.В., Кузнецов М.А., Бобкова К.С. Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 25–38. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-25-38>

Original article

Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic

Andrey F. Osipov[✉], Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [P-9583-2015](https://orcid.org/0000-0003-0618-9660), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

Ivan N. Kutjavin, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

Aleksey V. Manov, Candidate of Agriculture; Research Scientist;

ResearcherID: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

Mikhail A. Kuznetsov, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [P-9870-2015](https://orcid.org/0000-0001-6331-9578), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6331-9578>

Kapitolina S. Bobkova, Doctor of Biology, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [P-9476-2015](https://orcid.org/0000-0003-0346-2879), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0346-2879>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, GSP-2, Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russian Federation; osipov@ib.komisc.ru[✉], kutjavin-ivan@rambler.ru, manov@ib.komisc.ru, kuznetsov_ma@ib.komisc.ru, bobkova@ib.komisc.ru

Received on October 16, 2020 / Approved after reviewing on January 10, 2021 / Accepted on January 15, 2021

Abstract. The research aims at estimating phytomass reserves of northern taiga green-moss and sphagnum pine forests growing in the Komi Republic. The study was carried out in pine forests at the Zelenoborsk forest research station of the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB Komi SC UB RAS) in 2016–2019. We analyzed sample trees data and derived power equations of the dependence of the individual fractions weight on the stem diameter at the breast height (1.3 m) for the main forest-forming species (pine, spruce, larch, and birch) of green-moss and sphagnum forest types. The studied parameters are described by close correlation with high trend approximation coefficients ($R^2 = 0.72–0.92$). The leaf area index (LAI) is calculated. Green-moss pine forests



are characterized by rather large phytomass reserves, 136–211 t/ha. While in sphagnum pine forests there are 89–96 t/ha of phytomass. Despite the admixture of other wood species, the leading pool is represented by pine trees, and the main fraction (46–56 %) is wood of stem. The input of stem wood and stem as a whole (bark and wood) is greater in green-moss pine forests compared to sphagnum pine forests, while the share of roots in these two types is approximately the same. Participation of tree crowns (needles/leaves and branches) in the total phytomass reserves of pine stands on automorphic soils is significantly lower (17 % on average) than in communities on semihydromorphic and hydromorphic soils (22 % on average). The relatively greater mass of needles and leaves resulted in a high LAI, which varied from 8.8 to 17.8 and from 7.7 to 9.8 ha/ha, respectively, in green-moss and sphagnum pine forests. We found a high reliable ($R = 0.88$; $p = 0.004$) relationship between LAI and the tree basal areas sum, whereas it is statistically insignificant with density and wood supply. The conversion factors were calculated to convert timber volume into phytomass reserves of both individual fractions and species as a whole. The presented data are useful for assessing the productivity of pine ecosystems in different growing conditions during forest monitoring (including remote sensing methods) and also when planning forest management measures in order to increase the productivity of pine forests.

Keywords: pine forest, phytomass, northern taiga, Komi Republic, green-moss forest type, sphagnum forest type, leaf area index, conversion factor

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Biology Komi SC UB RAS for the research topic “Zonal Regularities of the Structure and Productivity Dynamics of Primary and Anthropogenically Modified Phytocenoses of Forest and Bog Ecosystems of European North-East Russia” (registration number: 1021051101417-8-1.6.19). The authors are grateful to N.V. Torloпова, A.I. Patov and S.I. Naymushina for their assistance in the fieldwork.

For citation: Osipov A.F., Kutyavin I.N., Manov A.V., Kuznetsov M.A., Bobkova K.S. Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 4, pp. 25–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-25-38>

Введение

Фитомасса является важным показателем продуктивности лесов и рассматривается как экосистемная услуга, представляющая собой возобновляемые сырье и энергию, а также как резервуар углеродсодержащих парниковых газов [15, 27]. Параметры, характеризующие структуру фитомассы лесов, необходимы для мониторинга лесных экосистем, оптимального использования лесных ресурсов и рационального управления ими. При этом ограниченное количество измерений фитомассы может привести к существенным отклонениям в оценке ее структуры [22]. Как отмечено V.A. Usoltsev с соавт. [26], разнообразие лесорастительных условий делает определение запасов и структуры фитомассы древостоев труднопрогнозируемым, требует сложных в осуществлении прямых измерений, включающих рубку и фракционирование модельных деревьев.

Активное развитие получают методы дистанционного зондирования фитомассы лесных сообществ [18, 24]. Однако они нуждаются в калибровке и валидации по данным наземных исследований на постоянных и временных пробных площадях [14]. Эти сведения также требуются для разработки моделей и конверсионных коэффициентов зависимости фитомассы от таксационных показателей древостоев [6, 22].

Для мониторинга лесных экосистем посредством дистанционного зондирования необходима информация об индексе листовой поверхности, который является важнейшим показателем их функционирования, определяющим интенсивность энерго- и массообмена (потоки H_2O и CO_2) между поверхностью почвы и атмосферой и, следовательно, продукционный процесс насаждений [5]. Кроме того, индекс листовой поверхности служит ключевой структурной характеристикой, т. к. масса листвы отражает множество биологических процессов в кронах [16].

На Европейском Северо-Востоке России, объединяющем территории Республики Коми и Архангельской области, располагаются крупные массивы лесов, где сосняки произрастают на площади примерно 12 млн га. Исследования биологической продуктивности лесов в этом регионе проводятся на протяжении длительного времени. В результате достаточно хорошо освещены разные аспекты продукционного процесса и оценены запасы фитомассы в естественно развивающихся среднетаежных сосняках разных типов [3, 8–11 и др.], в искусственно созданных культурах сосны [1, 7]. Однако биологическая продуктивность северотаежных сосняков исследована слабо [3, 4].

Цель работы – оценить запасы фитомассы древостоев северотаежных сосняков разных типов в Северо-таежном лесном районе европейской части России на территории Республики Коми.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в подзоне северной тайги на территории Зеленоборского лесного стационара Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, относящегося к Северо-таежному лесному району европейской части России. Климат региона умеренно континентальный, умеренно холодный. Средняя годовая температура воздуха – $-1,6$ °С, января – $-18,8$ °С, июля – $+15,7$ °С. Количество поступающих осадков превышает испаряемость примерно в 1,5 раза и в среднем составляет 650 мм.

Сбор и анализ полученных материалов выполнены в 2016–2019 гг. Объектами послужили 8 постоянных пробных площадей (ППП), заложенных в сосняках зеленомошных и сфагновых типов. Проведена сплошная перечислительная таксация деревьев согласно общепринятым методам. Краткая таксационная характеристика сосняков дана в табл. 1.

Средневозрастные сосняки на ППП 4, 8, 19 имеют послерубочное происхождение, очистка лесосек паловая. Спелые сосняки на ППП 6, 11 и 17 развиваются после пожаров. В формировании состава древостоя при доминировании сосны также участвуют лиственница, ель, береза и осина. Древесный ярус сосняков зеленомошных типов характеризуется более сложным составом по сравнению со сфагновыми сосняками. Насаждения зеленомошных типов формируются на автоморфных глееподзолистых, гумусово-железисто-подзолистых почвах, а сфагновых – на торфяно-глеевых иллювиально-гумусово-железистых, песчаных и супесчаных, подстилаемых суглинками почвах.

Фитомассу древостоев оценивали методом модельных деревьев [13]. Проанализировано 56 модельных деревьев, в т. ч. 23 сосны, 15 елей, по 9 берез и лиственниц. Деревья отбирали за пределами ППП исходя из среднего диаметра деревьев в древостое и их распределения по ступеням толщины. 1–2 дерева были из ступени толщины, относящейся к среднему диаметру, 1–2 – из максимальной и минимальной ступеней толщины. Остальные деревья отбирали из промежуточных ступеней толщины.

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика сосняков
Brief inventory description of pine forests

Тип леса (№ ППП)	Состав*	Густота, экз./га	Запас древесины, м ³ /га	Сумма площадей сечения, м ² /га	Бонитет	Возраст, лет**	Запас фитомассы, т/га	Структура фитомассы***
Зеленомошный (4)	8С1Е1Б+Ос ед.,Лц	3551	265	37,8	III	43–74	186,8±17,3	75С13Е8Б3Ос1Лц
Зеленомошный (6)	5С3Лц2Ос+Е,Б	790	277	29,2	IV	102–146	204,1±15,8	46С24Ос21Лц5Б4Е
Чернично-зеленомошный (8)	10С ед.,Лц,Е,Б	3620	225	31,0	IV	46–78	136,3±15,7	97С1Е1Лц1Б
Зеленомошный (11)	9С1Лц ед.,Е,Б	890	303	33,3	IV	104–133	209,6±23,2	85С11Лц2Е2Б
Чернично-зеленомошный (19)	8С2Ос+Б ед.,Е	3593	286	38,1	IV	48–69	179,6±16,9	74С21Ос4Б1Е
Долгомошно-сфагновый (15)	6С2Е2Б+Лц	2601	93	18,4	V	59–75	88,6±5,4	57С22Е16Б5Лц
Осоково-сфагновый (17)	10С+Б	1240	104	16,4	Va	72–238	88,8±10,4	98С2Б
Сфагновый (21)	9С1Е+Б	3336	121	23,1	V	51–171	95,9±8,3	88С7Е5Б

*Рассчитан по вкладу древесной породы в общий запас древесины. ** Приведен разброс значений для деревьев сосны. *** Приведена доля пород в общем запасе фитомассы древостоя.

Разделку моделей проводили в конце июля – начале августа. Дерево спиливали у шейки корня, а затем полностью разбирали по фракциям и взвешивали. Массу корней определяли методом мелких и крупных монолитов. Для установления влажности отдельных фракций, а также соотношений кора–древесина, хвоя–ветви отбирали образцы на разных высотах ствола с его разделением на 1-, 2-метровые секции и фракции «охвоенные ветви» с разных высот. После чего все отобранные образцы обрабатывали в камеральных условиях.

Для оценки фитомассы древостоев проанализировали ряд традиционно применяемых для этих целей [13, 28] регрессионных (логарифмическое, полиномиальное, степенное) уравнений связи массы отдельных фракций с диаметром ствола. Применены степенные уравнения зависимости массы отдельных компонентов фитомассы от диаметра ствола на высоте 1,3 м (табл. 2), выбранные в соответствии с анализом кривой, которая не должна пересекать ось абсцисс и давать отрицательные значения фитомассы, а также должна иметь небольшую величину стандартной ошибки уравнения регрессии (SEE) и высокий коэффициент детерминации (R^2).

Таблица 2

Характеристика уравнений ($y = aD^b$) зависимости массы отдельных фракций фитомассы (y , кг) от диаметра ствола (D , см) на высоте 1,3 м
Characteristics of the equations ($y = aD^b$) of the dependence of the individual phytomass fractions weight (y , kg) on the stem diameter (D , cm) at breast height

Порода	Тип леса	Фракция	Коэффициенты уравнения		R^2	SEE
			a	b		
Сосна	Зеленомошный	Хвоя	0,0487	1,7790	0,91	1,90
		Ветви	0,0088	2,5716	0,97	5,10
		Древесина ствола	0,0357	2,6346	0,94	20,80
		Кора ствола	0,0216	1,9788	0,97	0,90
		Корни	0,0348	2,3664	0,98	6,60
	Сфагновый	Хвоя	0,0148	2,2232	0,94	0,41
		Ветви	0,0074	2,7938	0,92	2,13
		Древесина ствола	0,0246	2,7509	0,99	4,79
		Кора ствола	0,0193	1,9665	0,96	0,05
		Ель	Зеленомошный	Хвоя	0,2264	1,3548
Ветви	0,1234			1,6137	0,86	2,31
Древесина ствола	0,0477			2,5061	0,99	4,04
Кора ствола	0,0143			2,2103	0,98	0,75
Корни	0,0287			2,4521	0,99	1,90
Долгомошный	Хвоя		0,0602	1,7704	0,88	1,53
	Ветви		0,0249	2,1742	0,88	2,66
	Древесина ствола		0,0704	2,3183	0,98	4,88
	Кора ствола		0,0304	2,0591	0,96	1,18

Окончание табл. 2

Порода	Тип леса	Фракция	Коэффициенты уравнения		R ²	SEE
			<i>a</i>	<i>b</i>		
Лиственница	Зеленомошный	Хвоя	0,0014	2,6120	0,94	0,54
		Ветви	0,0028	2,9399	0,95	1,77
		Древесина ствола	0,1096	2,2774	0,95	5,68
		Кора ствола	0,0357	2,1117	0,88	1,95
Береза	Зеленомошный	Листья	0,0282	1,4876	0,72	0,17
		Ветви	0,0094	2,4443	0,93	0,31
		Древесина ствола	0,1372	2,1225	0,92	2,38
		Кора ствола	0,0042	3,0340	0,87	1,36

Отмечено [13, 19], что использование степенных уравнений дает более точные оценки фитомассы. Запасы отдельных фракций осины рассчитывали по уравнениям, приведенным в [12], а массу корней лиственницы, березы и осины – по соотношению надземной и подземной частей, используя базу данных оценок фитомассы на ППП для исследуемых пород [25].

Индекс листовой поверхности определяли по массе листьев с применением переводных коэффициентов. Для сосны, ели и березы брали собственные данные [3], для осины и лиственницы – приведенные в [5]. Практический интерес имеет выведение конверсионных коэффициентов, т. е. отношений абсолютно сухой массы (т/га) конкретной фракции (или породы в целом) к запасу стволовой древесины, сконцентрированной в отдельной породе (м³/га).

Для сравнения фитомассы в сосняках зеленомошных и сфагновых типов применяли t-критерий Стьюдента в случае нормального распределения исходных данных и U-критерий Манна–Уитни в случае ненормального распределения. Нормальность распределения проверяли при помощи критерия Шапиро–Уилка. Статистическую обработку и анализ данных проводили в Microsoft Excel 2010 и программной среде R (версия 4.03) [20].

Результаты исследования и их обсуждение

Фитомасса древостоев. Запасы органического вещества фитомассы средневозрастных зеленомошных сосняков на дренированных почвах варьируют от 136 до 189 т/га, средневозрастных сфагновых сосняков на полугидроморфных и гидроморфных почвах – от 89 до 96 т/га. Довольно высокие показатели фитомассы (204–210 т/га) отмечены для спелых зеленомошных сосняков на ППП 6 и 11. Относительно высокая продуктивность средневозрастных древостоев на ППП 4 и 19, сопоставимая со спелыми, определяется большой густотой древесного яруса в этих сообществах.

Во всех исследованных насаждениях основной вклад в фитомассу древостоя вносит сосна, доля которой изменяется от 45 (ППП 6) до 98 % (ППП 8), формируя в среднем 75 % биомассы древесного яруса в сосняках зеленомошных типов. В этих насаждениях в накоплении органического вещества также значительны доли осины (в среднем 10 %) и лиственницы (в среднем 7 %),

тогда как доли ели и березы невысоки (в среднем по 4 %). Неблагоприятные условия произрастания сфагновых сосняков привели к более высокому участию (80 %) в аккумуляции органического вещества деревьев сосны. Доля ели в составе фитомассы составляет в среднем 10 %, березы – 7 %. Тонкомерные угнетенные деревья лиственницы выявлены только в долгомошно-сфагновом сосняке (ППП 15), где более благоприятные условия увлажнения, чем в сфагновых сосняках. В целом достоверных различий по вкладу отдельных пород между относящимися к неодинаковым типам леса древостоями не установлено ($p > 0,05$).

Основной фракцией, в которой сосредоточена примерно половина (46–56 %) органического вещества, накопленного древостоями, является стволовая древесина (рис. 1). Также значима в концентрации фитомассы (23–25 %) роль корней. Выявлено, что вклад стволовой древесины и ствола в целом (кора + древесина) в сосняках зеленомошных типов выше по сравнению со сфагновыми (t-критерий: $p = 0,039$ и $p = 0,012$ соответственно), тогда как доля корней в двух типах сосняков примерно одинакова (U-критерий: $p = 0,754$). Участие крон деревьев (хвоя/листья + ветви) в накоплении органического вещества насаждений на автоморфных почвах достоверно (t-критерий: $p = 0,013$) ниже (в среднем 17 %), чем в сообществах на полугидроморфных и гидроморфных почвах (в среднем 22 %), что, возможно, определяется невысокой полнотой древостоев в условиях переувлажнения почв. Также отметим, что в результате снижения меж- и внутривидовой конкуренции древесных растений сфагновых сосновых сообществ в данных типах леса создаются возможности для более активного освоения пространства кронами и корневой системой.

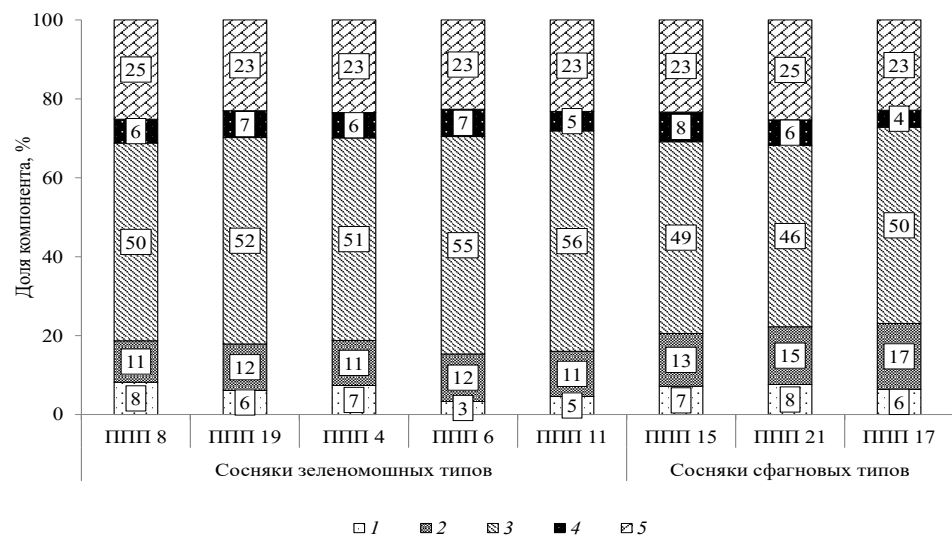


Рис. 1. Вклад отдельных фракций в общие запасы фитомассы: 1 – хвоя/листья; 2 – ветви; 3 – древесина ствола; 4 – кора ствола; 5 – корни (в рамке на диаграмме – доля компонента)

Fig. 1. Input of the individual fractions in total phytomass reserves: 1 – needles/leaves; 2 – branches; 3 – stem wood; 4 – stem bark; 5 – roots (the component share in the boxes of the diagram)

Сравнение результатов определения фитомассы исследуемых сосняков с содержащимися в литературе сведениями для насаждений, сходных по возрасту, отнесенности к типу леса и растительным зонам европейской части тайги, позволяет

оценить производительность древостоев северотаежных сосняков на территории Республики Коми. Так, по данным А.Д. Вакурова [4], запасы фитомассы в 90-летнем чернично-зеленомошном сосняке составляют 248 т/га, что на 15 % выше, чем в исследованных нами спелых зеленомошных сосняках. По сведениям ученого, масса 55-летнего черничного сосняка близка к биомассе средневозрастных зеленомошных сосняков в Республике Коми. Довольно близкие (46–82 т/га) нашим оценки фитомассы древесного яруса для заболоченных северотаежных сосняков этого региона получены А.А. Молчановым и А.Ф. Поляковой [9].

Запасы фитомассы в зеленомошных сосняках северной тайги сопоставимы или превышают массу древесного яруса в среднетаежных сосновых насаждениях Республики Коми. Так, среднетаежные черничные сосняки на автоморфных подзолистых почвах характеризуются относительно высокой продуктивностью и к 70-летнему возрасту накапливают 137–213 т/га фитомассы [2]. В предгорьях Урала в спелом черничном сосняке с незначительной (8 %) долей участия ели и березы аккумулируется 175 т/га органического вещества [8].

Как отмечено Р.В. Reich с соавт. [21], фитомасса в лесных сообществах уменьшается со снижением среднегодовой температуры воздуха. Однако небольшая разница в накоплении фитомассы древесного яруса сосняками северной и средней подзон тайги, вероятно, объясняется более сложным породным составом древостоев северотаежных сосняков. Это подтверждают и результаты исследований D. Sheil и F. Bongers [23], показывающие, что насаждения с большим разнообразием видов древесных растений в составе более продуктивны.

Увеличение продуктивности сосновых древостоев путем создания 2-го яруса из ели было предложено нами ранее [3]. Согласно данным табл. 1, древесный ярус исследованных сосняков зеленомошных типов формируют 4–5 видов древесных растений, тогда как в средней тайге – 3–4 вида при явном доминировании сосны.

Косвенным подтверждением приведенных данных может служить сравнение продуктивности древостоев сфагновых типов в подзонах средней и северной тайги Республики Коми. Так, фитомасса спелых и приспевающих среднетаежных сфагновых сосняков составляет 112–113 т/га [8, 11], что в 1,2–1,3 раза выше, чем в северотаежных. Следует отметить сходство видового состава древесных пород, формирующих древостои. В обеих подзонах тайги при более благоприятных условиях увлажнения древесный ярус образуют 4 вида древесных пород, при неблагоприятных – только 2.

Индекс листовой поверхности. Индекс листовой поверхности в исследованных средневозрастных зеленомошных сосняках довольно высок и изменяется от 15,0 до 17,8 га/га, превышая соответствующие показатели для средневозрастных насаждений сфагнового типа в 2,0–2,3 раза (рис. 2). Ведущая роль в формировании индекса листовой поверхности древостоев принадлежит хвое сосны. Ее доля в зеленомошных сосняках изменяется от 71 до 99 %, а в сфагновых – от 59 до 99 %. Также достаточно значимо участие хвои ели (в среднем 8 % в зеленомошных и 20 % в сфагновых типах). Полученные данные в 1,3–2,8 раза выше значений, приведенных ранее для средневозрастных северо- и среднетаежных сосняков [2, 3] региона, что, видимо, объясняется большей массой листвы высокополнотных древостоев исследуемых насаждений.

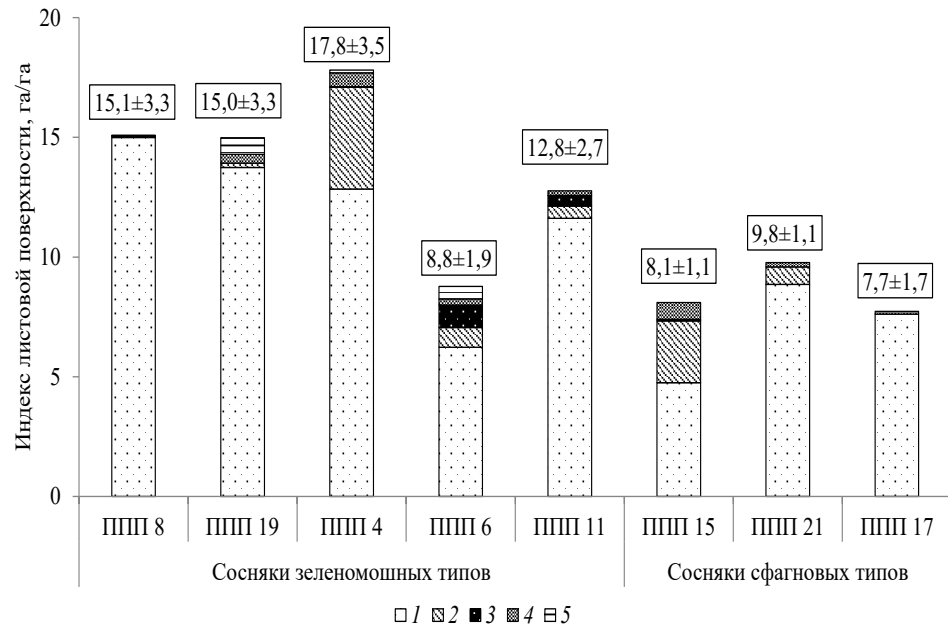


Рис. 2. Индекс листовой поверхности и вклад отдельных пород в его формирование в северотаежных сосняках: 1 – сосна; 2 – ель; 3 – лиственница; 4 – береза; 5 – осина

Fig. 2. LAI and input of individual species in its formation in northern taiga pine forests: 1 – pine; 2 – spruce; 3 – larch; 4 – birch; 5 – aspen

Для оценки индекса листовой поверхности по таксационным характеристикам древостоев мы проанализировали его взаимосвязь с плотностью древостоев, запасом древесины и суммой площадей сечений в насаждении. Статистически достоверная взаимосвязь выявлена только с абсолютной полнотой ($R = 0,88$; $p = 0,004$), с количеством деревьев ($R = 0,59$; $p = 0,120$) и объемом стволовой древесины ($R = 0,66$; $p = 0,076$) связь отсутствует. Как отмечено А.В. Иванов с соавт. [17], в смешанных лесах Дальнего Востока индекс листовой поверхности коррелирует с суммой площадей сечения и запасом древесины, тогда как корреляция с плотностью не установлена, что, вероятно, обусловлено концентрацией большей части фитомассы листвы в крупных деревьях. Таким образом, при накоплении значительного объема экспериментальных данных возможно выведение регрессионного уравнения зависимости, позволяющего оценивать индекс листовой поверхности по таксационным показателям насаждений без применения дорогостоящего оборудования.

Конверсионные коэффициенты перевода объема древесины древостоя в запасы фитомассы. В табл. 3 приведены конверсионные коэффициенты, характеризующие усредненные данные для сосновых древостоев зеленомошных и сфагновых типов. Выявлено, что для большинства фракций и древесных растений достоверных различий в конверсионных коэффициентах в зависимости от условий произрастания нет, исключение составляют кроны и корни деревьев сосны, а также древесина березы. Более высокие значения этого показателя наблюдались для сфагновых типов леса, что связано с замедленной скоростью роста в неблагоприятных условиях произрастания на полугидроморфных почвах.

Таблица 3

**Конверсионные коэффициенты для древесных растений
в северотаежных сосняках, кг/м³**

Conversion factors for woody plants in northern taiga pine forests, kg/m³

Порода	Фракция					Итого*
	хвоя/листья	ветви	древесина	кора	корни	
Сосна	41±8	71±7	<u>348±39</u>	<u>32±4</u>	156±6	649±40
	60±4	138±16	407±45	40±4	205±12	850±69
Ель	<u>123±37</u>	<u>116±30</u>	<u>321±57</u>	<u>49±10</u>	<u>171±31</u>	<u>780±154</u>
	94±36	122±22	433±67	85±25	233±26	968±177
Лиственница	<u>13±3</u>	<u>70±29</u>	<u>375±27</u>	<u>76±14</u>	<u>225±50</u>	<u>759±79</u>
	16	72	541	117	321	1068
Береза	<u>17±1</u>	<u>57±8</u>	383±39	<u>111±20</u>	<u>227±33</u>	<u>795±99</u>
	23±3	66±6	461±27	116±28	278±20	943±51
Осина	7±1	118±3	452±90	76±11	232±30	886±118

Примечание: В числителе даны конверсионные коэффициенты для зеленомошных типов сосняков (среднее ± стандартное отклонение), в знаменателе – для сфагновых. Полу-жирным шрифтом выделены фракции с достоверной разницей между типами сосняков.
* Конверсионный коэффициент древесной породы в целом без выделения фракций.

Более высокие конверсионные коэффициенты среди фракций характерны для стволовой древесины (321–461 кг/м³) и корней (156–278 кг/м³). Относительно высокие величины этих показателей отмечены у лиственных древесных растений. Меньшие значения (7–123 кг/м³) установлены для хвои/листьев. Максимальный коэффициент в этой фракции обнаружены у деревьев ели, обладающих развитой кроной. Полученные данные сопоставимы с конверсионными коэффициентами для основных видов древесных растений в условиях северной тайги, приведенными как для отдельных фракций, так и для древесных пород в целом Д.Г. Замолодчиковым с соавт. [6] и D. Schepaschenko с соавт. [22].

Заключение

Получены новые сведения, характеризующие структурно-функциональную организацию северотаежных сосняков. Древостои сосняков как зеленомошных, так и сфагновых типов являются смешанными по составу и формируются 4–5 видами древесных растений.

Впервые выведены регрессионные уравнения связи фитомассы отдельных фракций с диаметром ствола, позволяющие определять запасы органического вещества древостоев с учетом типов леса. Средневозрастные и спелые сосняки зеленомошных типов формируют древостои IV (редко III) классов бонитета с запасами фитомассы 136–211 т/га. Масса органического вещества в древостоях сфагновых сосняков составляет 89–96 т/га. Распределение фитомассы по фракциям соответствует закономерностям, полученным ранее для сосняков Севера, когда в качестве формирующих компонентов были выделены древесина ствола и корни. Установлена достоверно более высокая (в среднем 22 %; t-критерий: $p = 0,013$) доля фитомассы крон (ветви + хвоя) в сфагновых сосняках по сравнению с зеленомошными.

Для сосняков северной тайги Республики Коми листовой индекс составил 7,7–17,8 га/га и изменяется в соответствии с продуктивностью древостоя. Установлена достоверная ($R = 0,88$; $p = 0,004$) взаимосвязь индекса листовой поверхности с суммой площадей сечений деревьев. Рассчитаны конверсионные коэффициенты для оценки запасов фитомассы отдельных фракций и пород в целом по объему древесины. Приведенные данные полезны для характеристики продуктивности сосновых экосистем в разных условиях произрастания при проведении мониторинга лесов (в т. ч. методами дистанционного зондирования), а также при планировании лесохозяйственных мероприятий с целью повышения продуктивности сосновых лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса культур сосны и ели в европейской части России. Архангельск, 2004. 112 с.
Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce Plantations in the European Part of Russia*. Arkhangelsk, 2004. 112 p. (In Russ.).
2. Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / под ред. К.С. Бобковой, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2001. 278 с.
Process of Bioproductivity in the North Forest Ecosystems. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 278 p. (In Russ.).
3. Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
Bobkova K.S. *Biological Productivity of Coniferous Forests of the European North-East*. Leningrad, Nauka Publ., 1987. 156 p. (In Russ.).
4. Вакуров А.Д. Продуктивность сосняков в подзоне северной тайги // Продуктивность органической массы лесов в разных природных зонах. М., 1973. С. 7–25.
Vakurov A.D. Productivity of Pine Forests in Northern Taiga Subzone. *Productivity of Forest Organic Matter in Different Natural Zones*. Moscow, 1973, pp. 7–25. (In Russ.).
5. Грабовский В.В., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д. Оценка индекса листовой поверхности для территории России по данным государственного лесного реестра // Лесоведение. 2015. № 4. С. 255–259.
Grabovskii V.V., Zukert N.V., Korzukhin M.D. Leaf Area Index Estimate for the Russian Territory Based on the State Forest Inventory. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 4, pp. 255–259. (In Russ.).
6. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.
Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. Determination of Carbon Reserves by Conversion-Volume Factors Related to the Age of Stands. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1998, no. 3, pp. 84–93 (In Russ.).
7. Клевцов Д.Н., Тюкавина О.Н., Адаи Д.М. Биоэнергетический потенциал надземной фитомассы культур сосны обыкновенной таежной зоны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 4. С. 49–55.
Klevtsov D.N., Tyukavina O.N., Adayi G.M. Bioenergy Potential of Aerial Phytomass of Scots Pine in the Middle Taiga Forest Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 49–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.49>
8. Кутявин И.Н. Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 176 с.

Kutyavin I.N. *Pine Forests of the Northern Cis-Urals: Structure, Growth, Productivity*. Syktyvkar, IB Komi SC UB RAS Publ., 2018. 176 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.31140/book-2018-02>

9. Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.

Molchanov A.A. *Productivity of Organic Matter in Forests of Different Zones*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 275 p. (In Russ.).

10. Молчанов А.А., Поляков А.Ф. Продуктивность органической массы в сосняках сфагновых // Продуктивность органической и биологической массы леса. М., 1974. С. 43–78.

Molchanov A.A., Polyakov A.F. Productivity of Organic Matter in Sphagnum Pine Forests. *Productivity of Organic and Biological Matter of the Forest*. Moscow, 1974, pp. 43–78. (In Russ.).

11. Осипов А.Ф. Биологическая продуктивность сосняков чернично-сфагновых средней тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 1. С. 43–51.

Osipov A.F. Biological Productivity of Whortleberry-Sphagnum Pine Forests in Medium Boreal Taiga. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 1, pp. 43–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X13050110>

12. Тарасов С.И., Пристова Т.А., Бобкова К.С. Динамика фитомассы древостоя лиственно-хвойного фитоценоза средней тайги Республики Коми // Сиб. лесн. журн. 2018. № 1. С. 50–58.

Tarasov S.I., Pristova T.A., Bobkova K.S. Dynamics of Phytomass of a Tree Stand of the Deciduous-Coniferous Phytocenosis in Middle Taiga of Komi Republic. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2018, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20180105>

13. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 637 с.

Usol'tsev V.A. *Biological Productivity of Forests in Northern Eurasia: Methods, Database and Its Supplements*. Yekaterinburg, UrB RAS Publ., 2007. 637 p. (In Russ.).

14. Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З., Пергер К., Дресел К., Фриц Ш., Лакида П., Мухортова Л.В., Усольцев В.А., Бобкова К.С., Осипов А.Ф., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Щепашенко М.В., Кракнер Ф. Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // Сиб. лесн. журн. 2017. № 4. С. 3–11.

Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Perger C., Dresel C., Fritz S., Lakyda P. I., Mukhortova L.V., Usoltsev V.A., Bobkova K.S., Osipov A.F., Martynenko O.V., Karminov V.N., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V., Krahner F. Forest Biomass Observation: Current State and Prospective. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 4, pp. 3–11 (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170401>

15. Bukvareva E., Zamolodchikov D., Grunewald K. National Assessment of Ecosystem Services in Russia: Methodology and Main Problems. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 655, pp. 1181–1196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.286>

16. Calders K., Origo N., Disney M., Nightingale J., Woodgate W., Armston J., Lewis Ph. Variability and Bias in Active and Passive Ground-Based Measurements of Effective Plant, Wood and Leaf Area Index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 252, pp. 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.029>

17. Ivanov A.V., Pokamestova V.Yu., Kasatkin A.S., Zamolodchikov D.G. Leaf Area Indices of Forest Stands in Natural and Disturbed Forests of Primorsky Krai. *Russian Journal of Ecology*, 2020, vol. 51, iss. 4, pp. 299–305. <https://doi.org/10.1134/S1067413620040086>

18. Lu D. The Potential and Challenge of Remote Sensing-Based Biomass Estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, iss. 7, pp. 1297–1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>

19. Payne N.J., Allan Cameron D., Leblanc J.-D., Morrison I.K. Carbon Storage and Net Primary Productivity in Canadian Boreal Mixedwood Stands. *Journal of Forestry Research*, 2019, vol. 30, iss. 5, pp. 1667–1678. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00886-0>
20. *R Core Team*. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2020. Available at: <http://www.r-project.org/index.html> (accessed 16.10.20).
21. Reich P.B., Luo Y., Bradford J.B., Poorter H., Perry Ch.H., Oleksyn J. Temperature Drives Global Patterns in Forest Biomass Distribution in Leaves, Stems, and Roots. *PNAS*, 2014, vol. 111, no. 38, pp. 13721–13726. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216053111>
22. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 6, art. 312. <https://doi.org/10.3390/f9060312>
23. Sheil D., Bongers F. Interpreting Forest Diversity-Productivity Relationships: Volume Values, Disturbance Histories and Alternative Inferences. *Forest Ecosystems*, 2020, vol. 7, art. 6. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0215-x>
24. Shobairi S.O.R., Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P. Vegetation Fractional Coverage (VFC) Estimation of Planted and Natural Zones Based on Remote Sensing. *American Journal of Environmental Policy and Management*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 21–31.
25. Usoltsev V.A. *Forest Biomass and Primary Production Database for Eurasia*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29991.70568>
26. Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P., Noritsina Yu.V., Kokh E.V. Methods and Results of Studying the Geographical Trends in the Structure of Single-Tree Biomass of Larches and Two-Needled Pines in Eurasia. *Russian Journal of Ecology*, 2016, vol. 47, pp. 442–452. <https://doi.org/10.1134/S1067413616050143>
27. Yemshanov D., McKenney D.W., Hope E., Lempriere T. Renewable Energy from Forest Residues – How Greenhouse Gas Emission Offsets Can Make Fossil Fuel Substitution More Attractive. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 2, art. 79. <https://doi.org/10.3390/f9020079>
28. Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. *Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe*. Silva Fennica Monographs 4, 2005. 63 p. <https://doi.org/10.14214/sf.sfm4>

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

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

Original article

УДК 631.531+631.8+635.92

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-39-51


Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment

*Anna V. Kul'kova*¹, *Candidate of Agriculture*; *ResearcherID*: [G-9517-2019](https://orcid.org/0000-0001-5200-233X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5200-233X>

*Natalia N. Besschetnova*¹, *Doctor of Agriculture*; *ResearcherID*: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

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

*Vladimir P. Besschetnov*¹ , *Doctor of Biology, Prof.*; *ResearcherID*: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),


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

*Yerzhan Zh. Kentbaev*², *Doctor of Agriculture, Prof.*; *ResearcherID*: [G-7677-2019](https://orcid.org/0000-0002-3308-1287),

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

*Botagoz A. Kentbaeva*², *Doctor Biology, Prof.*; *ResearcherID*: [G-8228-2019](https://orcid.org/0000-0003-0969-9754),

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

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; kulkoval2@gmail.com, besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru 

²Kazakh National Research Agrarian University, prosp. Abaya, 8, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan; kentbayev@mail.ru, kentbayeva@mail.ru

Received on October 3, 2020 / Approved after reviewing on January 11, 2021 / Accepted on January 15, 2021

Abstract. The uniqueness of the biological properties and the occurrence in nature of the Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey.), its great forestry significance, and important eco-stabilizing functions of its stands in the Northern Tian Shan are of great interest to a wide range of researchers in many countries. However, many characteristics of this endemic species have been poorly studied so far, and information on the effectiveness of its introduction is extremely limited. We investigated the characteristics of growth and development of spruce seedlings in the conditions of the Nizhny Novgorod region. The seeds were harvested in natural plantations on the territory of the Almaty State Nature Reserve, which is located in the Central part of the Trans-Ili Alatau in South-Eastern Kazakhstan. They were sown in an open ground nursery under stimulating treatment with the following bioactive stimulants: siliplant, ferovit, ecofus, kornevin, heteroauxin, zircon, extrasol, epin, and albit. The soaking of all the seeds in water at the same exposure for 24 h served as control. The aftereffect of bioactive substances in the pre-sowing stimulating treatment of Schrenk's spruce seeds was found to activate the growth processes of the aboveground part of its seedlings during the introduction into the Nizhny Novgorod region. It was found that the biennial part of seedlings axial shoot had unequal length in different experimental options. The highest values were achieved in the variants with the use of the following stimulants: ferovit (5.95 ± 0.02 cm), heteroauxin (5.62 ± 0.16 cm), ecofus (5.47 ± 0.32 cm), and albit (5.49 ± 0.015 cm). The generalized value was 5.08 ± 0.07 cm. The growth characteristics of seedlings also respond to the stimulating effect. The best results in this case were shown by ferovit (2.25 ± 0.023 cm) and heteroauxin (1.96 ± 0.17 cm). The differences in the number of side shoots are less contrasting. However, we can also see the previously noted trends: ferovit (1.42 ± 0.25 pcs); heteroauxin (1.34 ± 0.19 pcs); and albit (1.31 ± 0.19 pcs). We obtained the certificate of sufficient resource of natural conditions of the region for seed breeding of Schrenk's spruce in the open ground and the significant potential of its introduction to the Nizhny Novgorod region.



Keywords: Schrenk's spruce, introduction, seed propagation, growth stimulants, seedlings, morphometrics, analysis of variance, Nizhny Novgorod region

For citation: Kul'kova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaev Y.Zh., Kentbaeva B.A. Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 39–51. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-39-51>

Научная статья

Рост сеянцев ели Шренка (*Picea schrenkiana*) при предпосевной стимулирующей обработке семян

А.В. Кулькова¹, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [G-9517-2019](https://orcid.org/0000-0001-5200-233X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5200-233X>

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

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

В.П. Бессчетнов¹✉, д-р биол. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

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

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

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

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

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

¹Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; kulkova12@gmail.com, besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru✉

²Казахский национальный исследовательский аграрный университет, просп. Абая, д. 8, г. Алматы, Казахстан, 050010; kentbayev@mail.ru, kentbayeva@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.20 / Одобрена после рецензирования 11.01.21 / Принята к печати 15.01.21

Аннотация. Уникальность биологии и распространения ели Шренка (*Picea schrenkiana* Fisch. & С.А. Мей.), большое лесохозяйственное значение и важные эколого-стабилизирующие функции ее насаждений на Северном Тянь-Шане обуславливают неослабевающий интерес исследователей разных стран к этому эндемичному виду. Однако на сегодняшний день многие его характеристики изучены слабо, крайне ограничены сведения об эффективности интродукции. Нами исследованы особенности роста и развития сеянцев ели Шренка в условиях Нижегородской области. Семена были заготовлены в естественных насаждениях на территории Алматинского государственного природного заповедника, который расположен в центральной части Заилийского Алатау на юго-востоке Казахстана. Высевание семян производили в питомнике открытого грунта при стимулирующей обработке биоактивными препаратами: силиплантом, феровитом, экофусом, корневином, гетероауксином, цирконом, экстраСОЛОМ, эпином и альбитом. Контролем выступало намачивание семян в воде в единой для всех вариантов экспозиции 24 ч. Эффект применения биоактивных веществ при предпосевной стимулирующей обработке семян ели Шренка выразился

в активизации ростовых процессов надземной части ее семян при интродукции в Нижегородскую область. Установлена неодинаковая длина 2-летней части осевого побега семян по вариантам опыта. Наибольшие значения достигнуты в вариантах применения феровита ($5,95 \pm 0,02$ см), гетероауксина ($5,62 \pm 0,16$ см), эофуса ($5,47 \pm 0,32$ см) и альбита ($5,49 \pm 0,015$ см). Среднее значение составило $5,08 \pm 0,07$ см. Ростовые характеристики семян также реагируют на стимулирующее воздействие. Лучшие результаты и в этом случае показали препараты феровит ($2,25 \pm 0,023$ см) и гетероауксин ($1,96 \pm 0,17$ см). Менее контрастны различия по количеству боковых побегов. Однако и здесь прослеживаются ранее отмеченные тенденции: феровит – $1,42 \pm 0,25$ шт., гетероауксин – $1,34 \pm 0,19$ шт., альбит – $1,31 \pm 0,19$ шт. Получено свидетельство о достаточном ресурсе природных условий региона для семенного размножения ели Шренка в открытом грунте и о существенном потенциале ее интродукции в Нижегородскую область.

Ключевые слова: ель Шренка, интродукция, семенное размножение, стимуляторы роста, семена, морфометрия, дисперсионный анализ, Нижегородская область

Для цитирования: Kul'kova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaev Y.Zh., Kentbaeva B.A. Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 39–51. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-39-51>

Introduction

Schrenk's spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey.) is recognized as the main forest-forming species of the Northern Tian Shan [16, 47, 50] and, being an endemic species of the natural flora of this region, belongs to the dominant species of the forest cover [17, 25, 27, 48]. Having a large economic value [20, 21, 22, 29] and performing important eco-stabilizing functions [2, 18, 50], Schrenk's spruce is under constant scrutiny by researchers [1, 15, 19, 32, 33, 44]. Its occurrence in nature is described in detail [13, 25, 27, 51], the spatial and population structure of natural stands of this breed is well studied [4–6, 13], ecological reactions and biological features are described [16–18, 45, 46], data on karyology is accumulated [6, 15, 30, 43, 55]. The problems of Schrenk's spruce natural regeneration are considered in Kazakhstan and Kyrgyzstan [20, 32, 40]. The features of the Schrenk's spruce seedlings development [49] are studied and the relevance of creating its forest crops is shown [28, 34, 54] in the context of these problems. However, the taxonomy and systematic position, intraspecific variability and form diversity of this species remain debatable [4–6, 47, 48]. In the Russian Federation, the list of economically used spruce species is constantly updated, including non-regional species [10–12, 36, 37]. The Schrenk's spruce is the least studied among them. We introduced it into the Nizhny Novgorod region for the first time taking into account the formed theoretical concepts [3, 7, 8, 38, 39, 45].

The research aims at determining the prospects for the introduction of Schrenk's spruce into the Nizhny Novgorod region via evaluation of the growth processes of its seedlings against the background of stimulating treatment with bioactive compounds.

Research objects and methods

We studied two-year-old seedlings of Schrenk's spruce grown out of seeds harvested in the Almaty State Nature Reserve natural plantations. The reserve is located in the Central part of the Trans-Ili Alatau in the South-East of Kazakhstan (coordinates: $43^{\circ} 06' 00''$ N $77^{\circ} 19' 00''$ E). The high-altitude borders of the spruce forest belt

are 1,600–2,800 m above sea level. Seedlings were grown in the open ground with artificial irrigation at the experimental site of the Faculty of Forestry of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. Its geographical coordinates are 56° 19' 43" N 44° 00' 07" E, and the height above sea level is 136 m.

The methodological framework for developing operating procedures consisted of theoretical ideas on the basic requirements for the organization of an experiment (its typicality, suitability, expediency and reliability), the principles of the only logical difference and the randomized distribution of objects when they are included in the sample [23, 31, 41, 42, 52, 56]. That is why the differentiating influence of chronographic and environmental factors was levelled by simultaneous recording of all plants, including into the experiment scheme only single-aged seedlings growing in the same soil and climatic conditions, in the same agricultural background and in the same phenological state. The organizational and methodological scheme provided the construction of a one-factor variance complex and the performance of statistical analysis [14, 23, 26, 31, 41, 42, 52, 56].

Based on the fact that one of the key assessments of the plants introduction results is a set of their seed propagation indicators, we studied the morphometric parameters of the aboveground part and root systems of Schrenk's spruce seedlings in the conditions of their transfer to the Nizhny Novgorod region. At the same time, the stimulating effect of biologically active substances in pre-sowing seed treatment, which is described relative to an extensive list of tree species [24, 53], including spruce [9], was also considered. We tested the following preparations formed the test options: siliplant – 0.05 % (option 1); ferovit 0.15 % (option 2); ecofus – 0.3 % (option 3); kornevin – 0.01 % (option 4); heteroauxin – 0.02 % (option 5); zircon – 0.025 % (option 6); extrasol – 1.5 % (option 7); epin – 0.05 % (option 8); albit – 0.1 % (option 9). The soaking of all the seeds in water (Water option) at the same exposure for 24 h served as Control. The average value generalized for the entire data array is called Total. The length of the aerial part and roots were measured with a ruler with accuracy of 0.5 mm; diameter – with an electronic caliper (Digital Caliper SH20) to accuracy of 0.01 mm. The repetition of the experience is threefold. A total of 346 seedlings were biometrized.

Results and discussion

The effectiveness of Schrenk's spruce seed propagation in the conditions of introduction was evaluated by the parameters of growth of seedlings sowed in the open ground and treated with stimulators (fig. 1–3). The length of the two-year part of the axial shoot of Schrenk's spruce seedlings was not the same according to the experimental options (fig. 1a). The highest values were achieved when the following stimulators were used: ferovit (option 2; 5.95 ± 0.024 cm) and heteroauxin (option 5; 5.62 ± 0.16 cm).

The estimates for ecofus (option 3) and albit (option 9) were slightly lower: 5.47 ± 0.32 cm and 5.49 ± 0.015 cm, respectively. Even weaker is the effect of siliplant (option 1) and epin (option 8) use: 4.29 ± 0.17 and 4.31 ± 17.30 cm, respectively. A similar situation is in the group of seeds soaked in water before the sowing (Control option): 4.27 ± 0.14 cm. At the same time, the difference in estimates is clearly noticeable, and the largest of them exceeded the smallest by 1.68 cm or 1.39 times. Generalized value for the entire data array (Total option) was 5.08 ± 0.07 cm. For the other parameters of the axial shoot of seedlings, the marked trends were generally preserved (fig. 1b, 1c).

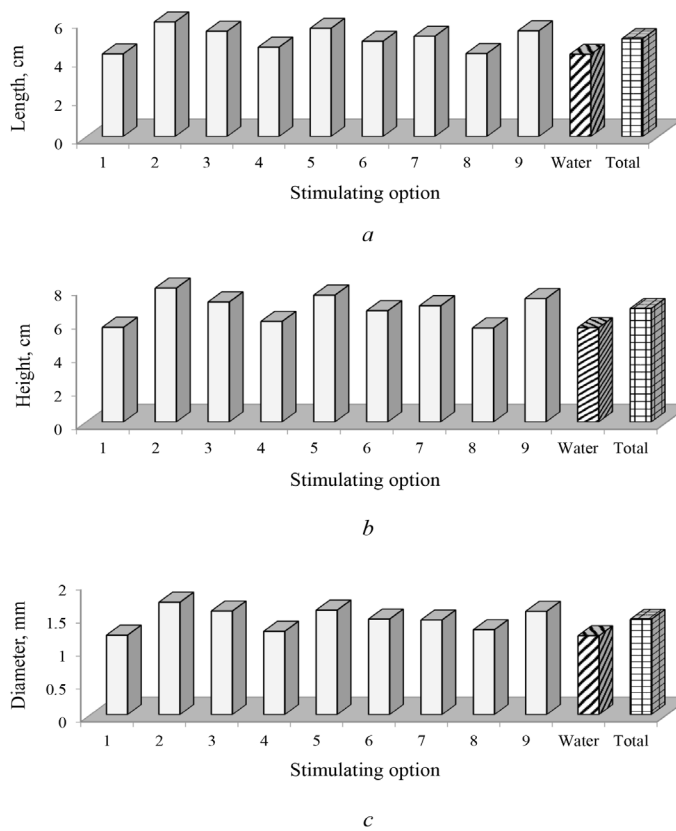
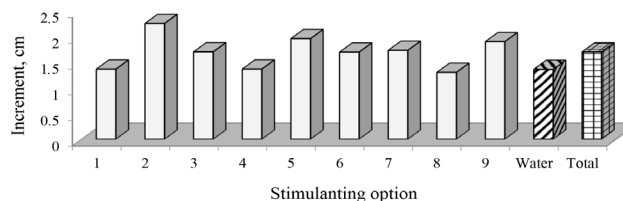


Fig. 1. Parameters of the axial shoot of Schrenk's spruce seedlings: *a* – length of the two-year part of the axial shoot; *b* – total height of the aboveground part; *c* – diameter of the root collar

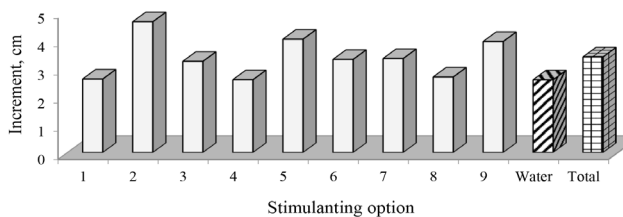
The increment characteristics of seedlings also showed heterogeneity in different options of the stimulating effect (fig. 2).

Like in the previous option, the highest current increment values were registered in the application with ferovit (option 2) and heteroauxin (option 5): 2.25 ± 0.023 cm and 1.96 ± 0.17 cm, respectively. They significantly exceeded the control value (1.36 ± 0.09 cm) and the generalized average value (1.70 ± 0.05 cm).

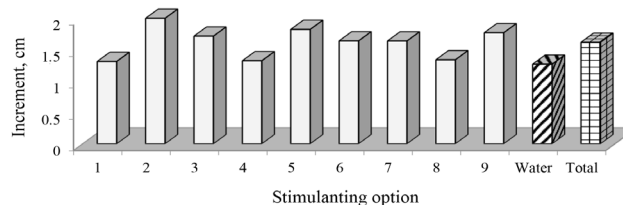
The use of albit (option 9) provoked a comparable increase (1.90 ± 0.17 cm). Other stimulants showed less effectiveness in this regard, which can be attributed to the above-mentioned increment characteristics in general (fig. 2*b*, 2*c*). The general estimates of linear growth of the axial and lateral shoots at the time of measuring, as well as their average values (fig. 3*a*, 3*b*), retained the main trends established for the characteristics of the current increment (fig. 2). The differences in the number of lateral shoots in the aboveground part of the seedlings are less contrasting (fig. 3*c*), however, the previously noted ratios are also observed here. In particular, the use of ferovite (option 2), heteroauxin (option 5) and albite (option 9) was accompanied by high values, while siliplant (option 1) and epin (option 8) had the lowest values. They were close to the control values.



a



b

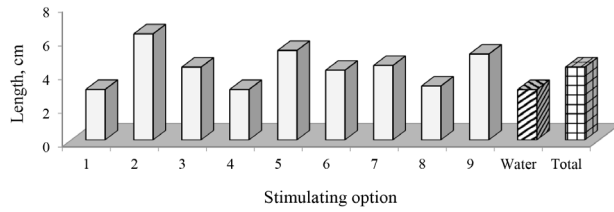


c

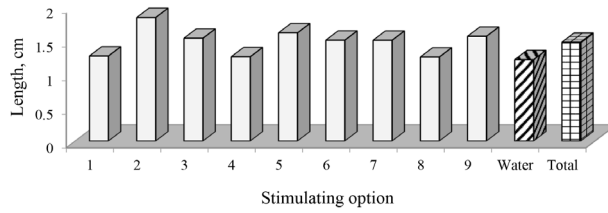
Fig. 2. Linear increment of Schrenk's spruce seedlings: *a* – current increment of the axial shoot; *b* – total current increment of shoots; *c* – average current increment of shoots

So it was found that the stimulating seed treatment of Schrenk's spruce seedlings by different stimulators provokes different changes in their growth and development features. The following features of growth and development were studied: feature 1 – height of two-year aboveground part of the seedlings without the last increment, cm; feature 2 – diameter of the root collar of seedlings, mm; feature 3 – current linear growth of the axial shoot in height, cm; feature 4 – total height of the aboveground part of seedlings including the last growth, cm; feature 5 – total current linear growth of shoots including axial shoots, cm; feature 6 – average current linear growth of shoots including axial shoots, cm; feature 7 – total linear shoot growth on all the whorls, cm; feature 8 – overall average linear growth of shoots including axial shoots, cm; feature 9 – total number of side shoots in all the seedling whorls, pcs. Their relative estimates expressed in terms of the coefficient of variation (C_v , %) are represented in table 1.

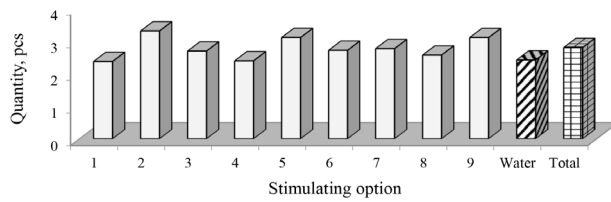
It is noticeable that the variability of linear parameters of the Schrenk's spruce seedlings axial shoot within the boundaries of the generalized data array (Total option) refers to the average (feature 1) and increased (features 2 and 4) level on the Mamaev's scale. The coefficients of variation were 23.94, 26.30 and 27.28 %, respectively. Other characteristics of seedlings are more variable, and their corresponding ratings are high, such as feature 6, feature 8, feature 9 (42.95, 39.71 and 44.03 %), and very high, such as feature 3, feature 5, feature 7 (58.81, 57.01 and 66.47 %) on the same scale.



a



b



c

Fig. 3. Total growth of Schrenk's spruce seedlings: a – total growth of shoots; b – total average growth of shoots; c – number of side shoots in the aboveground part

Table 1

Variability of characteristics of the aboveground part of Schrenk's spruce seedlings

Option	Feature								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	17.51	19.70	45.50	18.17	54.49	35.78	51.09	36.01	42.71
2	22.93	23.26	58.12	26.31	49.96	41.32	59.23	39.18	43.14
3	23.24	32.64	51.51	22.56	47.57	37.88	56.30	33.99	42.36
4	16.38	18.63	36.42	16.23	49.37	33.48	50.24	33.03	42.83
5	20.34	24.35	62.18	25.72	54.53	44.30	64.90	42.25	43.27
6	23.22	24.55	52.99	23.21	49.39	39.35	51.07	36.77	41.94
7	28.11	29.34	59.74	30.58	60.99	44.12	69.34	39.32	44.39
8	17.30	17.48	47.55	17.12	49.72	31.90	46.13	31.72	37.74
9	18.75	24.01	61.68	25.59	53.83	41.58	64.45	39.51	42.36
Water	17.22	16.64	35.93	16.78	53.06	29.97	55.48	30.32	48.92
Total	23.94	26.30	58.81	27.28	57.01	42.95	66.47	39.71	44.03

Absolute estimates of the variability of the analyzed indicators were characterized by ranges of limits, which were established at the stage of statistical analysis. In particular, the absolute maximum of the total height of the aboveground part (12.5 cm) exceeded the absolute minimum of the same indicator (3.7 cm) by 3.38 times. The range of root collar diameter limits was 2.21 mm (from 0.64 mm to 2.85 mm). The linear current growth of the axial shoot had a range of values from 0 to 4.5 cm, since it was not registered for individual seedlings. The total increment of shoots in the records for all seedling whorls had a spread of values from 0.3 to 16.8 cm, which formed a range of 16.5 cm and exceeded the limits by 56 times.

The effectiveness of the use of biologically active substances to stimulate the germination of Schrenk's spruce seeds (at the background of aftereffect) was evaluated by the one-way ANOVA (table 2).

Table 2

The effect of stimulants on the growth of Schrenk's spruce seedlings

Feature	F_{act}	Share of factor influence ($h^2 \pm s_h^2$)						Criteria for differences	
		by Plokhinsky's algorithm			by Snedecor's algorithm				
		h^2	$\pm s_h^2$	F_h^2	h^2	$\pm s_h^2$	F_h^2	LSD_{05}	D_{05}
1	10.44	0.2185	0.0209	10.436	0.2161	0.0210	10.293	0.517	0.820
2	8.30	0.1819	0.0219	8.302	0.1758	0.0221	7.965	0.165	0.262
3	3.64	0.0887	0.0244	3.635	0.0715	0.0249	2.874	0.458	0.727
4	10.26	0.2156	0.0210	10.264	0.2130	0.0211	10.105	0.786	1.248
5	5.20	0.1223	0.0235	5.200	0.1093	0.0239	4.582	0.869	1.379
6	5.46	0.1276	0.0234	5.462	0.1153	0.0237	4.867	0.312	0.495
7	6.04	0.1393	0.0231	6.041	0.1284	0.0233	5.499	1.282	2.034
8	4.25	0.1022	0.0240	4.251	0.0868	0.0245	3.546	0.265	0.421
9	2.53	0.0635	0.0251	2.533	0.0429	0.0256	1.673	0.572	0.908

Here we used the following statistical indicators: F_{act} – experimental value of Fisher test; F_{05} – table value of Fisher criterion for 5 % significance level ($F_{05} = 1.91$); F_{01} – table value of Fisher test at 1 % significance level ($F_{01} = 2.48$); h^2 – the proportion of influence of the organized factors; $\pm s_h^2$ – error share of influence of the organized factors; F_h^2 – the Fisher criterion in the assessment of the validity of the share of influence of the organized factors; LSD_{05} – least significant difference at 5 % level of significance; D_{05} – criterion of Tukey at 5 % significance level.

The one-way ANOVA confidently refutes the null hypothesis that there are no differences if different growth stimulants are used. The calculated values of the F-criterion were almost always greater than their acceptable table limits at the significance levels accepted in the article. This is true relative for almost all considered parameters of Schrenk's spruce seedlings. The only exception is the total number of side shoots in all seedling whorls (feature 9), where the significance of differences is estimated at 5 % significance and not at 1 % significance.

Estimates of growth stimulators impact on the development of spruce seedlings in calculations according the the Plokhinsky's algorithm are different for various

parameters. The highest values of this indicator concerned the length of a two-year part of axial shoot of seedlings (feature 1) and the total height of the aerial part of seedlings from the last growth (feature 4). The estimates are quite reliable and were 21.85 ± 2.09 % ($F_h^2 = 10.44$) and 21.56 ± 2.10 % ($F_h^2 = 10.26$), respectively. The minimum impact was registered by the current linear growth of the axial shoot in height (feature 3) and by the total number of lateral shoots in all the seedling whorls (feature 9). In the first case, the estimates were reliable at the 5 and 1 % significance levels and amounted to 8.87 ± 2.44 % ($F_h^2 = 3.64$). In the second case, they were reliable at 5 % and unreliable at 1 % significance level and reached the level of 6.35 ± 2.51 % ($F_h^2 = 2.53$). Calculations using the Snedekor's algorithm showed mostly comparable results (table 2).

Significant difference estimates (LSD_{05} and D_{05}) allowed us to determine between which options of stimulating treatment the difference in average values corresponds to the level of significance. In particular, it was possible to determine which options of stimulating treatment significantly differed from soaking seeds in water for a particular feature of seedlings. Thus, the control value in the length of the two-year part of the axial shoot (feature 1) did not significantly differ with that received after the use of biologically active substances such as siliplant (option 1), kornevin (option 4), and epin (option 8). This is confirmed by the least significant difference (LSD_{05}) and the criterion of Tukey (D_{05}). This conclusion is also true for a range of other features: diameter of the seedling root collar (feature 2); current linear growth of the axial shoot in height (feature 3); total height of the aboveground part of seedlings with the last growth (feature 4). As for other features of the aboveground part, the situation is different. For example, for the total current linear growth of shoots, including axial shoots (feature 5), the control group did not show significant differences with 6 options of stimulating treatment, and only in three cases the aftereffect was confirmed by the criteria of significant differences: option 2 – ferovit; option 5 – heteroauxin; and option 9 – albit.

Conclusion

The aftereffect of bioactive substances in the pre-sowing stimulating treatment of Shrenk's spruce seeds is preserved. It is expressed in the activation of growth processes of the aboveground part of its seedlings during the introduction in the Nizhny Novgorod region.

The effectiveness of different bioactive substances is not the same for different growth indicators of the seedling aboveground part and has a specific level of manifestation. For some of them, a significant excess of tested indicator values in relation to the control was achieved, confirmed by the analysis of variance. The best results for most of the seedling characteristics were obtained by the use of ferovit, heteroauxin, and albit stimulators. The last circumstance necessitates making a differentiated approach to the selection of biostimulants used to expand the possibilities of the Schrenk's spruce introduction by seed material.

The registered level of growth and development of the aboveground part of Schrenk's spruce seedlings in the ground indicates a sufficient resource for seed reproduction in the region's natural conditions and a significant potential for its introduction in the Nizhny Novgorod region.

REFERENCES

1. Bakhtiyorov Z., Yu R., Yang M., Monoldorova A., Aminov J. Reconstructed Precipitation for the Eastern Tian Shan (China), based on *Picea shrenkiana* Tree-Ring Width. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 2017, vol. 8, iss. 12, art. 432. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000432>
2. Baytulin I.O., Bykov B.A., Proskuryakov M.A., Roldugin I.I. On the Main Problems of Mountain Forestry in Kazakhstan. *Forests of Mountain Systems of Kazakhstan*. Alma-Ata, Nauka Kazakhskoy SSR Publ., 1987, pp. 3–11. (In Russ.).
3. Bazilevskaya N.A. *Theory and Methods of Plant Introduction*. Moscow, MSU Publ., 1964. 131 p. (In Russ.).
4. Berezin E.L. To the Taxonomy and Variety of the Schrenk Spruce. *Forest Genetics, Breeding and Seed Production: Collection of Academic Papers of the Meeting Held on December 12–15, 1967 in Petrozavodsk*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1970, pp. 199–202. (In Russ.).
5. Berezin E.L. The Species Composition of Spruce Populations in the Forests of the Tian-Shan and Dzhungarian Ala-Tau Mts. *Botanicheskii Zhurnal*, 1970, vol. 55, no. 4, pp. 491–498. (In Russ.).
6. Berezin E.L., Budaragin V.A. Interpopulation Variability of Karyotypes of the Tian Shan and Dzungarian Alatau Spruce and Issues of Its Taxonomy. *Botanical Materials of the Herbarium of the Institute of Botany of the Kazakh SSR Academy of Sciences*. Alma-Ata, Nauka KazSSR Publ., 1982, iss. 12, pp. 60–67. (In Russ.).
7. Besschetnova M.V. Some Genetic Aspects of the Theory of Plant Introduction. *Bulletin of the Main Botanical Garden*, 1971, iss. 82, pp. 3–7. (In Russ.).
8. Besschetnova M.V. Adaptation Processes from the Standpoint of Plant Introduction. *Bulletin of the Main Botanical Garden*, 1983, iss. 128, pp. 3–6. (In Russ.).
9. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khramova O.Ju., Dorozhkina L.A. Stimulating Effect of EcoFus Preparation During Presowing Seeds Treatment of Norway Spruce. *Agrokhimicheskii vestnik = Agrochemical Herald*, 2017, no. 2, pp. 41–44. (In Russ.).
10. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kulkova A.V., Mishukova I.V. Starch Content in Shoot Tissues of Different Spruce Species (*Picea* A. Dietr.) in Introduction. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 4, pp. 57–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.57>
11. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kul'kova A.V., Shirokov A.I. Correlation of Starch Content in Tissue of *Picea a. Dietr.* *Vestnik of Kazan State Agrarian University*, 2018, no. 2(49), pp. 19–22. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b34ff5f201623.29401443
12. Besschenova N.N., Kul'kova A.V. The Content of Reserve Nutrients in the Cells of Annual Shoot Tissues of the Representatives of the Spruce (*Picea* L.) Genus in Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 6, pp. 52–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.52>
13. Bobrov E.G. *Forest-Forming Conifers of the USSR*. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 188 p. (In Russ.).
14. Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistical Processing of Forestry Research Materials*. Saint Petersburg, Polytechpress, 2016. 125 p. (In Russ.).
15. Budaragin V.A. Karyotypes of the Main Coniferous Species of Kazakhstan. *Proceedings of KazNIIKKh*. Vol. 2. Protective Afforestation and Breeding Issues in Northern Kazakhstan. Alma-Ata, Kaynar Publ., 1980, pp. 116–122. (In Russ.).
16. Bykov B.A. *Spruce Forests of the Tian Shan, Their History, Features and Typology*. Alma-Ata, Akademiya nauk KazSSR Publ., 1950. 128 p. (In Russ.).
17. Bykov B.A. *Dominants of the Vegetation Cover of the Soviet Union*. In 3 Vol. Vol. 1. Alma-Ata, Akademiya nauk KazSSR Publ., 1960. 315 p. (In Russ.).

18. Bykov B.A. Spruce Forests of the Tian Shan. Alma-Ata, Nauka Kazakhskoy SSR Publ., 1985. 284 p. (In Russ.).
19. Chen F., Mambetov B., Maisupova B., Kelgenbayev N. Drought Variations in Almaty (Kazakhstan) Since AD 1785 Based on Spruce Tree Rings. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, vol. 31, iss. 8, pp. 2097–2105. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1290-y>
20. Cheshev L.S. *Cuttings and Renewal in Spruce Forests of the Issyk-Kul Region*. Frunze, Ilim Publ., 1974, pp. 8–26. (In Russ.).
21. Cheshev L.S. *Bioecological Basis of Final Felling in Spruce Forests of the Tian Shan*. Frunze, Ilim Publ., 1978. 78 p. (In Russ.).
22. Danilik V.N. Final Felling in Tian Shan Spruce Stands. *The System of Final Felling in the Mountain Forests of the Altai and Tian Shan: Proceedings of the Scientific and Production Conference Held in November 1957*. Alma-Ata, Kaynar Publ., 1959, pp. 20–23. (In Russ.).
23. Dean A., Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments*. Heidelberg, Springer Cham, 2017. 840 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>
24. De Atrip N., O'Reilly C. Germination Response of Alder and Birch Seeds to Applied Gibberellic Acid and Priming Treatments in Combination with Chilling. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, no. 4, pp. 385–394. <https://doi.org/10.1051/forest:2007015>
25. Debreczy Z., Rác I. *Conifers Around the World*. In 2 Vol. Vol. 1. The International Dendrological Foundation. Ed. by K. Musial. DendroPress, 2012. 1089 p.
26. Dospekhov B.A. *Field Experiment Technique (With the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. Moscow, Al'yans Publ., 2014. 351 p. (In Russ.).
27. Farjon A. *Picea schrenkiana*, Schrenk's Spruce. *The IUCN Red List of Threatened Species*. 2013. 6 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42336A2973645.en>
28. Gan P.A. Experience of Mountain Afforestation in the Belt of Spruce Forests of Kyrgyzstan. *Proceedings of the Meeting on the Problem of Restoration and Breeding of Spruce Forests*. Frunze, Akademiya nauk KirgSSR Publ., 1960, pp. 53–59. (In Russ.).
29. Gan P.A. *Introduction and Afforestation of Conifers in Kyrgyzstan*. Frunze, Ilim Publ., 1987. 147 p. (In Russ.).
30. Goryachkina O.V., Muratova E.N., Badaeva E.D. Karyological Studies of *Picea schrenkiana* (Pinaceae) from Kirghizia. *Botanicheskii Zhurnal*, 2018, no. 4, pp. 505–516. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813618040063>
31. Hinkelmann K., Kempthorne O. *Design and Analysis of Experiments: Introduction to Experimental Design*. Vol. 1. Hoboken, NJ, Wiley, 2008. 631 p. <https://doi.org/10.1002/9780470191750>
32. Isakov A.T., Buzykin A.I. Method for Assessing Natural Regeneration of Spruce Forests in the Issyk-Kul Region. *Conifers of the boreal zone*, 2012, vol. XXX, no. 3-4, pp. 214–219. (In Russ.).
33. Karpuyuk T.V., Muratova E.N., Vladimirova O.S., Sedel'nikova T.S. Karyological Analysis of *Picea schrenkiana*. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2009, no. 1, pp. 52–58. (In Russ.).
34. Kelgenbaev N.S., Besschetnov V.P., Mambetov B.T. Results of Reforestation in Medeo Hole After Disasters. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*, 2016, no. 1(39), pp. 27–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/19302>
35. Kelgenbaev N.S., Mambetov B.T., Bukeikhanov A.N., Besschetnov V.P. Spruce Forests Distribution by Their Vital Resistance in the Mountain Forests of North Tyan-Shan. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2016, no. 2(58), part 2, pp. 137–140. (In Russ.).
36. Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Multiparameter Evaluation of the Taxonomic Proximity of the Species of Spruce (*Picea a. Dietr.*) in the Pigment Composition

of Needles. *Vestnik of Volga State University of Technology Series "Forest: Ecology. Nature Management"*, 2018, no. 1(37), pp. 5–18. (In Russ.).

37. Kul'kova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Multivariable Analysis in the Assessment of Spruce Species Specificity (*Picea*). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 6, pp. 23–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.23>

38. Lapin P.I., Kalutskiy K.K., Kalutskaya O.N. *Introduction of Forest Species*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 224 p. (In Russ.).

39. Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessment of the Prospects for the Introduction of Woody Plants Based on Visual Observation Data. *Experience in the Introduction of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 7–67. (In Russ.).

40. Mambetov B.T., Kelgenbaev N.S., Maysupova B.D., Dosmanbetov D.A., Dukenov Zh.S. On the Evaluation Technique of Natural Regeneration of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) in Mountain Forests of the Northern Tien Shan. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 63–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.63>

41. Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. Hoboken, NJ, Wiley, 2003. 752 p. <https://doi.org/10.1002/0471458503>

42. Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. New York, Chapman and Hall/CRC, 2002. 488 p. <https://doi.org/10.1201/9780203738559>

43. Muratova E.N., Sedel'nikova T.S., Goryachkina O.V., Pimenov A.V. Study of Coniferous Karyotypes by Classical and Molecular-Cytogenetic Methods. *Conservation of Forest Genetic Resources: Proceedings of the 6th International Conference*. Kokshetau, Mir pechati Publ., 2019, pp. 148–150. (In Russ.).

44. Panyushkina I.P., Chang C., Clemens A.W., Bykov N. First Tree-Ring Chronology from Andronovo Archaeological Timbers of Bronze Age in Central Asia. *Dendrochronologia*, 2010, vol. 28, iss. 1, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.10.001>

45. Plotnikova L.S. *Scientific Basis for the Introduction and Protection of Woody Flora of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 264 p. (In Russ.).

46. Proskuryakov M.A. On the Issue of Acclimatization of Schrenk's Spruce on the Southern Slopes of the Tian Shan Mountains. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki Kazakhstana*, 1965, no. 11, pp. 89–93. (In Russ.).

47. Proskuryakov M.A. Regularities of the Spatial Structure Formation of the Mountain Spruce Forest Stand of Tian Shan. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1971, no. 6, pp. 3–10. (In Russ.).

48. Proskuryakov M.A. *Horizontal Structure of Mountain Dark Coniferous Forests*. Alma-Ata, Nauka KazSSR Publ., 1983. 215 p. (In Russ.).

49. Proskuryakov M.A., Khomullo O.N. Experimental Analysis of Differentiation of Schrenk's Spruce Seedlings. *The Flora and Fauna of the Reserves of Kazakhstan: Proceedings of the Chief Administration of Reserves and Hunting Farms under the Council of Ministers of the Kazakh SSR*. Alma-Ata, Kaynar Publ., 1973, pp. 119–150. (In Russ.).

50. Roldugin I.I. *Spruce Forests of the Northern Tien Shan*. Alma-Ata, Nauka Kazakhskoy SSR Publ., 1989. 303 p. (In Russ.).

51. Rubtsov N.I. On the Geobotanical Zoning of the Tian Shan. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series*, 1956, vol. 56, pp. 86–94. (In Russ.).

52. Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Waltham, MA, Butterworth-Heinemann, 2005. 432 p.

53. Szczotka Z., Lewandowska U. Polyamines in Dormancy Breaking of Tree Seeds. *Annals of Forest Science*, 1989, vol. 46, no. Supplement, pp. 95s–97s. <https://doi.org/10.1051/forest:19890518>

54. Venglovskiy B.I., Lukashevich I.V., Isakov A. Creation of Forest Plantations of Tian Shan Spruce. *Rational Use and Conservation of Forest Resources: International Scientific Conference*. Bishkek, Ilim Publ., 2006, pp. 117–120. (In Russ.)

55. Vladimirova O.S., Karpjuk T.V., Muratova E.N. Chromosome Numbers of Some *Picea* Species (*Pinaceae*). *Botanicheskii Zhurnal*, 2003, vol. 88, no. 8, pp. 112–113. (In Russ.).

56. Zar J.H. *Biostatistical Analysis*. Edinburg Gate, Pearson New International edition, 2014. 756 p.

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*187

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-52-69

Особенности динамики лишайниковых сосняков в условиях подтопления Рыбинским водохранилищем

А.К. Мухин, науч. соавт.; ResearcherID: [G-8006-2019](https://orcid.org/0000-0002-5269-1566).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5269-1566>

Дарвинский государственный природный биосферный заповедник, д. 44, дер. Борок, Череповецкий р-н, Вологодская обл., Россия, 162723; akm.ru@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.10.20 / Одобрена после рецензирования 16.01.21 / Принята к печати 18.01.21

Аннотация. Приведены результаты изучения многолетней динамики лесов Дарвинского государственного природного биосферного заповедника, оказавшихся вследствие создания Рыбинского водохранилища в измененных условиях природной среды. Многолетнее воздействие водохранилища существенно изменило экологию прибрежных территорий, что обусловило необходимость изучения состояния прибрежных лесов. Объектом исследования стал лишайниковый сосняк, произрастающий в зоне прямого влияния Рыбинского водохранилища. Для изучения направления и скорости процессов роста и развития древостоя на пробных площадях проводилось его геоботаническое описание, определялись таксационные характеристики. Основное внимание уделялось динамике живого напочвенного покрова как индикатора почвенно-гидрологических условий, состояния древостоя, подроста и подлеска. Установлена связь процессов роста и развития подтопляемых древостоев с климатическими особенностями периодов роста, особенностями рельефа и уровнем режимом водохранилища. Согласно расчету эффекта влияния подтопления, характеризующего импульсы отклонения показателей продуктивности древостоя сосны, в условиях выраженного мезорельефа и глубокого залегания грунтовых вод в маловодный период эффект был отрицательным, а в многоводный период – положительным. На склонах междунных понижений с неглубоким залеганием грунтовых вод данное значение оказалось положительным для обоих периодов. Сравнительный анализ абсолютных приростов в подтопляемых и эталонных древостоях выявил существенные различия характера этих изменений. В условиях подтопления средний прирост имеет тенденцию к увеличению, что не свойственно для естественных древостоев в спелом возрасте. Резкие пики подъема текущего прироста соответствуют периоду с наиболее выраженным влиянием подтопления. Значительная подвижность и изменчивость напочвенного покрова свидетельствуют о динамизме изучаемого древостоя: процессы саморегуляции в нем настолько нарушены влиянием водохранилища, что даже сформировавшийся тип леса не в состоянии сохраниться. С позиций динамической типологии И.С. Мелехова изучаемый тип леса в условиях подтопления необходимо рассматривать как тип-этап на пути ускоренного формирования нового типа – сосняка зеленомошного. Полученные выводы, подтверждающие положения динамической типологии, важны как для лесной науки и практики ведения лесного хозяйства, так и для проведения мониторинговых исследований в заповеднике.

Ключевые слова: лишайниковые сосняки, Рыбинское водохранилище, влияние водохранилища на древостой, эффект влияния подтопления, динамическая типология леса



Для цитирования: Мухин А.К. Особенности динамики лишайниковых сосняков в условиях подтопления Рыбинским водохранилищем // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 52–69. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-52-69>

Original article

Features of the Dynamics of Lichen Pine Forests under Flooding by the Rybinsk Reservoir

Andrej K. Mukhin, Research Scientist; ResearcherID: [G-8006-2019](https://orcid.org/0000-0002-5269-1566),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5269-1566>

Darwin Nature Reserve, 44, der. Borok, Cherepovets District, Vologda Region, 162723, Russian Federation; akm.ru@yandex.ru

Received on October 7, 2020 / Approved after reviewing on January 16, 2021 / Accepted on January 18, 2021

Abstract. The article presents the results of studying the long-term dynamics of the Darwin Nature Reserve's forests, which turned out in altered environmental conditions due to the creation of the Rybinsk Reservoir. Multi-year reservoir influence has significantly changed the environment of coastal areas, which resulted in necessity of studying the coastal forests state. The lichen pine forest growing in the zone of direct influence of the Rybinsk Reservoir became an object of study. A geobotanical description was carried out and inventory characteristics of the woodland were determined in order to study the direction and speed of growth and development processes at the trial areas. The main focus was on the dynamics of the living ground cover as an indicator of soil and hydrological conditions and the state of the stand, undergrowth, and understory. The connection of growth and development processes of flooded stands with climatic features of growth periods, relief features and level regime of the reservoir was found. The calculation of the effect of flooding, which characterizes the impulses of deviation of the pine stand productivity indicators, showed that in the conditions of well-defined mesorelief and deep groundwater occurrence in the low-water period, the effect was negative, and in the high-water period – positive. This value was positive for both periods on the slopes of shallow subsurface depressions. A comparative analysis of absolute increments in flooded and reference stands revealed significant differences in the nature of these changes. The average growth tends to increase under flooding, which is not typical for natural stands in ripe age. Sharp peaks of current increment rise correspond to the period with the most well-defined influence of flooding. Significant mobility and variability of the ground cover indicate the dynamism of the studied type of forest, the processes of self-regulation in lichen pine trees are so disturbed by the reservoir influence that even the formed forest type is not able to survive. From the perspective of I.S. Melekhov's dynamic typology, the studied forest type under flooding should be considered as a type-stage on the way to the accelerated formation of a new type – green-moss pine forest. The findings confirming the provisions of the dynamic typology are important both for forest science and forestry practice, and for monitoring studies in the reserve.

Keywords: lichen pine forests, Rybinsk Reservoir, reservoir impact on stands, flooding effect, dynamic forest typology

For citation: Mukhin A.K. Features of the Dynamics of Lichen Pine Forests under Flooding by the Rybinsk Reservoir. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 52–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-52-69>



Введение

Дарвинский заповедник расположен в северо-западной части Рыбинского водохранилища на пологом низменном водораздельном полуострове, представляющем собой сохранившуюся от затопления юго-восточную часть Молого-Шекснинской низменности.

Растительность изучаемого района характеризуется преобладанием сфагновых болот и заболоченных лесов (более 80 % территории). Суходольные леса, в основном зеленомошные типы сосняков, приурочены к наиболее дренированным территориям: прибрежным участкам водохранилища и песчаным гривам среди болот. На сухих возвышенных дюнах произрастают лишайниковые типы сосновых лесов и, хотя таких лесов на территории заповедника немного (менее 1 % покрытой лесом площади), результаты проводимых в них многолетних исследований интересны для лесной науки и практики лесного хозяйства, поскольку происходящие в этих лесах процессы специфичны и несвойственны для естественных лесов.

Сооружение в 40-х гг. прошлого столетия Рыбинского водохранилища существенно изменило гидрологический режим почв прибрежных территорий. Уровненный режим водохранилища, а именно достижение нормального подпорного уровня 102,0 м (абс.) и близкой к нему отметки, а также продолжительное сохранение высокого уровня стали начальным и основным звеном в цепи причинно-следственных связей, обуславливающих изменение прибрежных лесных экосистем. Лишайниковые типы сосновых лесов оказались в зоне прямого влияния водохранилища, признаком которой является совпадение фаз колебаний уровня водохранилища (УВ) и уровня грунтовых вод (УГВ) [2].

Изменение под влиянием подтопления, вызванного воздействием водохранилища, режима увлажнения почв прибрежных территорий послужило причиной изменений всех компонентов, составляющих тип леса. Согласно положениям динамической типологии, если компоненты леса существенно не изменяются, говорят об этапах формирования прежнего типа; если существенно изменяются разные компоненты – об этапах формирования нового типа леса. По скорости происходящих смен выделяют этапы ускоренного и замедленного формирования типа леса [4].

Проводимые ранее исследования динамики лишайниковых типов сосновых лесов характеризовали их изменение за 40 лет влияния водохранилища [5–7].

Результаты настоящих исследований, охватывающих 70-летний период, дополняют и подтверждают сделанные ранее выводы о динамичности и значительной скорости процессов в изучаемых типах леса, имеют большое значение для прогнозирования последствий антропогенных воздействий и моделирования климатических изменений, способствуют реализации стратегии устойчивого лесопользования [13–16, 18].

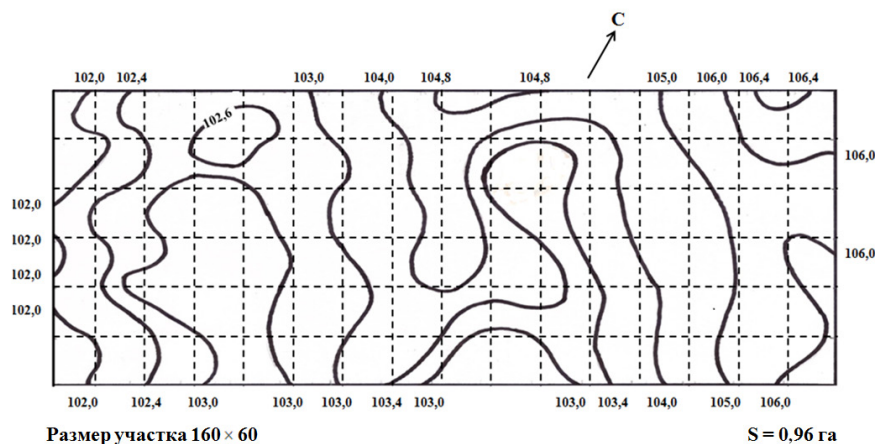
Цель исследования – выявить скорость и направление процессов роста и развития сосновых лесов лишайниковых типов в условиях природной среды, измененной вследствие подтоплений Рыбинским водохранилищем.

Объекты и методы исследования

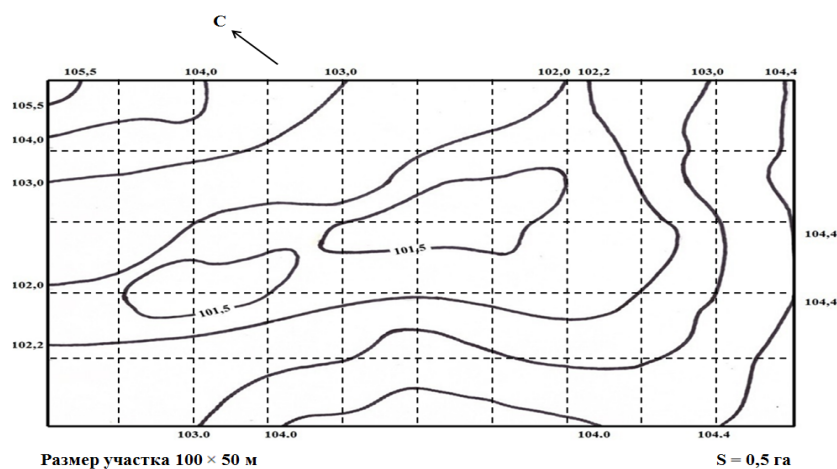
Объектом настоящего исследования стал лишайниковый тип соснового леса (*Pinetum cladinoso*). Он представлен 2 постоянными пробными площадями

(ППП), заложенными в 1947 г. на омываемом водами водохранилища о. Силон, расположенном на юго-западной границе заповедника – древней дюне эолового происхождения площадью около 30 га.

ППП 20 размером 1,0 га занимает участок с хорошо выраженным мезорельефом: дюнные всхолмления сменяются плавными понижениями по мере приближения к водохранилищу. На рис. 1, *а* представлен план рельефа участка ППП. Перепад высот – 4,4 м (102,0...106,4 м (абс.)). Такой рельеф является типичным для лишайниковых типов сосняков.



а



б

Рис. 1. План в горизонталях рельефа участков: *а* – ППП 20; *б* – ППП 24 (цифрами показаны отметки горизонталей)

Fig. 1. Plan in contours of the sections: *а* – permanent trial area ППП 20; *б* – permanent trial area ППП 24. The contours are shown in figures

ППП 24 размером 0,5 га располагается в межхолмовой «котловине». На рис. 1, *б* приведен план рельефа участка этой ППП. Перепад высот – 4,0 м (101,5...105,5 м (абс.)). Дно котловины в пределах высотных отметок 101,5...101,8 м (абс.) – около 15 % площади пробы – при высоком уровне водохранилища заполняется инфильтрационными водами и превращается во временно

затопляемый участок. Древостой здесь отсутствует вследствие усыхания, а травяно-кустарничковый ярус представлен вейником наземным (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth.) и канареечником тростниковым (*Phalaris arundinacea* L.), что характеризует данный участок ППП именно как зону временного затопления, а не как лишайниковый сосняк. Однако по склонам котловины древесный ярус развивается нормально.

В изучаемых типах сосновых лесов выделены 2 почвенные разности [10]. На возвышенных участках почвы слабоподзолистые песчаные, бедные питательными веществами, слабокислые (рН 5...6). Пологие склоны котловины занимают погребенные слабоподзолистые почвы. В отличие от слабоподзолистых в этих почвах прослеживается перегнойно-аккумулятивный горизонт мощностью до 10 см. Его появление связано с использованием таких земель в прошлом под сельское хозяйство. Хорошо выражен иллювиально-метаморфический горизонт с пятнами красно-коричневого цвета – новообразованиями железа. По гранулометрическому составу перечисленные почвы относятся к песчаным. Преобладающей фракцией является мелкий песок с частицами 0,25...0,05 мм (более 80 %), на 2-м месте средний песок (1,0...0,25 мм). В погребенных слабоподзолистых почвах наибольшее количество среднего песка находится в наносном слое (более 10 %). Иллювиально-метаморфический горизонт по сравнению с другими горизонтами более обогащен иловатыми частицами (около 1 %).

С целью изучения особенностей гидрологического режима почв в условиях выраженного мезорельефа в период исследований ежедекадно проводилось измерение глубины залегания грунтовых вод в 3 скважинах гидрологического профиля, проходящего через ППП 24.

С 1947 по 2018 г. на обеих ППП осуществлялись сплошные перечеты древостоя с интервалом 10–15 лет. В соответствии с общепринятой методикой [1] рассчитывались таксационные показатели древостоев: состав; возраст (A , лет); класс бонитета; средняя высота (h , м); средний диаметр (D , см); число стволов (N , шт./га); сумма площадей сечений (G , м²/га); запас (M , м³/га); отпад (Ω , м³/га); средний прирост (Δ , м³/га); наличный текущий прирост ($Z_{\text{нал}}$, м³/га) и средний текущий отпад ($\Omega_{\text{сп}}$, м³/га). Полученные фактические показатели, характеризующие конкретные древостои, приводились к стандартной полноте (1,0) и сравнивались с аналогичными показателями из таблиц хода роста (далее – ТХР) [9] для соответствующих возраста и класса бонитета.

Оценка роли водохранилища в изменении фактических таксационных показателей древостоя выполнялась расчетом комплекса факторов, связанных с влиянием водохранилища, – или эффекта влияния подтопления [7].

Нижние ярусы фитоценоза описаны в соответствии с общепринятыми методиками [12]. В ходе изучения травяно-кустарничкового яруса и лишайниково-мохового покрова определяли видовой состав, обилие видов по шкале Друде, проективное покрытие фоновыми видами.

Результаты исследования и их обсуждение

Гидрологический режим почв в условиях выраженного мезорельефа зависит от высотной отметки и уровня режима водохранилища. На всхолмлениях грунтовые воды даже в многоводные годы не поднимаются к поверхности

ближе 3,0 м, на пониженных участках (в межхолмовых котловинах) наблюдается подтопление инфильтрационными водами из водохранилища. Близость к водоему определяет режим колебания УГВ на всем острове.

Для характеристики особенностей гидрологического режима почв нами проведен анализ связи УГВ с УВ и количеством осадков (H) по данным замеров глубины залегания грунтовых вод в 3 гидрологических скважинах: скважина № 23 – дно межхолмовой котловины, скважина № 24 – вершина холма, скважина № 27 – пологий склон к водохранилищу.

Анализ проводился по 2 годам, которые различаются гидрологическими и метеорологическими характеристиками: по 2014 г. – засушливому (за вегетационный период выпало 301 мм осадков, средний за тот же период УВ составил 100,8 м (абс.)); по 2017 г. – влажному ($H = 414$ мм, $УВ_{\text{ср}} = 101,8$ м (абс.)).

Анализируя динамику грунтовых вод в лишайниковом сосняке (рис. 2) отмечаем, что в засушливый год водохранилище не оказывает существенного влияния на УГВ. На всхолмлениях грунтовые воды в течение вегетационного периода не поднимаются ближе 4,3 м к поверхности почвы, на дне котловины – ближе 1,0 м, на склоне к водоему – ближе 1,1 м. Вероятно, схожий с этим режим грунтовых вод был здесь и до создания водохранилища.

Другая ситуация наблюдается в многоводные годы. Водоохранилище заливает пологие берега, вследствие подпора и инфильтрации на высоких участках поднимается УГВ, а в котловинах на поверхности выступает вода. В годы с низким УВ высокая водопроницаемость и малая влагоемкость почв создают ксерофитные условия местообитания. Подъем УГВ вследствие фильтрации из водохранилища оказывает положительное влияние на снабжение корневой системы растений влагой и минеральными веществами.

Для оценки динамики древесного яруса сосняка лишайникового охарактеризуем изменение основных таксационных показателей древостоя за 70-летний период.

По данным 1-го описания, выполненного в 1947 г., сосновые древостои на обеих ППП были средневозрастные ($A_{\text{ср}} = 56$ лет), чистые по составу (10С), характеризовались низкими полнотой (0,24...0,36) и бонитетом (III,3...III,9). Число стволов составляло 386...436 шт./га, запас – 53...82 м³/га. Средние размеры деревьев по диаметру были 16,3...17,2 см, по высоте – 12,8...13,7 м. Отмечены единичные старовозрастные (140...160 лет) сосны диаметром 44...48 см, образующие невыраженное поколение [17].

С 1947 по 2018 г. выполнено 7 перерасчетов древостоя, его средние таксационные показатели за это время приведены в табл. 1.

Анализируя динамику таксационных показателей древостоев, необходимо отметить изменение их возрастной структуры. Так, в первые 3 десятилетия (1947–1981 гг.) сформировались черты 2-го яруса, составленного молодым поколением сосны II...III классов возраста, в основном тонкомером диаметром 8...10 см на высоте груди.

Ход роста основного яруса соснового древостоя обеих ППП за этот же период характеризовался незначительным апикальным приростом и связанным с ним снижением бонитета на 0,6...0,7 класса. В последующий период (1981–2018 гг.) в возрасте спелости (90–120 лет) темпы роста древостоев в высоту увеличились, что привело к повышению бонитета до III,3 на ППП 20 и до III,8 на ППП 24.

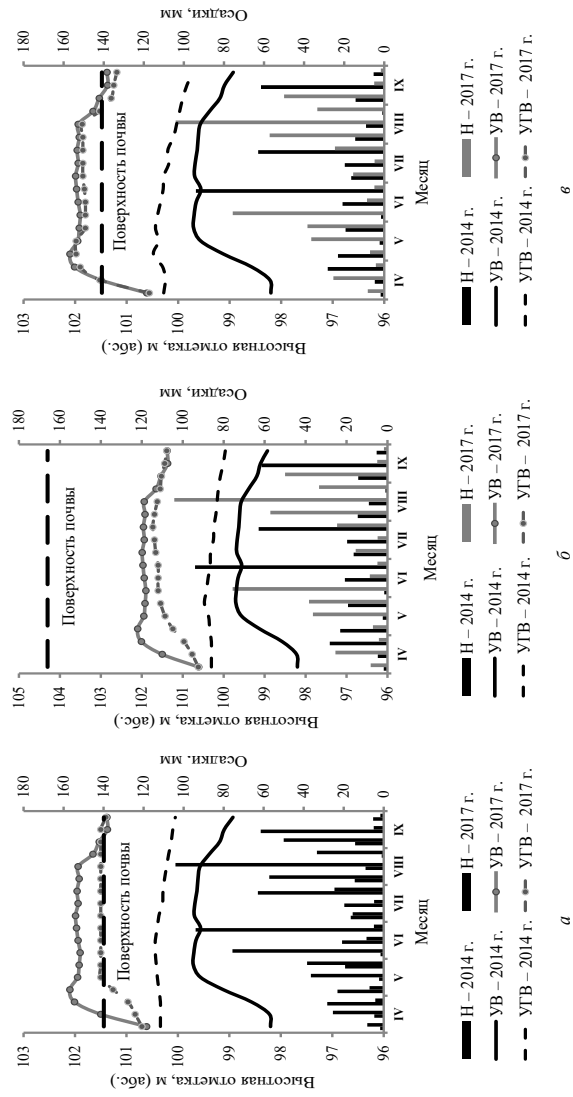


Рис. 2. Связь УГВ с УВ и количеством осадков в лишайниковом сосняке: *a* – скважина № 23; *б* – скважина № 24; *в* – скважина № 27

Fig. 2. Correlation between groundwater level (УГВ) and reservoir level (УВ), amount of precipitation (Н) in lichen pine forest: *a* – well No. 23; *б* – well No. 24; *в* – well No. 27

Таблица 1

Динамика таксационных показателей древостоев на ППП 20 и 24
 Dynamics of inventory indicators of forest stands at the permanent trial areas ППП 20 and ППП 24

Показатель	Год перечета											
	1947	1959	1971	1981	1991	2001	2018					
Состав (А):												
1-й ярус	10С (56)	10С (68)	10С (80)	10С (90)	10С (100)	10С (110)	10С (127)					
2-й ярус	–	10С (35) / –	10С (40) / 10С (35)	10С (50) / 10С (45)	10С (60) / 10С (50)	10С (70) / 10С (60) ед.Б (40)	10С (85) / 10С (75) ед.Б (55)					
<i>D:</i>												
сосны 1-го яруса	17,2 / 16,3	19,3 / 19,4	21,8 / 21,5	23,2 / 23,0	25,2 / 25,3	27,0 / 26,8	30,4 / 30,1					
сосны 2-го яруса	–	9,1 / –	10,5 / 9,8	12,1 / 10,8	13,7 / 11,0	15,4 / 12,8	18,4 / 14,7					
березы 2-го яруса	–	–	–	–	–	– / 10,7	– / 11,6					
<i>h:</i>												
сосны 1-го яруса	13,7 / 12,8	14,5 / 13,8	15,0 / 14,5	16,1 / 15,3	19,6 / 17,7	20,5 / 18,2	21,9 / 20,0					
сосны 2-го яруса	–	8,9 / –	10,1 / 8,3	10,8 / 9,5	14,3 / 10,2	15,2 / 13,3	17,5 / 14,9					
березы 2-го яруса	–	–	–	–	–	– / 11,8	– / 13,5					
<i>N</i>	436 / 386	530 / 360	660 / 378	626 / 396	679 / 502	677 / 506	594 / 510					
В том числе:												
сосны 1-го яруса	436 / 386	426 / 360	397 / 290	377 / 260	359 / 258	346 / 238	311 / 226					
сосны 2-го яруса	–	104 / –	263 / 88	249 / 136	320 / 244	331 / 248	283 / 258					
березы 2-го яруса	–	–	–	–	–	– / 20	– / 26					
Класс бонитета	III,3 / III,6	III,7 / III,9	IV,0 / IV,1	IV,0 / IV,2	III,4 / III,9	III,3 / III,9	III,3 / III,8					

Окончание табл. 1

Показатель	Год перечета									
	1947	1959	1971	1981	1991	2001	2018			
Полнога:										
1-й ярус	0,36 / 0,24	0,41 / 0,33	0,48 / 0,33	0,52 / 0,38	0,56 / 0,42	0,62 / 0,44	0,68 / 0,47			
2-й ярус	–	0,03 / –	0,09 / 0,03	0,10 / 0,04	0,15 / 0,08	0,20 / 0,11	0,23 / 0,16			
G:										
1-й ярус	11,0 / 7,3	12,8 / 10,2	15,2 / 10,5	16,9 / 11,8	19,1 / 13,6	21,7 / 14,2	24,1 / 16,2			
2-й ярус	–	0,7 / –	2,3 / 0,7	2,8 / 1,1	4,7 / 2,3	6,2 / 3,4	7,6 / 4,8			
M	82 / 53	103 / 82	133 / 91	154 / 105	218 / 127	262 / 141	306 / 196			
В том числе:										
1-й ярус	82 / 53	99 / 82	120 / 87	137 / 99	186 / 113	217 / 119	252 / 162			
2-й ярус	–	4 / –	13 / 4	17 / 6	32 / 14	45 / 22	54 / 34			
Ω	– / 1	1 / 21	8 / 29	13 / 31	22 / 32	30 / 37	49 / 59			
В том числе:										
1-й ярус	– / 1	1 / 21	8 / 29	10 / 31	18 / 32	23 / 36	35 / 57			
2-й ярус	–	–	–	3 / –	4 / –	7 / 1	14 / 2			
Δ	1,5 / 0,9	1,5 / 1,2	1,7 / 1,1	1,7 / 1,2	2,2 / 1,3	2,4 / 1,3	2,4 / 1,5			
Z _{вал}	–	1,8 / 2,4	2,5 / 0,8	2,1 / 1,4	6,4 / 2,2	4,4 / 1,4	2,6 / 3,2			

Примечание: В числителе – ППП 20; в знаменателе – ППП 24.

За 70 лет численность деревьев основного яруса снизилась за счет отпада с 436 до 311 шт./га на ППП 20 и с 386 до 226 шт./га на ППП 24, 2-й ярус пополнился молодым поколением сосны до 283 шт./га на ППП 20 и до 284 шт./га на ППП 24.

Второй ярус древостоев обеих пробных ППП на протяжении периода исследований в приспевающем возрасте (60...80 лет) становился более выраженным, увеличивались его средние размеры. Молодое поколение сосны отличается интенсивным приростом в высоту и со временем может выйти в верхний ярус древостоя, что свидетельствует о тенденции повышения бонитета.

Необходимо отметить, что на ППП 24 в 1-е десятилетие после сооружения водохранилища произошло усыхание деревьев сосны, занимавших затопляемую часть котловины. Поэтому таксационные показатели, приведенные в табл. 1, характеризуют в основном ход роста древостоя на склоновой части исследуемого участка.

Запасы древостоев за 70-летний период увеличились, с учетом отпада, на 224 м³/га (ППП 20) и на 143 м³/га (ППП 24). Однако удельный вес в накоплении общего запаса 2-м поколением сосны на обеих ППП был незначителен и составлял от 4 до 18 %. Среднегодовой отпад по запасу древесины на обеих ППП – 0,7...0,8 м³/га.

Можно говорить о формировании на исследуемых участках разновозрастных древостоев [11] с основным выраженным поколением сосны в верхнем ярусе – более 80 % в общем запасе.

В табл. 2 приведен показатель эффекта влияния подтопления – характеристика импульсов отклонения таксационных показателей древостоев ППП основных выделенных поколений сосны (в относительном выражении) от линии регрессии, отражающей изменение аналогичных показателей для древостоев в естественных условиях (из ТХР). Импульсы отклонения рассчитаны для 3 периодов: I – 1947–1981 гг., II – 1981–2018 гг., III – 1947–2018 гг. Периоды отличаются климатическими условиями. Так, I период является наиболее сухим с низким УВ, а II – влажным с высоким УВ. Расчет эффекта подтопления за I период был показан в ранее опубликованной работе [7]. Нами рассчитаны аналогичные показатели для II и III периодов.

Анализируя показатели продуктивности древостоя сосны, отмечаем, что на ППП 20 в сухой период импульс изменения запаса и текущего наличного прироста был отрицательным, однако во влажный период эффект подтопления оказался положительным и значительным для данных показателей. Суммарный эффект многолетнего влияния фактора подтопления на динамику запаса отрицателен, текущего наличного прироста – положителен. Во все рассмотренные периоды отпад в изучаемом древостое менее выражен, чем в неподтопляемом (из ТХР).

На ППП 24 в сухой период наблюдался очень сильный положительный импульс от подтопления, во влажный период эффект снижался, но оставался положительным. Выявлен отрицательный суммарный эффект на изменение запаса и положительный – на изменение текущего наличного прироста. Импульс отпада во все периоды положителен, т. е. отпад на подтопляемой территории более выражен, чем в эталонном древостое (из ТХР).

Таблица 2

Показатель эффекта влияния фактора подтопления, %
Indicator of the influence effect of the flooding factor, %

Таксационный показатель	ППП 20			ППП 24		
	I	II	III	I	II	III
h	-57	+134	-7	-9	+103	-12
D	-52	+40	-17	0	+35	-12
N	-58	+23	+14	-3	-15	+3
M	-57	+171	-12	+800	+120	-20
Δ	+28	-31	+34	-29	-80	+11
$Z_{\text{нал}}$	-46	+263	+43	+800	+188	+21
$\Omega_{\text{ср}}$	-65	-10	-46	+67	+10	+23

Примечание: I–III – периоды. Показатели эффекта подтопления для I периода приведены в соответствии с [7].

В подтверждение сделанных ранее выводов [3], такую специфическую реакцию изучаемых древостоев на влияние подтопления в связи с особенностями рельефа занимаемых ими участков, можно объяснить следующим образом.

Древостой лишайникового сосняка, растущего в условиях выраженного мезорельефа (ППП 20) и глубокого залегания грунтовых вод, в сухие годы при низком УВ испытывает недостаток почвенной влаги. Значительная часть энергии роста расходуется на развитие корневой системы. В следующий за сухим влажный период корневая система обеспечивает усиленное питание деревьев, происходит значительный прирост наземной массы.

На склоновой части участка междунного понижения (ППП 24), с отметкой не выше 1,0 м над нормальным подпорным уровнем, грунтовые воды залегают неглубоко. В сухой период корневая система обеспечивает хороший прирост наземной части древостоя, однако во влажный период страдает от сильного подтопления. Вероятно, отмирание корней в данных условиях снижает обеспечение почвенным питанием, что негативно отражается на приросте.

Проследим за изменением абсолютных среднего и текущего приростов подтопляемого древостоя в сравнении с эталонным из ТХР. Данный метод позволяет оценить влияние внешних факторов на процессы в древостоях [8].

В табл. 3 приведены значения прироста древостоя основного поколения сосны на ППП 20, условия произрастания которого наиболее характерны для разных лет жизни лишайникового типа леса и леса по ТХР.

Анализируя графики динамики среднего и текущего приростов древостоев на ППП 20 и по ТХР (рис. 3), отмечаем существенные различия характера изменения показателей. В условиях подтопления средний прирост имеет тенденцию к увеличению, что не свойственно естественным древостоям спелого возраста. Еще необычнее изменяется наличный текущий прирост древостоя на ППП 20. Так, его резкий подъем соответствует периоду, когда влияние подтопления было наиболее выраженным.

Возобновление в 1947 г. на обеих ППП было представлено подростом сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разной высоты (0,5...3,5 м) и хорошего состояния. Он рос куртинами по «окнам», его численность составляла 4,0 тыс. шт./га.

Таблица 3

Прирост древостоя сосны в лишайниковом типе леса
Pine stand increment in lichen forest type

Показатель	1947	1959	1971	1981	1991	2001	2018
<i>A</i>	56	68	80	90	100	110	127
<i>ППП</i>							
$Z_{\text{нал}}$	–	1,4	1,8	1,7	4,9	3,1	2,1
Δ	1,5	1,5	1,5	1,5	1,9	2,0	2,1
<i>ТХР</i>							
$Z_{\text{нал}}$	2,9	2,5	2,0	1,7	1,1	1,1	0,5
Δ	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0

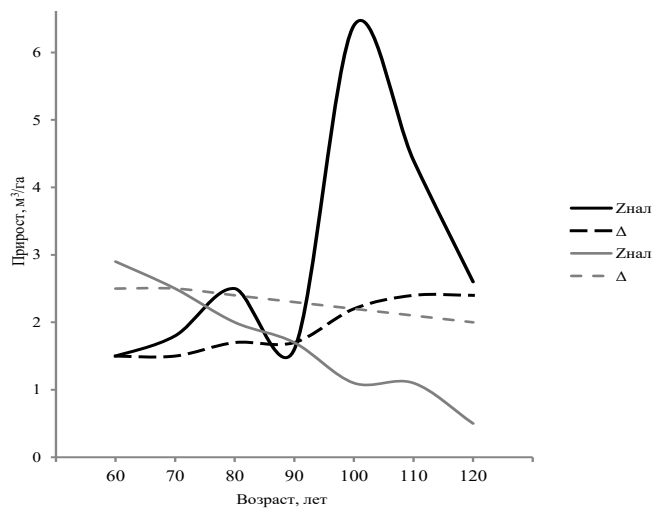


Рис. 3. Соотношение среднего и текущего приростов древостоя сосны на ППП 20 и по ТХР

Fig. 3. The ratio of average and current increment of the pine stand at the ППП 20 and according to the yield tables (ТХР)

На протяжении времени исследований таксационные показатели подраста существенно изменились, и в настоящее время возобновление на ППП 20 представлено редким подростом сосны (0,1 тыс. шт./га) высотой от 0,5 до 5,0 м (преобладают деревца 3,0...5,0 м), состояние удовлетворительное. Часть подраста сосны – 283 шт./га – перешла в древесный ярус. Очень редко (16 шт./га) встречается подрост ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) разной высоты (от 0,2 до 4,0 м) удовлетворительного состояния и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) высотой до 0,6 м хорошего состояния (преобладают всходы 0,1...0,2 м) при численности 40 шт./га. На границе ППП 20 с зоной временного затопления разрослись куртины ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench.) высотой до 3,5 м (преобладающая высота 1,0...1,5 м) удовлетворительного состояния, численность – 30 шт./га. Здесь же появился единичный подрост березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.) высотой до 1,0 м, состояние удовлетворительное. В табл. 4 приведены таксационные показатели яруса подраста в годы учетов.

Таблица 4

Динамика таксационных показателей подроста
Dynamics of undergrowth inventory indicators

Растение	Показатель	Значение показателя в год учета (ППП 20 / ППП 24)			
		1947	1976	2001	2018
<i>Pinus sylvestris</i> L.	<i>N</i>	4,0 / 4,0	1,0 / 1,2	0,4 / 0,5	0,1 / 0,1
	<i>h</i>	≤3,5 / ≤3,5	≤3,5 / ≤3,0	≤5,0 / ≤4,5	≤5,0 / ≤4,5
	<i>C</i>	Хорошее	Удовлетв.	Удовлетв.	Удовлетв.
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	<i>N</i>	–	–	–	0,016 / ед.
	<i>h</i>	–	–	–	≤4,0 / 0,4
	<i>C</i>	–	–	–	Удовлетв.
<i>Betula pendula</i> Roth.	<i>N</i>	–	– / 0,03	ед. / 0,01	– / 0,01
	<i>h</i>	–	– / ≤3,0	≤2,0 / ≤4,5	– / 5,0
	<i>C</i>	–	Хорошее	Удовлетв.	Удовлетв.
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench.	<i>N</i>	–	–	–	0,03 / –
	<i>h</i>	–	–	–	≤3,5 / –
	<i>C</i>	–	–	–	Удовлетв.
<i>Quercus robur</i> L.	<i>N</i>	–	–	–	0,04 / ед.
	<i>h</i>	–	–	–	≤0,6 / ≤0,7
	<i>C</i>	–	–	–	Удовлетв.

Примечание: *N* – общая численность, тыс. шт./га.; *C* – состояние; Удовлетв. – удовлетворительное.

На ППП 24 численность подроста сосны также снизилась до 0,1 тыс. шт./га, преобладают деревья высотой 3,5...5,5 м удовлетворительного состояния. Часть подроста сосны – 258 шт./га – перешла в древесный ярус. Появился единственный подрост ели европейской высотой 0,4 м удовлетворительного состояния. В северо-западной части котловины присутствует очень редкий подрост березы бородавчатой (10 шт./га) высотой до 5,5 м удовлетворительного состояния. Часть подроста березы (26 шт./га), учтенного ранее, пополнила древостой.

Ярус подлеска на ППП 20 в 1947 г. был представлен кустами можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) численностью 0,1 тыс. шт./га и высотой до 0,5 м, состояние хорошее, а также единичными всходами рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.). На ППП 24 можжевельник встречался реже (20 шт./га), присутствовали и единичные деревья рябины обыкновенной высотой около 1,0 м удовлетворительного состояния.

В настоящее время на обеих ППП в подлеске сохранился можжевельник хорошего состояния высотой до 3,5 м, появилось много молодых кустов высотой до 0,5 м. На границе ППП 20 с зоной временного затопления образовались немногочисленные куртины из ивы трехтычинковой (*Salix triandra* L.) высотой до 3,5 м и крушины ломкой (*Frangula alnus* Mill.) – до 2,0 м, состояние удовлетворительное. Рябина обыкновенная на обеих ППП встречается очень редко.

Динамика живого напочвенного покрова выступает в качестве индикатора почвенно-гидрологических условий и важного компонента лесных экосистем [19, 20]. Первое описание травяно-кустарничкового яруса и лишайниково-мо-

хового покрова на ППП 20 и 24 выполнено в 1947 г. Травяно-кустарничковый ярус в то время был разреженный, заметными пятнами (сор²) выделялись только куртины вереска обыкновенного (*Calluna vulgaris* (L.) Hull.), осоки верещатниковой (*Carex ericetorum* Poll.) и овсяницы овечьей (*Festuca ovina* L.). Реже (sol-sp) встречались ястребинка зонтичная (*Hieracium umbellatum* L.), колокольчик круглолистный (*Campanula rotundifolia* L.), полевица обыкновенная (*Agrostis tenuis* Sibth.), золотая розга (*Solidago virgaurea* L.), кошачья лапка двудомная (*Antennaria dioica* (L.) Gaertn.), фиалка песчаная (*Viola arenaria* DC) и тимьян обыкновенный (*Thymus serpyllum* L.).

Лишайниково-моховой покров представлен мозаичным ковром из серых пятен лишайников, в основном кладонии лесной (*Cladonia silvatica* (L.) Hoffm.), оленьей (*C. rangiferina* (L.) Web.) и приальпийской (*C. alpestris* (L.) Rabenh.) с проективным покрытием до 85 %; зеленых пятен мхов (до 15 %), по большей части плеуроциума Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.); темных пятен отмирающих лишайников по дну междюнной котловины.

В табл. 5 приведены показатели изменения фоновых видов живого напочвенного покрова в годы учетов на ППП 20 и 24.

Таблица 5

Динамика фоновых видов живого напочвенного покрова
Dynamics of background species of living ground cover

Растение	Проективное покрытие в год учета (ППП 20 / ППП 24), %			
	1947	1977	2001	2018
<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth.	- / -	5 / 15	5 / +	+ / +
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	- / -	+ / 10	+ / +	- / +
<i>Cladonia silvatica</i> (L.) Hoffm.	30 / 45	10 / 20	5 / +	+ / +
<i>C. rangiferina</i> (L.) Web.	20 / 40	10 / 20	5 / +	+ / +
<i>C. alpestris</i> (L.) Rabenh.	20 / +	5 / +	5 / +	+ / +
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.	5 / 10	50 / 30	65 / 40	70 / 40
<i>Dicranum polysetum</i> Sw.	+ / +	+ / +	+ / +	5 / +
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	- / -	- / 5	- / 20	- / 5
<i>Sphagnum girgensohnii</i> Russ.	- / -	- / -	- / -	- / 5
<i>S. nemoreum</i> Scop.	- / -	- / -	- / -	- / 5

Примечание: «+» – вид присутствует; «-» – вид отсутствует.

В последующие периоды наблюдений зафиксировано обильное разрастание вейника наземного (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth.) на участке ППП 20, граничащем с зоной временного затопления (5 %), и в пониженной части котловины ППП 24 (15 %), здесь же разросся (10 %) канареечник тростниковый (*Phalaris arundinacea* L.). На фоне вейника выделялись редкие (sp) куртины осок пузырчатой (*Carex vesicaria* L.) и черной (*C. nigra* (L.) Reichard).

В лишайниково-моховом покрове на обеих ППП за счет разрастания зеленых мхов уменьшалась доля лишайников. В пониженной части котловины (ППП 24) обильно разросся (20 %) кукушкин лен обыкновенный (*Polytrichum commune* Hedw.) и появился (5 %) сфагнум дубравный (*Sphagnum nemoreum* Scop.).

В ходе последнего описания, в 2018 г., отмечено существенное изменение облика живого напочвенного покрова. Доля проективного покрытия зеленых мхов (плеуроциума Шребера) увеличилась до 75 % (ППП 20). Лишайники сохранились отдельными изреженными пятнами. Проективное покрытие кукушкиным льном обыкновенным на дне котловины ППП 24 снизилось до 5 % (показателя 2001 г.), разрослись сфагнум дубравный и сфагнум Гиргензона (*Sph. girgensohnii* Russ.). Их общая доля в проективном покрытии составила 10 %.

В травяно-кустарничковом ярусе произошли некоторые изменения видового состава. Появились в небольшом количестве (sol-sp) новые виды, типичные для зеленомошных лесов: грушанка круглолистная (*Pirola rotundifolia* L.), зимолобка зонтичная (*Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton), марьянник луговой (*Melampyrum pratense* L.), подбельник обыкновенный (*Monotropa hypopitys* L.). На затопляемой части котловины ППП 24 поселились болотные виды растений: клюква (*Vaccinium oxycoccus* L.), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.) и аулакомниум болотный (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr.).

Заключение

На основании полученных данных об изменении разных компонентов типа леса можно сделать следующие выводы о влиянии подтопления на лишайниковые сосняки.

Исследуемые леса растут в зоне прямого влияния водохранилища, т. е. гидрологический режим почв в них тесно связан с уровнем водохранилища. При высоком уровне действие подтопления нарастает, при низком – уменьшается. Это действие идет через корневую систему и выражается в изменении зоны ризосферы. Каждое такое проявление сказывается на древостое по-разному в зависимости от высотной отметки участка.

При достижении нормального подпорного уровня водохранилища междюнные понижения заполняются инфильтрационными водами, на пониженных склонах происходит подтопление корневой системы деревьев, а на возвышенных участках увеличивается влажность верхних горизонтов почвы.

В засушливые годы, когда уровень водохранилища низкий, оно не оказывает существенного влияния на уровень грунтовых вод, который залегает даже в понижениях на глубине 1,0 м от поверхности, на высоких участках сохраняются ксерофитные условия.

В типичных условиях произрастания (выраженный мезорельеф и глубокое залегание грунтовых вод) в годы слабого подтопления отмечается снижение его влияния на показатели продуктивности древостоя. В годы возрастающего подтопления эффект от него положительный и значительный. Подтопление не ускоряет процесс разрушения древостоя, о чем свидетельствует отрицательный импульс отпада. Значит, в обычных для лишайниковых сосняков условиях произрастания водохранилище оказывает благоприятное воздействие на рост и развитие древостоя.

В необычных условиях произрастания (склоны большой «котловины», дно которой заполняется инфильтрационными водами в периоды высокого уровня водохранилища) процессы в древостое иные. В сухой период наблюдается очень высокий положительный импульс изменения запаса и текущего прироста. Во влажный период эффект подтопления снижается, но остается положительным.

Изменение прироста древостоев свидетельствует о значительном различии процессов в подтопляемых и эталонных лесах. Средний прирост в последние десятилетия увеличился, что не характерно для спелых лесов в нормальных условиях произрастания. Динамика текущего прироста еще более наглядна. Здесь влияние фактора времени проявляется в виде резких пиков спада и особенно подъема во влажный период, что также существенно отличается от этого процесса в эталонном древостое.

Возобновление идет за счет сосны. За исследованный период в условиях увеличения полноты существенно снизилась численность подроста сосны (с 4,0 до 0,1 тыс. шт./га), растущего в «окнах» и на осветленных участках по границе с зоной временного затопления. Сохранившийся подрост успешно развивался, многие деревья пополнили древостой, сформировав 2-й ярус. Роль молодого поколения сосны в изменении общего запаса и прироста незначительна, т. к. более 80 % запаса стволовой древесины сосредоточено в основном, ярко выраженном старшем поколении сосны. Однако, учитывая снижение темпов роста основного поколения, достигшего перестойного возраста, и перспективы интенсивного роста более молодого, можно говорить о тенденции выхода его в верхний ярус и влиянии в будущем на динамику таксационных показателей всего насаждения. Слабовыраженный ранее ярус подлеска не изменился и после создания водохранилища.

В живом напочвенном покрове произошли существенные изменения. В период 1-го описания в нем господствовали лишайники (в основном кладонии лесная и оленья), а зеленые мхи (в основном плеуроциум Шребера) занимали небольшие участки, располагаясь пятнами под густой кроной некоторых деревьев и на низких местах. В настоящее время на возвышенных местах и склонах лишайники практически полностью потеснены зелеными мхами и сохранились лишь в виде изреженных сгустков. В междюнных понижениях, где при высоком уровне водохранилища появляются инфильтрационные воды, в 1-е десятилетия (1947–1977 гг.) покров становился типичным для зоны временного затопления за счет разрастания вейника наземного и канареечника тростникового. В дальнейшем здесь наблюдался интенсивный процесс заболачивания кукушкиным льном и сфагнумом.

Таким образом, учитывая скорость и направление изменений, произошедших за 70-летний период влияния Рыбинского водохранилища, с позиций динамической типологии И.С. Мелехова изучаемый сосняк лишайниковый следует рассматривать как тип-этап на пути ускоренного формирования нового типа – сосняка зеленомошного (*Pinetum hylocomiosa*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анушин Н.П. Лесная таксация. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).
2. Дьяконов К.Н. Влияние крупных равнинных водохранилищ на леса прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 126 с. D'yakonov K.N. *Influence of Large Plain Reservoirs on the Coastal Zone Forests*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 126 p. (In Russ.).

3. Кудинов К.А. Результаты анализа особенностей роста сосны на побережьях Рыбинского водохранилища: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1969. 26 с.
Kudinov K.A. *The Analysis Results of Pine Growth Features on the Coasts of the Rybinsk Reservoir*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1969. 26 p. (In Russ.).
4. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.
Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).
5. Писанов В.С. Динамика сосняков лишайникового и лишайниково-зеленомошного под влиянием Рыбинского водохранилища // Изв. вузов. Лесн. журн. 1984. № 3. С. 9–11.
Pisanov V.S. Dynamics of Lichen and Lichen-Green-Moss Pine Forests under the Influence of the Rybinsk Reservoir. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1984, no. 3, pp. 9–11. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1984/%E2%84%963-1984.pdf>
6. Писанов В.С. Четыре десятилетия в условиях влияния водохранилища: динамика лишайниковых сосняков // Динамическая типология леса. М.: Агроиздат, 1989. С. 192–197.
Pisanov V.S. Four Decades under the Reservoir Influence: Dynamics of Lichen Pine Forests. *Dynamic Forest Typology*. Moscow, Agroizdat Publ., 1989, pp. 192–197. (In Russ.).
7. Писанов В.С. Влияние подтопления на продуктивность древостоя сосны в лишайниковом типе леса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2000. № 1. С. 16–22.
Pisanov V.S. The Influence of Flooding on the Productivity of Pine Stands in the Lichen Forest Type. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2000, no. 1, pp. 16–22. (In Russ.). http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f7c/16_21.pdf
8. Сальникова И.С., Воробьева Т.С., Нагимов З.Я., Зубова С.С., Орехова О.Н., Суслов А.В. Таксация леса. Ход роста насаждений. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 130 с.
Sal'nikova I.S., Vorob'yeva T.S., Nagimov Z.Ya., Zubova S.S., Orekhova O.N., Suslov A.V. *Forest Inventory. Stand Development*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 130 p. (In Russ.).
9. Тюрин А.В., Науменко И.М., Воропанов П.В. Лесная вспомогательная книжка (по таксации леса). 2-е изд., доп. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956. 532 с.
Tyurin A.V., Naumenko I.V., Voropanov P.V. *Forest Supplementary Book (On Forest Inventory)*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1956. 532 p. (In Russ.).
10. Успенская А.А. Материалы к изучению почвенного покрова основных типов лесов Дарвинского государственного заповедника // Тр. Дарвин. заповедника. Вологда: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1968. Вып. 9. С. 123–181.
Uspenskaya A.A. Materials for the Soil Cover Studying of the Main Forest Types of the Darwin Nature Reserve. *Trudy Darvinskogo zapovednika*, 1968, iss. 9, pp. 123–181. (In Russ.).
11. Фалалеев Э.Н. Таксация разновозрастных древостоев. Красноярск: Сиб. тех. ин-т, 1975. 29 с.
Falaleyev E.N. *Inventory of Different-Aged Forest Stands*. Krasnoyarsk, STI Publ., 1975. 29 p. (In Russ.).
12. Шенников А.П. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1964. 447 с.
Shennikov A.P. *Introduction to Geobotany*. Leningrad, LU Publ., 1964. 447 p. (In Russ.).
13. Bakkenes M., Eickhout B., Alkemade R. Impacts of Different Climate Stabilization Scenarios on Plant Species in Europe. *Global Environmental Change*, 2006, vol. 16, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.11.001>
14. Eggers S., Lindner M., Zudin S., Zaehle S., Liski J. Impact of Changing Wood Demand, Climate and Land Use on European Forest Resources and Carbon Stocks

During the 21st Century. *Global Change Biology*, 2008, vol. 14, iss. 10, pp. 2288–2303. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01653.x>

15. Groffman P.M., Rustad L.E., Templer P.H., Campbell J.L., Christenson L.M., Lany N.K. et al. Long-Term Integrated Studies Show Complex and Surprising Effects of Climate Change in the Northern Hardwood Forest. *BioScience*, 2012, vol. 62, iss. 12, pp. 1056–1066. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.12.7>

16. Hurmekoski E., Hetemäki L. Studying the Future of the Forest Sector: Review and Implications for Long-Term Outlook Studies. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 34, pp. 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.05.005>

17. Kuuluvainen T., Mäki J., Karjalainen L., Lehtonen H. Tree Age Distributions in Old-Growth Forest Sites in Vienansalo Wilderness, Eastern Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 169–184. <https://doi.org/10.14214/sf.556>

18. Mohammadi Limaei S., Lohmander P., Olsson L. Dynamic Growth Models for Continuous Cover Multi-Species Forestry in Iranian Caspian Forests. *Journal of Forest Science*, 2017, vol. 63, no. 11, pp. 519–529. <https://doi.org/10.17221/32/2017-JFS>

19. Pitkänen S. Effect of Tree Stand and Site Variables on Alpha Diversity of Ground Vegetation in the Forests of Northern Karelia. *Journal of Environmental Management*, 2000, vol. 58, iss. 4, pp. 289–295. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0332>

20. Rodenkirchen H. Nutrient Pools and Fluxes of the Ground Vegetation in Coniferous Forests Due to Fertilizing, Liming and Amelioration. *Plant and Soil*, 1995, vol. 168, iss. 1, pp. 383–390. <https://doi.org/10.1007/BF00029351>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья
УДК 575.2(571.55)
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-70-90

Изменчивость признаков генеративных органов лиственницы Гмелина в условиях Восточного Забайкалья

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>

О.Ф. Малых, науч. сотр.; ResearcherID: [AAZ-5119-2020](https://orcid.org/0000-0002-0752-9391),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0752-9391>

Т.В. Желибо, аспирант; ResearcherID: [AAZ-4061-2020](https://orcid.org/0000-0002-4444-2463),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4444-2463>

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова, д. 16 а, г. Чита, Забайкальский край, Россия, 672014; vm2853@mail.ru[✉], mas16o@yandex.ru, zhelibot@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.20 / Одобрена после рецензирования 29.12.20 / Принята к печати 11.01.21

Аннотация. В Забайкальском крае площадь лесной растительности составляет 86,6 % от общей территории. Доминирующей лесной породой является лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), занимающая около 57 % от земель лесного фонда. Уменьшение площади лесов и количества отдельных лесных пород, в частности лиственницы Гмелина, из-за потепления климата и, как следствие, учащения лесных пожаров, сокращения ареалов произрастания древостоев, их деградации; из-за рубок, в том числе незаконных, может привести к потере генетических ресурсов. Ценные для хозяйственного использования насаждения и лесные породы необходимы для восстановления лесов, создания искусственных насаждений. Из потребности воспроизводства лесных насаждений с желаемыми признаками и свойствами вытекает потребность в информации о генетических и фенотипических признаках, свойствах растений. В Забайкальском крае такой информации в настоящее время недостаточно. Цель исследований – установить фенотипическую изменчивость признаков генеративных органов лиственницы Гмелина на территории Забайкальского края, а также их связь с условиями произрастания. В результате экспедиционных исследований в Забайкальском крае изучены признаки генеративных органов 40 ценопопуляций лиственницы Гмелина. Установлена эндогенная, популяционная и географическая изменчивость, корреляционная зависимость признаков от географического расположения насаждений, экологических условий местообитания. Выявлены корреляционные связи между признаками, указано расположение перспективных для отбора семенного материала насаждений лиственницы. Дана характеристика генеративных органов лиственницы, сделаны выводы об уровнях эндогенной, популяционной и географической изменчивости признаков генеративных органов. Установлены значительные и умеренные корреляционные связи между признаками. Ряд признаков генеративных органов умеренно корреляционно связан с широтой, долготой местообитания и высотой над уровнем моря, а также с экспозицией и крутизной склона, типом гидротопа. Результаты исследований будут полезны при работах по селекции лиственницы, выделению подходящих для отбора семян насаждений, при анализе закономерностей изменчивости лиственницы в пределах региона.



Ключевые слова: лиственница Гмелина, генеративные признаки, изменчивость признаков, корреляция с условиями местообитания, Забайкальский край

Для цитирования: Макаров В.П., Малых О.Ф., Желибо Т.В. Изменчивость признаков генеративных органов лиственницы Гмелина в условиях Восточного Забайкалья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 70–90. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-70-90>

Original article

Variability in Traits of Gmelin Larch Generative Organs in Eastern Transbaikalia

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>

Olga F. Malykh, Research Scientist; ResearcherID: [AAZ-5119-2020](https://orcid.org/0000-0002-0752-9391), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0752-9391>

Tatyana V. Zhelibo, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAZ-4061-2020](https://orcid.org/0000-0002-4444-2463), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4444-2463>

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, ul. Nedorezova, 16 a, Chita, Zabaykalsky Krai, 672014, Russian Federation; vm2853@mail.ru[✉], mas16o@yandex.ru, zhelibo@mail.ru

Received on October 1, 2020 / Approved after reviewing on December 29, 2020 / Accepted on January 11, 2021

Abstract. Forest vegetation in Zabaykalsky Krai covers 86.6 % of the total area. The dominant forest species is Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), which occupies about 57 % of the forest lands. The area of forests and the amount of certain forest species, in particular Gmelin larch, is decreasing due to climate warming and, as a consequence, the increased number of forest fires, reduction of the range of growing stands, their degradation, as a result of logging including illegal logging. This can lead to the loss of genetic resources. Plantations and forest species valuable for economic use are necessary for the restoration of forests and the creation of artificial plantations. The need for information on genetic and phenotypic traits and properties of plants emerges from the need to reproduce forest plantations with desired features and properties. Such information is currently insufficient in Zabaykalsky Krai. The research aims to determine the phenotypic variability of traits of Gmelin larch generative organs in Zabaykalsky Krai, as well as their relationship with the site conditions. The traits of generative organs of 40 Gmelin larch cenopopulations were studied as a result of expeditionary research in Zabaykalsky Krai. We have found endogenous, population and geographic variability, correlation dependence of traits on the geographic location of plantations, and ecological conditions of the habitat. Correlations between the traits were revealed, and the location of promising larch plantations for selection of seed material was specified. The larch generative organs are described, conclusions on the levels of endogenous, population, and geographic variability of generative organ traits are drawn. Significant and moderate correlations between traits have been found. A number of traits of generative organs are moderately correlated with latitude, longitude of habitat and altitude above sea level, as well as with exposure and steepness of slope, type of hydrotope. The research results will be



useful in larch breeding, selection of plantings for seed productivity, as well as for analyzing the patterns of larch variability within the region.

Keywords: Gmelin larch, generative traits, variability of traits, correlation with habitat conditions, Zabaykalsky Krai

For citation: Makarov V.P., Malykh O.F., Zhelibo T.V. Variability in Traits of Gmelin Larch Generative Organs in Eastern Transbaikalia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 70–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-70-90>

Введение

Рассматриваются результаты исследования изменчивости генеративных признаков лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) в Восточном Забайкалье. Лиственница Гмелина здесь – преобладающая древесная порода. Лишь в юго-восточной части региона, на границе с Бурятией и Монголией, встречаются популяции лиственницы сибирской и гибридной формы лиственницы сибирской и Гмелина – лиственницы Чекановского (*Larix x czekanowskii* Szafer).

Регион слабо исследован в отношении биологического разнообразия древесных пород в целом и лиственницы в частности. Существует ряд публикаций, посвященных лиственнице в Восточной Сибири, однако они в малой мере связаны с лиственницей Гмелина в Забайкальском крае [1–6, 9, 12, 13]. В Китае, в северо-восточных областях, произрастают лиственница Гмелина и родственные ей лиственница Рупрехта (*Larix principis Rupprechtii* Mayr) и лиственница ольгинская (*Larix olgensis* A. Henry). Здесь также ведутся исследования изменчивости и биологических свойств этих пород [16–22].

Экологические условия Восточного Забайкалья определяются горным рельефом, местоположением региона на границе тайги и сухих степей, контрастами летних и зимних температур, рекордной продолжительностью солнечного сияния, низкой влажностью воздуха зимой и летом, почти полным отсутствием снегового покрова зимой на значительной территории. Такие условия произрастания обуславливают своеобразие древесных пород. На географическую изменчивость лиственницы влияет также отсутствие в ее пыльце воздушных мешков (пыльца не разносится на значительные расстояния).

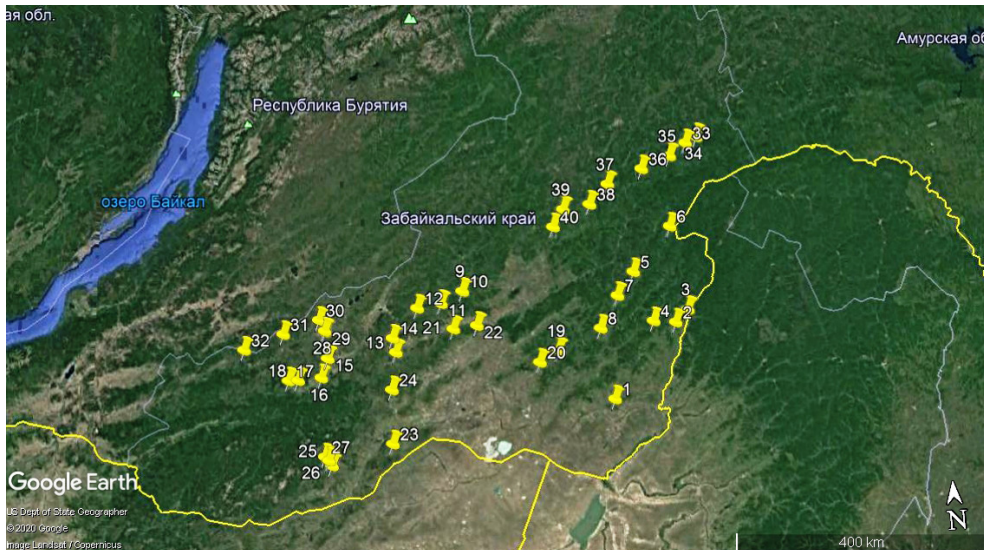
Цель исследований – выявление морфологической изменчивости лиственницы Гмелина на территории Забайкальского края как значительной части Восточной Сибири и корреляционной связи морфологических признаков генеративных органов с географическими параметрами и условиями местообитания ценопопуляций лиственницы.

Будущее лесоводства в нашей стране (и в мире) может базироваться на воспроизводстве высокопродуктивных и устойчивых к различным экологическим факторам древесных пород. Для этого необходима информация о морфологическом и генетическом разнообразии, физиологических свойствах древесных пород, которая поможет отобрать ценопопуляции в природе и создать на их основе сорта древесных растений с желаемыми признаками и свойствами. Наши исследования могут стать вкладом в разработку данного направления.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в Забайкальском крае в 2007–2012 гг. в бассейнах рек Восточного Забайкалья Аргунь, Ингода, Онон, Хилок и Шилка.

Для снижения учета влияния конкурентных отношений между деревьями на развитие генеративных органов пробные площади (ПП) размещали в естественно разреженных насаждениях лиственницы Гмелина с низкой сомкнутостью крон. Всего исследовано 40 ценопопуляций лиственницы Гмелина (см. рисунок).



Расположение ПП лиственницы Гмелина (цифры – № ПП)

Location of Gmelin larch sample plots (the figures indicate the numbers of the sample plots)

На ПП фиксировали географические координаты, высоту над уровнем моря, крутизну и направление склона, тип гидротопы по Погребняку П.С. [15], мощность и гранулометрический состав почвы, тип растительного сообщества, давали общую характеристику древостоя. ПП располагались на высоте от 480 до 1014 м над ур. м., крутизна склонов достигала 40°. Средний возраст древостоя, диаметр и высота составили соответственно 50–60 лет, 30–35 см и 17–20 м. Сомкнутость насаждений варьировала от 5 до 50 % (табл. 1).

В насаждениях лиственницы отбирали произвольно, как правило, 30 деревьев. С юго-восточной стороны в средней части кроны дерева также произвольно собирали в тканевые мешочки шишки по 30–100 шт. В лабораторных условиях после подсыхания шишек при комнатной температуре и полного раскрытия семенных чешуй измеряли длину и ширину 10 шишек с каждого дерева, длину и ширину семенных чешуй, подсчитывали число семенных чешуй на шишке.

Угол отклонения семенных чешуй от оси шишки измеряли с помощью транспортира. По шкале: 1 – округлая, 2 – прямосрезанная, 3 – зазубренная, 4 – слабовыемчатая, 5 – выемчатая – определяли форму верхнего края семенной чешуи. Коэффициент формы шишки устанавливали путем деления ширины шишки на ее длину, форму – по шкале: коэффициент формы шишки < 1,0 – яйцевидная; 1,0 – шаровидная; > 1,0 – широкояйцевидная. Для математического анализа полученных данных использовали программу Microsoft Office Excel 2007. Изменчивость генеративных признаков (эндогенную, индивидуальную и популяционную) оценивали по шкале Мамаева С.А. (CV, %): < 7 – уровень изменчивости очень низкий; 7–15 – низкий; 16–25 – средний; 26–35 – повышенный; 36–50 – высокий; > 50 – очень высокий) [14].

Таблица 1

Характеристика местообитания ценопопуляций лиственницы Гмелина
Habitat characteristics of Gmelin larch cenopopulations

№ ПП	Район исследований	Координаты, ...°		Высота над ур. м.	Экспозиция склона	Крутизна склона, ...°	Мощность почвы, см	Гранулометрический состав почвы	Тип гидро-топа
		с. ш.	в. д.						
<i>Бассейн р. Аргунь</i>									
1	пос. Кличка	51,423978	118,135639	960	Западный	35	< 30	Супеси	Сухие
2	с. Н. Завод	51,338967	119,635657	740	Северный	3	< 30	Пески	Свежие
3	с. Ишага	51,486078	119,939194	580	Восточный	30	< 60	Супеси	Свежие
4	с. Солонцы	51,398283	119,163172	730	Южный	0	< 60	Пески	Свежие
5	с. Батакан	52,086994	118,861792	690	Северный	3	< 30	Пески	Свежие
6	с. Будюмкан	52,627753	119,80325	480	Южный	5	< 60	Пески	Сухие
7	с. Кунгара	51,797940	118,45280	651	Южный	5	< 60	Пески	Свежие
8	с. Шахтама	51,389720	118,00650	894	Западный	25	< 30	Супеси	Свежие
<i>Бассейн р. Ингода</i>									
9	с. Талача 1	52,064472	115,097389	792	Западный	15	< 30	Пески	Сухие
10	с. Талча 2	52,063944	115,095278	760	Пологий	0	< 30	Суглинки	Сырые
11	с. Урульга	51,919444	114,610778	715	Западный	15	< 30	Пески	Сухие
12	с. Маккавеево	51,879139	114,091167	825	Юго-восточный	10	< 60	Суглинки	Свежие
13	с. Оленгуй	51,306000	113,570139	833	Пологий	0	< 60	Суглинки	Сырые
14	с. Елизаветино	51,497222	113,516361	670	Пологий	0	< 30	Супеси	Влажные
15	с. Аблатукан	51,262861	112,092139	854	Пологий	0	< 60	Суглинки	Сырые
16	с. Шехолан	51,006500	111,936556	803	Западный	35	< 30	Пески	Сухие
17	с. Арей	50,977130	111,228044	1014	Западный	5	< 30	Супеси	Свежие
18	с. Новосалия	50,979361	111,434972	905	Юго-восточный	3	< 30	Пески	Влажные
<i>Бассейн р. Онон</i>									
19	с. Гирюнино	51,153110	117,047960	847	Восточный	5	< 60	Пески	Свежие
20	с. Турга	51,024890	116,632050	927	Северо-западный	15	< 30	Суглинки	Свежие
21	с. Зуголай	51,568400	114,840000	852	Южный	0	> 60	Суглинки	Сырые
22	г. Первомайск	51,591150	115,355350	850	Северо-западный	5	< 60	Пески	Свежие
23	хр. Эрмана	50,079300	113,398340	892	Северо-западный	5	< 30	Супеси	Сухие
24	с. Алханай	50,80692	113,44053	883	Пологий	0	< 60	Пески	Свежие
25	р. Былыра	49,887000	112,028560	1180	Юго-восточный	5	< 30	Супеси	Сухие

Окончание табл. 1

№ ПП	Район исследований	Координаты, ...°		Высота над ур. м.	Экспозиция склона	Крутизна склона, ...°	Мощность почвы, см	Гранулометрический состав почвы	Тип гидротопы
		с. ш.	в. д.						
26	с. Мордой	49,815030	112,092130	1158	Южный	5	< 30	Супеси	Сухие
27	р. Большой Улетуй	49,938300	111,948020	1056	Юго-восточный	5	< 30	Супеси	Сухие
<i>Бассейн р. Хилок</i>									
28	р. Улетка	51,633590	112,045610	980	Пологий	0	< 30	Пески	Влажные
29	р. Богдарин	51,622100	112,050670	967	Северо-западный	10	< 30	Пески	Свежие
30	пос. Могзон	51,781200	111,928370	923	Южный	5	< 30	Пески	Сухие
31	с. Харагун	51,603250	111,132600	894	Пологий	0	< 60	Суглинки	Влажные
32	р. Шара-Горхон	51,398500	110,261990	807	Пологий	0	< 30	Супеси	Сырые
<i>Бассейн р. Шилка</i>									
33	пос. Семиозерный	53,42787	120,26673	555	Северный	2	< 60	Суглинки	Сырые
34	пос. Амазар	53,46485	120,42859	742	Северный	10	< 30	Камни	Свежие
35	г. Могоча	53,34159	120,01946	503	Южный	40	< 30	Супеси	Сухие
36	с. Кудеча	53,26803	119,21259	604	Западный	5	> 60	Суглинки	Свежие
37	пос. Сбега	53,17901	118,32510	573	Пологий	0	> 60	Суглинки	Свежие
38	р. Белый Урюм	53,03520	118,05058	566	Южный	20	< 30	Пески	Свежие
39	пос. Аксёново-Зиловское	53,01829	117,28791	794	Западный	1	< 30	Пески	Свежие
40	пос. Жирекен	52,48581	117,13028	830	Южный	15	< 30	Пески	Сухие

Результаты исследования и их обсуждение

Средние величины генеративных органов.

Размер генеративных органов связан с количеством семян в шишке и влияет на семенную продуктивность лиственницы [5, 7, 8, 10, 11]. Поэтому отбор растений с крупными шишками наряду с отбором по другим признакам важен для создания сортов лиственницы с высокой семенной продуктивностью.

Длина шишки. Средняя длина шишки в исследованном регионе составляет $17,0 \pm 0,2$ мм. Географическая изменчивость признака низкая ($CV = 9,0\%$). Минимальная средняя длина шишки в ценопопуляции – $13,5 \pm 0,6$ мм (в районе с. Новосалия), максимальная – $20,1 \pm 0,5$ мм (в районе г. Первомайска) (табл. 2).

В то же время в составе насаждений лиственницы встречаются деревья с длиной шишки, значительно отличающейся от средней, – в районе сел Солонцы, Батакан, Бурюмдюкан, Гирюнино, Зуголай, Алханай, Харагун и Шара-Горхон, г. Первомайска. Средняя длина шишек здесь составляет 25–28 мм. Поэтому индивидуальный отбор по этому признаку имеет перспективу.

Таблица 2

**Абсолютные параметры генеративных органов лиственницы Гмелина
в Забайкальском крае, $M_{cp} \pm m, \min\text{--}\max$
Absolute parameters of Gmelin larch generative organs in Zabaykalsky Krai, $M_{cp} \pm m, \min\text{--}\max$**

№ ПП	Район исследований	Параметры шишки			Параметры семенных чешуй				
		длина, мм	ширина, мм	средний коэффициент формы	число	форма верхнего края, балл	длина, мм	ширина, мм	угол отклонения, ...°
<i>Бассейн р. Аргунь</i>									
1	пос. Кличка	17,5±0,7	17,9±0,2	1,0±0,0	15,0±0,6	3,6±0,2	10,6±0,2	8,1±0,2	35,3±1,1
		13,0–24,0	12,0–24,0	0,7–1,4	9,0–22,0	2,0–5,0	8,0–13,0	6,0–10,0	20,0–50,0
2	с. Н. Завод	17,7±0,5	16,4±0,5	0,9±0,0	14,3±0,6	3,6±0,3	10,9±0,4	8,6±0,3	29,4±1,8
		12,0–22,0	9,0–23,0	0,6–1,2	8,0–21,0	2,0–5,0	8,0–14,0	7,0–11,0	15,0–50,0
3	с. Ишага	18,1±0,5	18,6±0,6	1,0±0,0	14,7±0,8	3,6±0,2	11,2±0,3	8,7±0,2	39,1±1,6
		13,0–23,0	13,0–28,0	0,8–1,5	9,0–22,0	2,0–5,0	8,0–16,0	7,0–11,0	30,0–50,0
4	с. Солонцы	17,7±0,6	17,0±0,6	1,0±0,0	14,0±0,8	3,3±0,3	10,6±0,3	8,9±0,3	33,1±1,3
		12,0–26,0	9,0–28,0	0,7–1,3	7,0–21,0	2,0–5,0	8,0–15,0	6,0–12,0	20,0–50,0
5	с. Батакан	17,2±0,6	16,7±0,7	1,0±0,0	15,7±0,5	3,2±0,2	9,9±0,5	8,8±0,3	33,5±1,4
		12,0–25,0	12,0–24,0	0,8–1,3	9,0–25,0	2,0–4,0	7,0–14,0	7,0–12,0	25,0–50,0
6	с. Будюмкан	17,8±0,3	17,9±0,5	1,0±0,0	13,7±0,7	3,6±0,2	11,1±0,3	9,4±0,2	33,9±1,8
		13,0–23,0	11,0–23,0	0,7–1,4	7,0–22,0	2,0–4,0	8,0–14,0	7,0–12,0	15,0–50,0
7	с. Кунгара	16,9±0,5	15,2±0,6	0,9±0,0	13,9±0,6	3,6±0,2	10,1±0,4	8,6±0,2	30,9±2,3
		12,0–25,0	10,0–20,0	0,6–1,2	9,0–20,0	2,0–4,0	6,0–14,0	6,0–10,0	10,0–45,0
8	с. Шахтама	17,1±0,6	16,4±0,6	1,0±0,0	13,7±0,8	3,3±0,2	10,3±0,4	8,8±0,2	31,6±1,3
		12,0–22,0	10,0–23,0	0,7–1,3	7,0–23,0	2,0–4,0	7,0–14,0	7,0–11,0	20,0–55,0
<i>Бассейн р. Ингода</i>									
9	с. Талача 1	14,8±0,8	14,5±0,7	1,0±0,0	11,3±0,7	4,0±0,0	10,9±0,4	8,7±0,3	35,3±1,3
		8,0–21,0	8,0–22,0	0,7–1,4	6,0–18,0	4,0–4,0	8,0–15,0	7,0–11,0	25,0–50,0
10	с. Талача 2	17,0±0,6	15,5±0,5	0,9±0,0	13,3±0,5	4,6±0,2	11,0±0,3	9,0±0,3	29,2±1,4
		13,0–23,0	11,0–21,0	0,7–1,4	10,0–20,0	4,0–5,0	8,0–15,0	7,0–12,0	20,0–40,0
11	с. Урульга	14,9±0,5	14,3±0,6	1,0±0,0	12,2±0,8	4,2±0,1	10,3±0,4	8,5±0,4	36,0±1,6
		11,0–22,0	10,0–23,0	0,8–1,5	7,0–22,0	4,0–5,0	7,0–18,0	6,0–17,0	25,0–60,0
12	с. Маккавеево	17,0±0,4	16,4±0,3	1,0±0,0	14,4±0,4	3,9±0,2	10,4±0,3	8,5±0,1	34,3±0,9
		13,0–22,0	12,0–22,0	0,8–1,2	9,0–20,0	1,0–4,0	7,0–14,0	7,0–10,0	25,0–50,0
13	с. Оленгуй	15,0±0,4	15,3±0,8	1,0±0,1	14,3±0,7	3,3±0,4	9,0±0,3	7,9±0,3	34,1±2,0
		8,0–20,0	7,0–23,0	0,7–1,5	9,0–22,0	2,0–5,0	7,0–13,0	6,0–10,0	20,0–50,0
14	с. Елизаветино	17,1±0,4	16,2±0,5	1,0±0,0	14,2±0,3	3,9±0,2	10,6±0,2	9,1±0,2	27,7±1,4
		13,0–23,0	11,0–23,0	0,7–1,3	9,0–20,0	1,0–5,0	8,0–14,0	7,0–12,0	20,0–40,0

Продолжение табл.2

№ ПП	Район исследований	Параметры шишки			Параметры семенных чешуй				
		длина, мм	ширина, мм	средний коэффициент формы	число	форма верхнего края, балл	длина, мм	ширина, мм	угол отклонения, ...°
15	с. Аблатукан	15,6±0,4	13,8±0,6	0,9±0,0	13,6±0,4	3,3±0,4	9,4±0,3	8,8±0,2	27,7±1,3
		11,0–21,0	9,0–19,0	0,7–1,2	7,0–20,0	2,0–5,0	6,0–14,0	6,0–14,0	15,0–40,0
16	с. Шехалан	13,9±0,5	13,6±0,6	1,0±0,0	11,4±0,5	4,0±0,1	9,2±0,4	7,8±0,3	29,1±1,0
		10,0–23,0	9,0–19,0	0,7–1,2	6,0–17,0	3,0–5,0	6,0–12,0	6,0–10,0	20,0–40,0
17	с. Арей	14,6±0,6	14,8±0,6	1,0±0,0	13,6±0,7	4,2±0,1	9,3±0,2	7,8±0,2	30,7±1,1
		8,0–21,0	7,0–22,0	0,8–1,3	7,0–23,0	4,0–5,0	7,0–12,0	6,0–10,0	25,0–40,0
18	с. Новосалия	13,5±0,6	13,7±0,5	1,0±0,0	14,2±0,9	3,2±0,4	8,0±0,3	7,5±0,2	31,0±0,3
		9,0–20,0	9,0–19,0	0,7–1,5	7,0–26,0	1,0–4,0	5,0–13,0	5,0–13,0	20,0–60,0
<i>Бассейн р. Онон</i>									
19	с. Гирюнино	19,0±0,7	18,9±0,7	1,0±0,0	16,0±0,5	3,3±0,3	11,7±0,5	9,2±0,3	41,3±2,0
		14,0–26,0	13,0–27,0	0,7–1,4	10,0–22,0	2,0–5,0	8,0–16,0	7,0–11,0	10,0–65,0
20	с. Турга	15,2±0,4	17,3±0,3	1,1±0,0	12,7±0,5	3,3±0,3	9,5±0,3	8,2±0,1	41,7±3,1
		12,0–20,0	12,0–23,0	0,7–1,7	8,0–19,0	2,0–4,0	7,0–13,0	7,0–10,0	20,0–70,0
21	с. Зуголай	19,6±0,8	20,2±0,7	1,0±0,0	13,9±0,9	4,0±0,0	12,3±0,3	9,2±0,2	41,3±2,9
		16,0–26,0	14,0–28,0	0,7–1,4	9,0–19,0	4,0–4,0	10,0–15,0	8,0–11,0	25,0–70,0
22	г. Первомайск	20,1±0,5	23,5±0,8	1,2±0,0	18,1±0,6	5,0±1,1	10,8±0,3	9,6±0,5	55,7±2,2
		15,0–26,0	16,0–30,0	0,8–1,5	10,0–31,0	3,0–4,0	7,0–13,0	8,0–14,0	30,0–70,0
23	хр. Эрмана	18,3±0,7	18,2±0,7	1,0±0,0	17,0±0,8	3,7±0,3	10,6±0,2	8,8±0,2	39,9±2,6
		12,0–24,0	12,0–26,0	0,7–1,2	9,0–25,0	3,0–5,0	7,0–13,0	7,0–11,0	20,0–60,0
24	с. Алханай	19,0±0,5	17,7±0,5	0,9±0,0	17,2±0,6	3,9±0,2	10,6±0,3	8,8±0,2	35,7±1,3
		14,0–26,0	13,0–23,0	0,8–1,1	12,0–27,0	3,0–5,0	8,0–15,0	6,0–11,0	20,0–50,0
25	р. Былыра	18,0±1,0	17,6±0,3	1,0±0,0	15,5±0,9	3,9±0,1	10,7±0,6	8,8±0,3	40,0±6,4
		14,0–21,0	13,0–20,0	0,8–1,2	11,0–19,0	3,0–4,0	9,0–12,0	7,0–10,0	20,0–60,0
26	с. Мордой	19,0±0,6	18,1±0,7	1,0±0,1	16,1±1,1	4,0±0,0	10,6±0,1	9,4±0,2	35,8±7,3
		15,0–25,0	16,0–20,0	0,7–1,3	12,0–23,0	4,0–4,0	9,0–12,0	8,0–10,0	15,0–50,0
27	р. Большой Улетуй	17,4±0,3	15,9±0,7	0,9±0,1	15,8±0,3	3,1±0,1	10,4±0,1	8,2±0,2	32,8±5,7
		15,0–20,0	13,0–18,0	0,7–1,1	11,0–18,0	3,0–4,0	9,0–12,0	7,0–9,0	15,0–50,0
<i>Бассейн р. Хилок</i>									
28	р. Улетка	17,6±0,5	16,8±0,7	1,0±0,0	14,6±0,4	3,8±0,2	10,1±0,3	9,0±0,2	36,5±1,9
		12,0–23,0	10,0–22,0	0,8–1,3	9,0–20,0	3,0–5,0	7,0–13,0	6,0–11,0	20,0–60,0
29	р. Богдарин	16,8±0,5	18,4±0,8	1,1±0,0	16,7±0,5	4,0±0,1	9,8±0,2	8,5±0,1	36,6±1,0
		11,0–23,0	10,0–24,0	0,8–1,5	11,0–23,0	2,0–5,0	7,0–13,0	6,0–11,0	25,0–45,0
30	пос. Могзон	15,8±0,6	17,5±0,7	1,1±0,0	14,9±0,6	3,0±0,3	9,6±0,3	8,6±0,3	41,4±2,2
		12,0–25,0	11,0–27,0	0,8–1,4	9,0–22,0	2,0–5,0	7,0–14,0	7,0–11,0	30,0–60,0

Окончание табл. 2

№ ПП	Район исследований	Параметры шишки			Параметры семенных чешуй				
		длина, мм	ширина, мм	средний коэффициент формы	число	форма верхнего края, балл	длина, мм	ширина, мм	угол отклонения, ...°
31	с. Харагун	17,5±0,9	17,1±0,6	1,0±0,0	16,9±0,5	4,0±0,1	9,9±0,5	8,7±0,2	37,7±1,4
		11,0–27,0	9,0–24,0	0,6–1,3	11,0–26,0	3,0–5,0	6,0–15,0	6,0–11,0	25,0–55,0
32	р. Шара-Горхон	19,1±0,7	20,5±1,0	1,1±0,0	16,2±0,6	3,9±0,1	10,4±0,3	9,1±0,2	44,4±1,9
		13,0–28,0	11,0–27,0	0,7–1,5	11,0–24,0	3,0–5,0	8,0–14,0	7,0–11,0	20,0–60,0
<i>Бассейн р. Шилка</i>									
33	пос. Семиозерный	16,4±0,3	17,8±0,4	1,1±0,0	14,7±0,6	3,7±0,3	9,7±0,3	8,8±0,2	39,8±1,7
		13,0–21,0	14,0–22,0	0,8–1,5	9,0–22,0	2,0–5,0	7,0–13,0	7,0–11,0	25,0–60,0
34	пос. Амазар	16,8±0,4	18,1±0,4	1,1±0,0	13,9±0,8	2,9±0,3	10,3±0,4	8,7±0,2	30,7±0,6
		13,0–22,0	13,0–26,0	0,8–1,4	8,0–24,0	2,0–5,0	7,0–14,0	7,0–11,0	20,0–45,0
35	г. Могоча	16,2±0,4	18,1±0,6	1,1±0,0	13,5±0,3	3,4±0,3	10,4±0,4	9,0±0,2	38,3±3,1
		13,0–23,0	12,0–24,0	0,8–1,4	10,0–19,0	2,0–5,0	7,0–14,0	7,0–11,0	20,0–70,0
36	с. Кудеча	18,0±0,5	18,4±0,7	1,0±0,0	13,3±0,6	3,6±0,3	11,3±0,3	9,5±0,3	34,2±1,2
		14,0–22,0	11,0–25,0	0,7–1,4	8,0–19,0	2,0–5,0	8,0–14,0	7,0–13,0	20,0–50,0
37	пос. Сбега	17,8±0,9	19,2±0,6	1,1±0,0	15,8±0,7	4,0±0,0	10,8±0,4	9,1±0,3	39,3±1,6
		11,0–26,0	12,0–25,0	0,8–1,4	10,0–22,0	4,0–5,0	7,0–15,0	7,0–12,0	20,0–60,0
38	р. Белый Урюм	17,8±0,8	19,4±0,8	1,1±0,0	15,1±0,7	3,9±0,3	10,4±0,4	9,2±0,3	39,2±2,1
		11,0–24,0	12,0–25,0	0,9–1,4	10,0–22,0	2,0–5,0	6,0–14,0	7,0–12,0	20,0–60,0
39	пос. Аксёново-Зиловское	15,5±0,3	18,2±0,4	1,2±0,0	14,3±0,7	3,2±0,3	9,7±0,2	8,4±0,2	38,2±1,0
		12,0–19,0	14,0–23,0	0,9–1,5	9,0–20,0	2,0–4,0	7,0–13,0	7,0–10,0	30,0–50,0
40	пос. Жирекен	17,4±0,5	18,9±0,5	1,1±0,0	16,3±0,7	2,4±0,2	9,3±0,4	8,3±0,1	42,8±2,3
		11,0–22,0	14,0–24,0	0,8–1,4	11,0–23,0	2,0–4,0	7,0–12,0	6,0–10,0	25,0–65,0
<i>Среднее</i>		17,0±0,2	17,3±0,3	1,0±0,0	14,7±0,2	3,7±0,1	10,3±0,1	8,7±0,1	36,1±0,9
		13,5–20,1	13,6–23,5	0,9–1,2	11,3–18,1	2,4–5,0	8,0–12,3	7,5–9,6	27,7–55,7
Географическая изменчивость, %		9,0	11,7	7,4	10,4	13,0	7,7	5,5	15,1

Примечание: В таблице полужирным подчеркнутым шрифтом выделены минимальные значения показателя, полужирным – максимальные.

Ширина шишки. В исследованных ценопопуляциях средняя ширина шишки составляет 17,3±0,3 мм. Географическая изменчивость признака низкая (CV = 11,7 %), но превышает изменчивость длины шишки. Шишки со средней минимальной шириной обнаружены в районе с. Шехолан (13,6±0,6 мм), с максимальной – в районе г. Первомайска (23,5±0,8 мм). Встречаются деревья со средней шириной шишки 26–30 мм, например в районе сел Ишага, Солонцы, Гирюнино, Зуголай, пос. Амазар и Могзон, г. Первомайска, хр. Эрмана.

Форма шишки (отношение ширины к длине). Наиболее часто встречающаяся в регионе форма шишки в соответствии с коэффициентом, равным $1,0 \pm 0,0$, – шаровидная. Географическая изменчивость признака низкая ($CV = 7,4 \%$). Коэффициент формы шишки в насаждениях варьирует от 0,9 до 1,2. В ряде ценопопуляций встречаются деревья с коэффициентом формы шишки от 0,6 до 1,7, т. е. с формой шишки от яйцевидной до широкояйцевидной.

Число семенных чешуй. В регионе среднее число семенных чешуй в шишке равно $14,7 \pm 0,2$. Географическая изменчивость признака низкая ($CV = 10,4 \%$). Минимальное среднее количество семенных чешуй – $11,3 \pm 0,7$ (в районе с. Талача), максимальное – $18,1 \pm 0,6$ (в районе г. Первомайск). Встречаются в составе ряда ценопопуляций деревья со средним числом семенных чешуй 25–27.

Форма верхнего края семенной чешуи. Средний балл формы верхнего края семенной чешуи по использованной шкале наблюдений – $3,7 \pm 0,1$ (слабовыемчатая). Географическая изменчивость признака характеризуется средним уровнем ($CV = 13,0 \%$). Признак варьирует между ценопопуляциями в пределах 2,4–5,0, т. е. встречаются шишки с формой верхнего края от прямосрезанной до выемчатой.

Длина семенной чешуи. Средняя длина семенной чешуи лиственницы в регионе – $10,3 \pm 0,1$ мм. Географическая изменчивость признака низкая ($CV = 7,7 \%$). В отдельных ценопопуляциях обнаружены деревья со средней длиной семенной чешуи 16–18 мм.

Ширина семенной чешуи. Средняя ширина семенной чешуи составляет $8,7 \pm 0,1$ мм и варьирует от 7,5 (с. Новосалия) до 9,6 мм (г. Первомайск). Географическая изменчивость признака очень низкая ($CV = 5,5 \%$). В отдельных ценопопуляциях обнаружены деревья, средняя ширина семенных чешуй которых – 13–17 мм.

Угол отклонения семенных чешуй. Средний угол отклонения семенных чешуй от оси шишки равен $36,1 \pm 0,9^\circ$. Географическая изменчивость этой величины средняя ($CV = 15,1 \%$). Вариация признака в ценопопуляциях от $27,7^\circ$ (села Елизаветино и Аблатукан) до $55,7^\circ$ (г. Первомайск). В ряде ценопопуляций средний угол отклонения семенных чешуй от оси шишки на деревьях достигает 70° .

Таким образом, большинство признаков генеративных органов лиственницы Гмелина в исследованных районах Восточного Забайкалья характеризуются низкой географической изменчивостью. Средним уровнем географической изменчивости отличаются форма верхнего края и угол отклонения семенной чешуи. В то же время отмечены заметные различия по средней величине признаков в некоторых ценопопуляциях и на отдельных деревьях. Это позволяет говорить о перспективе отбора деревьев по желаемым признакам для создания сортов лиственницы.

Индивидуальная и эндогенная изменчивость.

Индивидуальная изменчивость. Средняя по региону индивидуальная изменчивость длины, ширины и формы шишки, длины и ширины семенной чешуи находится на низком уровне. Средним уровнем изменчивости характеризуются число, форма края и угол отклонения семенных чешуй ($CV = 13\text{--}20 \%$) (табл. 3).

Таблица 3

**Индивидуальная и эндогенная изменчивость признаков генеративных органов
лиственницы Гмелина в Забайкальском крае, %
Individual and endogenous variability of traits of Gmelin larch generative organs
in Zabaykalsky Krai, %**

№ ПП	Район исследований*	Параметры шишки			Параметры семенных чешуй				
		длина, мм	ширина, мм	средний коэффици- ент формы	число	форма верхнего края, балл	длина, мм	ширина, мм	угол отклоне- ния, ...°
<i>Бассейн р. Аргунь</i>									
1	пос. Кличка	12,7	4,0	11,3	12,0	17,6	7,0	7,1	9,4
		9,3±0,7	13,5±1,1	9,8±0,8	13,5±1,4	11,1±3,2	10,5±1,0	8,4±0,5	15,2±1,2
2	с. Н. Завод	8,6	8,2	7,9	12,2	24,5	10,0	9,9	17,6
		10,5±1,4	13,4±1,3	9,5±1,1	17,1±1,1	15,0±4,4	9,4±1,0	8,3±0,6	14,6±1,6
3	с. Ишага	9,3	10,4	13,3	17,8	21,6	9,3	6,5	13,2
		8,7±0,5	9,9±1,0	8,2±0,9	13,7±0,9	2,9±1,6	9,3±0,8	8,2±0,6	13,1±0,6
4	с. Солонцы	11,2	11,6	9,4	17,5	25,9	8,5	10,0	12,1
		9,5±0,5	11,5±1,5	8,5±1,0	12,0±0,9	15,6±3,9	9,4±1,0	8,1±0,8	14,2±1,7
5	с. Батакан	11,0	12,8	4,0	10,9	23,3	15,0	10,3	12,2
		10,7±1,1	9,5±0,6	7,5±1,2	14,3±1,9	18,8±4,0	9,7±0,7	8,4±0,8	11,3±2,3
6	с. Будюмкан	5,0	9,1	9,1	15,1	16,9	8,7	7,7	16,8
		9,7±0,7	11,5±1,1	10,2±1,1	15,7±1,3	11,0±4,4	9,8±0,9	7,8±0,8	16,2±1,1
7	с. Кунгара	9,8	12,6	10,7	13,0	21,1	11,8	7,2	23,3
		9,7±0,9	10,4±0,9	8,5±0,7	13,7±0,9	5,0±0,7	9,3±0,7	8,3±0,6	14,2±1,9
8	с. Шахтама	10,7	11,1	6,9	18,1	15,1	12,2	5,7	12,8
		8,2±0,4	12,3±1,0	10,8±1,4	16,4±1,7	20,7±2,8	10,2±0,8	7,5±0,5	14,4±1,1
<i>Бассейн р. Ингода</i>									
9	с. Талача 1	15,0	12,9	6,6	17,9	1,3	11,1	9,7	10,3
		11,4±2,1	15,6±1,4	12,6±1,2	17,3±1,3	1,1±1,1	8,3±1,1	10,2±1,0	15,5±1,1
10	с. Талача 2	10,5	9,9	12,0	11,9	11,6	7,3	10,8	14,0
		7,9±0,7	10,5±1,0	10,1±0,8	11,6±1,4	0,0±0,0	7,9±0,5	8,7±0,9	12,0±1,5
11	с. Урульга	11,0	12,4	9,6	19,2	10,3	12,0	13,1	13,3
		11,8±1,2	13,9±1,5	10,6±1,0	22,8±5,1	1,0±1,0	11,5±1,7	10,4±1,7	18,9±2,1
12	с. Маккаве- ево	8,2	6,3	6,8	8,0	14,6	9,2	4,5	8,1
		9,0±0,7	10,1±0,9	10,0±0,8	13,5±1,0	0,0±0,0	8,6±0,6	7,5±0,6	12,4±1,4
13	с. Оленгуй	7,6	16,8	19,1	14,8	35,1	9,8	12,3	18,9
		10,7±1,1	10,7±1,4	9,2±0,7	13,7±1,1	0,0±0,0	11,9±1,1	5,9±0,8	10,9±1,2
14	с. Елизаве- тино	8,0	9,6	9,3	6,3	17,7	7,1	8,2	15,6
		8,8±1,0	10,5±0,8	8,8±0,8	14,7±1,3	6,1±3,3	10,3±0,9	9,4±0,5	10,7±1,9

Продолжение табл. 3

№ ПП	Район исследований*	Параметры шишки			Параметры семенных чешуй				
		длина, мм	ширина, мм	средний коэффициент формы	число	форма верхнего края, балл	длина, мм	ширина, мм	угол отклонения, ...°
15	с. Аблатукан	8,6	12,6	10,2	9,5	35,1	9,3	5,7	14,5
		11,6±0,9	11,1±0,9	8,7±1,4	15,8±1,4	0,0±0,0	10,3±1,7	9,7±1,7	11,6±1,7
16	с. Шехалан	12,2	13,6	5,3	12,7	11,8	12,2	11,9	10,5
		9,3±1,6	10,0±0,8	10,0±0,7	17,9±1,5	0,0±0,0	8,3±0,7	8,1±0,6	10,6±1,6
17	с. Арей	12,2	13,3	7,5	15,5	10,0	7,3	6,7	10,9
		12,2±1,7	14,4±1,6	9,6±1,1	17,7±1,6	0,0±0,0	11,1±0,8	10,0±1,1	10,6±0,6
18	с. Новосалия	13,4	11,8	10,7	20,0	35,5	11,6	9,7	23,5
		11,4±0,8	11,4±0,9	9,2±0,8	15,7±1,7	0,0±0,0	12,4±1,0	11,2±1,6	12,3±0,7
<i>Бассейн р. Онон</i>									
19	с. Гириюнино	12,4	11,5	11,2	10,3	30,9	14,8	9,5	15,7
		7,9±0,8	10,9±0,9	11,3±1,2	11,7±1,0	5,8±2,9	9,0±1,9	6,5±0,5	20,2±1,9
20	с. Турга	8,6	6,1	8,9	11,9	26,2	8,3	4,8	23,2
		9,5±1,0	12,2±1,2	11,2±1,6	14,5±1,0	8,5±4,9	11,3±1,0	8,3±0,5	21,7±1,5
21	с. Зуголай	8,9	7,4	8,5	14,9	0,0	5,6	5,2	15,7
		9,0±1,0	9,4±1,0	11,7±1,8	15,3±2,1	0,0±0,0	6,7±0,8	6,3±1,8	19,5±1,7
22	г. Первомайск	6,6	8,0	6,2	7,9	7,2	6,9	11,5	9,6
		9,6±1,6	10,7±2,0	10,7±1,2	13,7±2,4	4,4±2,8	9,5±1,2	8,9±0,9	16,2±3,0
23	хр. Эрмана	11,9	11,6	15,3	22,4	7,4	8,7	20,5	8,3
		8,6±0,6	9,1±0,9	7,7±0,6	13,3±1,2	6,0±2,6	9,0±1,0	7,6±0,7	13,3±1,8
24	с. Алханай	9,0	9,0	4,8	12,0	14,5	9,8	8,5	12,1
		7,5±0,6	7,5±0,7	6,9±0,3	11,0±0,7	1,4±1,4	9,6±0,5	7,4±0,8	17,3±1,4
25	р. Былыра	10,0	3,0	7,0	10,3	2,9	10,5	5,9	27,8
		8,3±0,4	7,8±2,2	7,0±0,3	11,9±1,7	3,7±3,7	6,7±0,4	6,9±1,2	18,3±1,7
26	с. Мордой	5,7	7,1	12,4	11,3	0,0	1,9	3,2	35,1
		9,8±0,5	4,5±0,4	8,7±0,4	11,8±1,6	0,0±0,0	7,3±2,0	6,8±1,0	17,1±3,5
27	р. Большой Улетуй	3,4	7,7	10,6	3,2	3,8	2,4	4,4	29,9
		5,2±0,5	5,8±0,9	8,4±1,4	12,0±3,3	4,4±4,4	7,8±0,1	5,8±0,2	20,3±2,9
<i>Бассейн р. Хилок</i>									
28	р. Улетка	8,7	12,8	7,4	8,1	14,8	10,0	8,0	16,4
		10,2±0,6	11,2±0,6	9,2±0,6	16,6±1,2	7,5±2,1	8,6±0,7	7,9±0,6	16,5±1,7
29	р. Богдарин	8,8	13,3	9,8	9,1	4,8	8,0	4,1	8,5
		11,2±1,0	10,6±1,6	8,8±1,3	14,5±1,3	3,8±2,1	10,3±0,7	8,2±1,0	10,4±0,4
30	пос. Могзон	11,8	11,9	9,3	12,6	26,7	11,0	10,0	16,9
		10,9±0,8	11,4±1,5	8,6±0,7	15,9±1,5	5,7±2,4	8,6±0,5	7,6±0,7	12,1±2,0

Окончание табл. 3

№ ПП	Район исследований*	Параметры шишки			Параметры семенных чешуй				
		длина, мм	ширина, мм	средний коэффициент формы	число	форма верхнего края, балл	длина, мм	ширина, мм	угол отклонения, ...°
31	с. Харагун	15,9	11,2	9,7	9,8	4,9	14,4	8,1	11,4
		11,4±0,7	14,7±0,7	11,3±0,8	15,2±0,8	4,9±2,1	12,2±1,0	10,0±0,6	10,9±1,6
32	р. Шара-Горхон	12,3	15,5	11,9	11,3	7,4	9,8	7,7	13,3
		9,8±0,7	10,0±1,5	8,0±0,7	14,0±1,0	6,7±2,0	10,1±0,7	8,9±0,7	15,5±1,3
<i>Бассейн р. Шилка</i>									
33	пос. Семиозерный	6,5	7,9	8,9	13,5	22,5	11,3	7,6	13,3
		7,6±0,6	6,9±0,5	7,4±0,6	12,0±0,7	9,5±2,9	10,2±0,8	6,9±0,9	13,0±1,1
34	пос. Амазар	7,7	7,3	4,9	18,4	34,9	12,5	5,7	6,2
		9,7±0,7	9,2±1,1	9,0±0,8	12,9±0,9	10,0±4,1	10,3±0,7	8,3±0,6	12,7±1,4
35	г. Могоча	8,7	10,7	9,0	6,9	24,4	13,0	7,7	25,8
		8,9±0,6	8,2±1,1	8,0±0,8	11,1±1,1	15,3±4,1	10,4±0,7	7,4±0,7	14,5±1,0
36	с. Кудеча	8,0	11,7	9,8	14,4	25,9	7,4	11,5	11,1
		8,1±0,3	11,1±1,3	10,3±1,1	11,4±1,2	8,2±4,0	10,4±0,8	8,8±0,7	16,7±1,2
37	пос. Сбега	16,0	9,1	10,2	14,4	0,8	12,8	10,1	13,3
		8,4±0,9	8,4±1,0	6,9±0,6	12,6±1,3	0,8±0,8	10,1±1,2	6,3±0,5	12,9±1,5
38	р. Белый Урюм	13,7	12,3	5,3	14,3	20,8	12,5	9,4	17,1
		8,2±1,0	6,8±0,6	7,0±0,5	10,1±0,8	9,5±3,1	7,9±0,8	7,4±0,4	14,0±1,3
39	пос. Аксёново-Зиловское	6,1	7,2	5,4	16,1	25,1	6,2	5,7	8,4
		8,9±0,8	7,9±0,6	8,4±0,6	12,9±1,0	15,8±5,4	12,0±1,1	7,2±0,5	12,3±0,8
40	пос. Жирекен	9,4	8,1	6,1	14,1	28,8	12,8	4,8	17,0
		7,6±1,0	6,9±0,7	7,1±0,7	10,6±0,9	8,4±3,7	8,4±0,9	6,7±1,0	12,0±1,3
<i>Среднее</i>		9,9±0,5	10,2±0,5	9,1±0,5	13,0±0,6	18,3±1,9	9,8±0,5	8,3±0,5	15,3±1,0
		9,4±0,2	10,3±0,4	9,1±0,2	14,1±0,4	6,2±0,9	9,6±0,2	8,1±0,2	14,4±0,5

* Для каждого района исследований в верхней половине строки приведены значения индивидуальной изменчивости параметра, в нижней – эндогенной изменчивости.

Между ценопопуляциями лиственницы наблюдаются различия в уровне индивидуальной изменчивости признаков. Повышенная индивидуальная изменчивость числа семенных чешуй в шишке отмечена у ценопопуляции в районе хр. Эрмана ($CV = 22,4\%$). Выявлены значительные различия индивидуальной изменчивости между ценопопуляциями по форме верхнего края семенной чешуи – от очень низкого до высокого уровня. Так, высоким уровнем варьирования этого признака отличаются ценопопуляции лиственницы в районах сел Оленгуй, Аблатукан, Новосалия, Гирюнино, пос. Амазар.

Индивидуальная изменчивость угла отклонения семенных чешуй в ценопопуляциях также неравнозначна и варьирует от низкого до повышенного уровня. Повышенным уровнем индивидуальной изменчивости признака характеризуются ценопопуляции в районах сел Новосалия, Турга, г. Могоча ($CV = 23,2-25,8 \%$).

Эндогенная изменчивость. Средний уровень эндогенной изменчивости признаков генеративных органов лиственницы по исследованным районам находится в пределах от очень низкого (форма верхнего края чешуи) до среднего (число и угол отклонения семенных чешуй). Низким уровнем эндогенной изменчивости характеризуются длина, ширина и форма шишки, длина и ширина семенной чешуи. При этом повышенный уровень эндогенной изменчивости отмечен в ценопопуляциях в районе сел Шахтама (форма верхнего края семенной чешуи), Урульга (число семенных чешуй), Турга (угол отклонения семенных чешуй) (табл. 3).

Таким образом, ценопопуляции лиственницы Гмелина характеризуются заметными различиями в уровнях индивидуальной и эндогенной изменчивости числа, формы верхнего края и угла отклонения семенных чешуй. Размерные признаки шишки и семенных чешуй имеют низкую индивидуальную и эндогенную изменчивость.

Корреляционные связи между признаками генеративных органов.

Для успешного отбора лиственницы по ряду хозяйственно ценных признаков важно знать корреляционную связь морфологических признаков между собой. Наши исследования позволили выявить следующие корреляционные связи признаков генеративных органов лиственницы Гмелина.

Согласно коэффициенту Спирмена значительная ($r_s \geq 0,7$) и статистически достоверная корреляционная связь существует между длиной шишки, ее шириной, числом семенных чешуй, длиной и шириной чешуи, углом отклонения чешуй; шириной шишки и формой шишки, числом чешуй, длиной и шириной чешуи, углом отклонения чешуй; формой шишки и углом отклонения чешуй; числом чешуй и углом отклонения чешуй; длиной и шириной чешуи. Средний уровень корреляционной связи ($r_s = 0,41-0,69$) обнаружен между другими признаками генеративных органов (табл. 4).

Таким образом, при отборе деревьев с крупными шишками одновременно могут отбираться растения с большими числом, длиной, шириной и углом отклонения семенных чешуй.

Корреляционные связи признаков генеративных органов лиственницы Гмелина с географическими параметрами района исследований.

Значительный уровень положительной корреляционной связи ($r_s \geq 0,7$) отмечен у числа и угла отклонения семенных чешуй с высотой над уровнем моря.

Ряд признаков генеративных органов лиственницы умеренно положительно корреляционно связан с условиями местообитания – крутизной и экспозицией склона, типом гидротоп. Это свидетельствует о том, что склоны преимущественно южной экспозиции обуславливают большие размер шишек, величину семенных чешуй и угол отклонения семенных чешуй от оси шишки. С крутизной склона положительно коррелируют такие признаки, как ширина и форма шишки, число семенных чешуй и более значительно – угол отклонения семенных чешуй.

Таблица 4

**Корреляция признаков генеративных органов лиственницы Гмелина
в Забайкальском крае ($t_{05} = 2,02$; $t_{01} = 2,71$)**
Correlation of traits of Gmelin larch generative organs in Zabaykalsky Krai
($t_{05} = 2.02$; $t_{01} = 2.71$)

Признак	Коэффициент корреляции Спирмена	Статистическая значимость коэффициента корреляции Спирмена
<i>Длина шишки</i>		
Ширина шишки	0,91	13,74
Форма шишки	0,50	3,53
Число чешуй	0,85	9,85
Форма верхнего края	0,42	2,87
Длина чешуи	0,81	8,49
Ширина чешуи	0,80	8,09
Угол отклонения чешуй	0,74	6,75
<i>Ширина шишки</i>		
Форма шишки	0,73	6,59
Число чешуй	0,85	9,88
Форма верхнего края	0,51	3,67
Длина чешуи	0,73	6,59
Ширина чешуи	0,74	6,77
Угол отклонения чешуй	0,89	11,88
<i>Форма шишки</i>		
Число чешуй	0,62	4,87
Форма верхнего края	0,48	3,39
Длина чешуи	0,35	2,26
Ширина чешуи	0,52	3,75
Угол отклонения чешуй	0,81	8,49
<i>Число чешуй</i>		
Форма верхнего края	0,45	3,08
Длина чешуи	0,55	4,04
Ширина чешуи	0,62	4,89
Угол отклонения чешуй	0,77	7,48
<i>Форма верхнего края</i>		
Длина чешуи	0,51	3,63
Ширина чешуи	0,52	3,76
Угол отклонения чешуй	0,59	4,48
<i>Длина чешуи</i>		
Ширина чешуи	0,70	6,03
Угол отклонения чешуй	0,59	4,50
<i>Ширина чешуи</i>		
Угол отклонения чешуй	0,64	5,12

Примечание: коэффициент корреляции Спирмена $r_s \leq 0,3$ – корреляционная связь слабая.

Степень увлажнения почвы умеренно и положительно коррелирует с длиной и шириной шишки, числом семенных чешуй, шириной семенной чешуи и углом отклонения семенных чешуй от оси шишки. Большинство исследованных признаков генеративных органов лиственницы умеренно связаны с длиной и шириной местности, а также высотой над уровнем моря (табл. 5). Таким образом, величина генеративных органов лиственницы положительно корреляционно связана с условиями тепло- и влагообеспечения местообитания.

Таблица 5

Корреляция признаков, эндогенной и индивидуальной изменчивости генеративных органов лиственницы Гмелина в Забайкальском крае с географическими параметрами и условиями окружающей среды
($t_{05} = 2,02$; $t_{01} = 2,71$)

Correlation of traits, endogenous and individual variability of Gmelin larch generative organs in Zabaykalsky Krai with geographical parameters and environmental conditions ($t_{05} = 2.02$; $t_{01} = 2.71$)

Признак	Уровень корреляции признаков		Эндогенная изменчивость		Индивидуальная изменчивость	
	r_s	t	r_s	t	r_s	t
<i>Ширина</i>						
Длина шишки	0,43	2,93	0,57	4,28	0,46	3,19
Ширина шишки	0,52	3,75	0,35	2,30	0,57	4,28
Форма шишки	0,59	4,50	0,53	3,85	0,34	2,23
Число чешуй	0,49	3,42	0,45	3,11	0,40	2,69
Форма верхнего края	0,60	4,62	0,40	2,69	0,37	2,46
Длина чешуи	0,43	2,93	0,47	3,28	0,65	5,27
Ширина чешуи	0,67	5,59	0,55	4,06	0,54	3,95
Угол отклонения чешуй	0,60	4,58	0,51	3,65	0,51	3,65
<i>Долгота</i>						
Длина шишки	0,63	4,97	0,08	0,49	0,11	0,68
Ширина шишки	0,58	4,43	0,11	0,68	0,08	0,49
Форма шишки	0,38	2,54	0,04	0,25	0,24	1,52
Число чешуй	0,47	3,30	0,05	0,31	0,29	1,87
Форма верхнего края	0,05	0,29	0,74	6,78	0,33	2,15
Длина чешуи	0,58	4,33	0,17	1,06	0,38	2,53
Ширина чешуи	0,55	4,02	0,09	0,56	0,19	1,19
Угол отклонения чешуй	0,45	3,11	0,50	3,56	0,36	2,38
<i>Высота над уровнем моря</i>						
Длина шишки	0,53	3,82	0,53	3,85	-0,04	-0,25
Ширина шишки	0,62	4,84	0,54	3,95	0,18	1,13
Форма шишки	0,61	4,80	0,64	5,13	0,10	0,62
Число чешуй	0,71	6,27	0,51	3,65	0,20	1,26
Форма верхнего края	0,59	4,52	0,30	1,94	0,15	0,94
Длина чешуи	0,29	1,86	0,68	5,72	0,12	0,75
Ширина чешуи	0,42	2,85	0,48	3,37	0,24	1,52
Угол отклонения чешуй	0,71	6,16	0,62	4,87	-0,13	-0,81

Окончание табл. 5

Признак	Уровень корреляции признаков		Эндогенная изменчивость		Индивидуальная изменчивость	
	r_s	t	r_s	t	r_s	t
<i>Экспозиция склона</i>						
Длина шишки	0,44	3,04	0,24	1,52	0,31	2,01
Ширина шишки	0,49	3,44	0,24	1,52	0,23	1,46
Форма шишки	0,56	4,21	0,33	2,15	0,37	2,46
Число чешуй	0,38	2,56	0,16	1,00	0,42	2,85
Форма верхнего края	0,34	2,19	0,38	2,53	0,19	1,19
Длина чешуи	0,40	2,71	0,22	1,39	0,33	2,15
Ширина чешуи	0,46	3,17	0,17	1,06	0,13	0,81
Угол отклонения чешуй	0,53	3,88	0,59	4,50	0,33	2,15
<i>Крутизна склона</i>						
Длина шишки	0,36	2,39	0,10	0,62	0,49	3,47
Ширина шишки	0,52	3,77	0,17	1,06	0,14	0,87
Форма шишки	0,69	5,94	0,29	1,87	0,22	1,39
Число чешуй	0,40	2,70	0,18	1,13	0,35	2,30
Форма верхнего края	0,27	1,71	0,40	2,69	0,10	0,62
Длина чешуи	0,31	1,97	0,24	1,52	0,37	2,46
Ширина чешуи	0,26	1,65	0,22	1,39	0,08	0,49
Угол отклонения чешуй	0,60	4,65	0,48	3,37	0,04	0,25
<i>Тип гидротопы</i>						
Длина шишки	0,50	3,58	0,31	2,01	0,24	1,52
Ширина шишки	0,45	3,13	0,10	0,62	0,45	3,11
Форма шишки	0,24	1,51	0,28	1,80	0,46	3,19
Число чешуй	0,56	4,13	0,23	1,46	0,17	1,06
Форма верхнего края	0,35	2,32	0,10	0,62	0,58	4,39
Длина чешуи	0,23	1,47	0,40	2,69	0,44	3,02
Ширина чешуи	0,53	3,81	0,22	1,39	0,35	2,30
Угол отклонения чешуй	0,45	3,07	0,28	1,80	0,66	5,42

Примечание: t – статистическая значимость коэффициента корреляции.

Корреляционная связь уровня изменчивости генеративных признаков лиственницы Гмелина с географическими параметрами и условиями окружающей среды.

Эндогенная изменчивость. Значительный уровень положительной корреляционной связи обнаружен между долготой местности и эндогенной изменчивостью формы края семенной чешуи ($r_s = 0,74$). Средним уровнем корреляционных связей характеризуются эндогенная изменчивость: длины шишки с географической широтой, высотой над уровнем моря местообитания и типом гидротопы; ширины шишки с географической широтой и высотой

над уровнем моря; формы шишки с географической широтой, высотой над уровнем моря и экспозицией склона; числа семенных чешуй с географической широтой и высотой над уровнем моря; формы верхнего края семенной чешуи с географической широтой, экспозицией и крутизной склона; длины семенной чешуи с географической широтой, высотой над уровнем моря и типом гидротопы; ширины семенной чешуи с географической широтой и высотой над уровнем моря; угла отклонения семенных чешуй с широтой и долготой, высотой над уровнем моря, экспозицией и крутизной склона. Связь других признаков генеративных органов с параметрами окружающей среды слабая (см. табл. 4).

Таким образом, бóльшим числом тесных корреляционных связей с эндогенной изменчивостью признаков генеративных органов характеризуются географическая широта и высота над уровнем моря.

Индивидуальная изменчивость. Между индивидуальной изменчивостью признаков генеративных органов лиственницы Гмелина и условиями окружающей среды также выявлена статистически достоверная корреляционная связь. Средний уровень корреляционной связи обнаружен у всех исследованных признаков с географической широтой местности. С долготой местообитания коррелируют индивидуальная изменчивость верхнего края семенной чешуи, длины и угла отклонения семенных чешуй; с крутизной склона – длины и формы шишки, числа, длины и угла отклонения семенных чешуй; с экспозицией склона – длины и формы шишки, числа и длины семенных чешуй. Индивидуальная изменчивость большинства исследованных признаков имеет корреляционную связь среднего уровня с типом гидротопы (кроме индивидуальной изменчивости длины шишки и числа чешуй) (см. табл. 4).

Итак, уровень изменчивости признаков генеративных органов лиственницы в большей мере связан с географической широтой, высотой над уровнем моря и типом гидротопы. Видимо, температурный фактор и условия увлажнения местообитания способствуют повышению уровня эндогенной и индивидуальной изменчивости генеративных признаков лиственницы в регионе.

Выводы

В результате исследования для генеративных органов лиственницы Гмелина в Забайкальском крае установлено следующее.

1. Географическая изменчивость морфологических признаков характеризуется очень низким (ширина семенной чешуи), низким (длина, ширина, форма шишки, число семенных чешуй, длина семенной чешуи) и средним (форма верхнего края семенной чешуи, угол отклонения семенной чешуи от оси шишки) уровнями.

2. Индивидуальная изменчивость морфологических признаков низкая (длина, ширина, форма шишки, длина и ширина семенной чешуи) и средняя (число семенных чешуй, форма верхнего края семенной чешуи, угол отклонения семенной чешуи от оси шишки).

3. Уровень эндогенной изменчивости морфологических признаков оценивается как очень низкий (форма верхнего края семенной чешуи), низкий (длина, ширина, форма шишки, длина и ширина семенной чешуи) и средний (угол отклонения семенной чешуи).

4. Значительные положительные корреляционные связи обнаружены у длины шишки и ее ширины, длины, ширины и числа семенных чешуй; ширины шишки и длины, ширины и угла отклонения семенных чешуй; формы шишки и угла отклонения семенных чешуй; числа семенных чешуй и угла их отклонения.

5. Большинство исследованных признаков генеративных органов лиственницы имеют умеренную корреляционную связь с географическими координатами, высотой над уровнем моря, а также с условиями местообитания – экспозицией и крутизной склона, типом гидротопа.

6. Эндогенная изменчивость большинства признаков генеративных органов лиственницы умеренно корреляционно связана с географической широтой и высотой над уровнем моря.

7. Индивидуальная изменчивость почти всех признаков генеративных органов лиственницы умеренно коррелирует с географической широтой и типом гидротопа.

8. В составе ряда ценопопуляций лиственницы обнаружены деревья со значительными отклонениями от средних показателей. Это указывает на перспективу отбора форм лиственницы для создания насаждений с желаемыми признаками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барченков А.П. Изменчивость лиственницы в Северном Забайкалье (Становое нагорье) // Вестн. ТГУ. Сер.: Биология. 2008. № 3(4). С. 7–15.

Barchenkov A.P. Variability of Larch in Northern Transbaikalia (Stanovoe plateau). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2008, no. 3(4), pp. 7–15. (In Russ.).

2. Барченков А.П. Морфологическая изменчивость и качество семян лиственницы Гмелина // Сиб. экол. журн. 2011. Т. 18, № 3. С. 439–446.

Barchenkov A. P. Morphological Variability and Quality of the Seeds of *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 439–446. (In Russ.).

3. Барченков А.П., Милютин Л.И. Морфологическая изменчивость лиственницы в Средней Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. XXIV, № 4-5. С. 367–372.

Barchenkov A.P., Milyutin L.I. Morphological Variability of Larch in Central Siberia. *Conifers of the boreal zone*, 2007, vol. 24, no. 4-5, pp. 367–372. (In Russ.).

4. Барченков А.П., Милютин Л.И. Изменчивость генеративных органов лиственниц Гмелина и Каяндера в Восточной Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. XXV, № 1-2. С. 37–43.

Barchenkov A.P., Milyutin L.I. Variability of Generative Organs of Gmelin and Kayander Larch Trees in Eastern Siberia. *Conifers of the boreal zone*, 2008, vol. 25, no. 1-2, pp. 37–43. (In Russ.).

5. Ермолаева М.В. Изменчивость шишек в географических культурах в Удмуртской Республике // Вестн. Ижевской ГСХА. 2012. № 3(32). С. 60–63.

Ermolaeva M.V. The Variability of Larch Cultures Cones in Udmurt Republic. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*, 2012, no. 3(32), pp. 60–63. (In Russ.).

6. Ирошников А.И. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. М.: ВНИИЛМ, 2004. 182 с.

Iroshnikov A.I. *Larch Trees of Russia. Biodiversity and Selection*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 182 p. (In Russ.).

7. Ковылина О.П., Ковылин Н.В., Познахирко П.Ш. Семеношение лиственницы в защитных насаждениях Хакасии // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 4. С. 115–119.

Kovylyina O.P., Kovylin N.V., Poznakhirko P.Sh. Larch Seed Production in Protective Plantations of Khakassia. *The Bulletin of KrasGAU*, 2008, no. 4, pp. 115–119. (In Russ.).

8. Ковылина О.П., Ковылин Н.В., Познахирко П.Ш. Изменчивость шишек лиственницы сибирской в полевых защитных полосах разной конструкции в условиях Ширинской степи // Сиб. экол. журн. 2009. Т. 16, № 6. С. 819–827.

Kovylyina O.P., Kovylin N.V., Poznakhirko P.S. Variability of the Cones of Siberian Larch in Field-Protecting Plantations of Different Design under the Conditions of the Shira Steppe. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 819–827. (In Russ.).

9. Круклис М.В., Милютин Л.И. Лиственница Чекановского. М.: Наука, 1977. 212 с.

Krukliis M.V., Milyutin L.I. *Chekanovsky Larch*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 212 p. (In Russ.).

10. Лавренов М.А., Васильев С.Б., Борисов В.А. Изменчивость вегетативных и генеративных органов лиственницы ольгинской в условиях интродукции // Resources and Technology. 2018. Т. 15, № 3. С. 52–61.

Lavrenov M.A., Vasiliev S.B., Borisov V.A. Variability of Vegetative and Generative Organs of Introduced Korean Dahurian Larch. *Resources and Technology*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 52–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2018.4203>

11. Логунов Д.В. Корреляция морфологических признаков видов рода (*Larix* Mill.) // Лесоводство Нижегородской области на рубеже веков: сб. науч. тр. по материалам науч.-практ. конф. Н. Новгород: НГСХА, 2004. С. 86–90.

Logunov D.V. Correlation of Morphological Features of Species of the Genus *Larix* Mill. *Forestry of the Nizhny Novgorod Region at the Turn of the Century: Collection of Academic Papers Based on the Materials of the Scientific and Practical Conference*. NNSAA, 2004, pp. 86–90. (In Russ.).

12. Макаров В.П. Изменчивость морфологических видов и климатипов лиственницы в географических культурах (Восточное Забайкалье) // Лесоведение. 2005. № 4. С. 67–75.

Makarov V.P. Variability of Larch Morphological Species and Climates in Provenances (Eastern Transbaikalian Region). *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2005, no. 4, pp. 67–75. (In Russ.).

13. Макаров В.П., Бобринев В.П., Милютин Л.И. Географические культуры лиственницы в Восточном Забайкалье. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2002. 187 с.

Makarov V.P., Bobrinev V.P., Milyutin L.I. *Provenance Trial Plantations of Larch in Eastern Transbaikalia*. Ulan-Ude, BSC SB RAS Publ., 2002. 187 p. (In Russ.).

14. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.

Mamayev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).

15. Погребняк П.С. Основы лесной типологии. 2-е изд., испр. и доп. Киев: АН УССР, 1955. 456 с.

Pogrebnyak P.S. *Fundamentals of Forest Typology*. Kiev, AN USSR Publ., 1955. 456 p. (In Russ.).

16. Jia Q., Zhang H., Zhang L., Zhang H. Variation Analysis of Hybrid Larch Families and Superior Families Selection. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, iss. 4, pp. 1–7.

17. Lu Z., Shi F., Ma W., Li X., Zhang B. Variability of the Seeds and Cones and Key Taxonomic Characters Selection of *Larix* in Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 1999, vol. 10, pp. 15–19. <https://doi.org/10.1007/BF02855472>

18. Yang C., Xu J., Cai B., Xia D., Yang S., Zhang P. Geographic Variation Pattern of *Larix olgensis*. *Journal of Forestry Research*, 1997, vol. 8, pp. 3–9. <https://doi.org/10.1007/BF02864930>

19. Yang C., Zhang W., Yu B., Qin S. Study on Geographic Variation of Dahurian Larch in China. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, vol. 2, pp. 34–41. <https://doi.org/10.1007/BF02874805>

20. Yu B. A Study on the Geographic Variation and Selection of the Best Provenance of *Larix olgensis*. *Journal of Northeast Forestry University*, 1994, vol. 5, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF02875037>

21. Zhang G.-J., Dai B., Sun H., Zhao Y., Jia X., Wang W., Yang J. Seed Germination and Seedling Growth Characteristics of 25 *Larix principis-rupprechtii* Provenances. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, vol. 7, pp. 11–14,83.

22. Zhang X.-B., Feng J.-H., Ren J.-R. Morphological Variance and Natural Types' Division of Plus Trees of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, vol. 12, pp. 123–127. <https://doi.org/10.1007/BF02867210>

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*2

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-91-100

Ветрозащитная роль березового криволесья на Большом Соловецком острове

А.Н. Соболев¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

П.А. Феклистов²✉, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Л.Ф. Попова³, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [W-4158-2018](https://orcid.org/0000-0003-1650-6797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-6797>

¹Соловецкий музей-заповедник, пос. Соловецкий, Приморский р-н, Архангельская обл., Россия, 163000; alex-sobol@mail.ru .

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Сев. Двины, д. 109, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru✉

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

Поступила в редакцию 01.10.20 / Одобрена после рецензирования 11.01.21 / Принята к печати 13.01.21

Аннотация. Ветрозащитными природными сообществами береговой линии Большого Соловецкого острова являются березовые криволесья, состоящие преимущественно из березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb.) с вкраплениями березы пушистой (*B. pubescens* Ehrh.) и единичным присутствием ели, ивы, осины. Они охватывают остров с востока, запада и юга на ширину от десятков до сотен метров, лишь на севере чередуясь с сосняками, и защищают внутренние лесные фитоценозы от ветровой нагрузки и ветровала. Цель исследования – выявление ветрозащитной роли березового криволесья. Работы выполнены в 3 точках побережья на пробных площадях, в пределах которых заложены трансекты, перпендикулярные береговой линии (всего 41 трансекта). Тип леса – березняки черничные (2 пробные площади) и брусничные (1 пробная площадь). Пробные площади и, соответственно, трансекты заложены в разных по степени изрезанности побережья условиях: в куту полуоткрытого залива (пробная площадь 1), защищенного от ветрового воздействия (конец глухого залива); на мысу морского побережья (пробная площадь 2), испытывающего значительную ветровую нагрузку; на сравнительно ровной береговой линии (пробная площадь 3). На разном расстоянии от берега измерялась скорость ветра с помощью термоанемометра LV-110. Скорость ветра и амплитуда ее колебаний снижаются от берега моря в глубь приморских березовых насаждений. Это изменение носит постоянный и неравномерный характер, зависит от свойств береговой линии, расположения пробной площади. Наибольшая скорость ветра наблюдается на мысу, несколько меньшая на открытом берегу и самая малая – в куту залива. Во всех изученных местах скорость ветра быстро снижается до минимальной, особенно на первых десятках метров березовых насаждений. Березовое криволесье гасит скорость ветра до минимальной на расстоянии около 50 м от берега и защищает от ветра фитоценозы внутренней части острова.

Ключевые слова: березовые криволесья, береза извилистая, скорость ветра, остров Большой Соловецкий, расстояние от опушки, ветрозащитные древостой

Благодарности: Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН (№ государственной регистрации – 122011400384-2).

© Соболев А.Н., Феклистов П.А., Попова Л.Ф., 2022



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

Для цитирования: Соболев А.Н., Феклистов П.А., Попова Л.Ф. Ветрозащитная роль березового криволеся на Большом Соловецком острове // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 91–100. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-91-100>

Original article

Windproof Role of Birch Crooked Forests on Bolshoy Solovetsky Island

*Aleksandr N. Sobolev*¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist; ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>
*Pavel A. Feklistov*², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>
*Ludmila F. Popova*³, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [W-4158-2018](https://orcid.org/0000-0003-1650-6797), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-6797>

¹Solovetsky Museum-Reserve, pos. Solovetsky, Primorskiy District, Arkhangelsk Region, 163000, Russian Federation; alex-sobol@mail.ru

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru

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

Received on October 1, 2020 / Approved after reviewing on January 11, 2021 / Accepted on January 13, 2021

Abstract. Birch crooked forests, consisting mainly of twisted birch (*Betula tortuosa* Ledeb.) with patches of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) and a single presence of spruce, willow, and aspen are windproof natural communities along the shoreline of Bolshoy Solovetsky Island. They cover the island from the East, West and South with a width of tens to hundreds of meters and only in the North they alternate with pine trees and protect the internal forest phytocenoses from wind loading and windfall. The research aims at revealing the windproof role of birch crooked forests. The work was carried out at 3 points along the shoreline on trial plots, within which transects were laid out perpendicular to the shoreline (a total of 41 transects). Blueberry birch (2 trial plots) and cranberry birch (1 trial plot) forest types were studied. Trial plots and transects, respectively, were laid out in different conditions in terms of coast indentation: in the bayhead of a semi-open bay (trial plot 1), protected from wind action (blind bay end); on a cape of the seashore (trial plot 2), which is exposed to significant wind loading; on a relatively smooth shoreline (trial plot 3). Wind speed was measured at different distances from the shore using the anemometer LV 110. The wind speed and the amplitude of its fluctuations decrease from the shore towards the coastal birch plantations. This change has a constant and irregular character and depends on the properties of the shoreline and the trial area location. The highest wind speed is observed on the cape, somewhat lower on the open shore, and the lowest in the bayhead. In all the studied areas the wind speed rapidly decreases to the minimum, especially in the first tens of meters of birch plantations. The birch crooked forest dampens the wind speed to a minimum at a distance of about 50 m from the shore and protects phytocenoses of the inner part of the island from the wind.

Keywords: birch crooked forests, *Betula tortuosa*, wind speed, Bolshoy Solovetsky Island, distance from forest edge, windproof stands

Acknowledgements: The studies were carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS (state registration No. 122011400384-2).

For citation: Sobolev A.N., Feklistov P.A., Popova L.F. Windproof Role of Birch Crooked Forests on Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 91–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-91-100>



Введение

Деревья, произрастающие вдоль береговой линии моря, испытывают интенсивную ветровую нагрузку и изменяются под ее воздействием: приобретают низкорослую, стелющуюся или кривоствольную форму, кроны деформируются, нередко становятся однобокими [4, 22 и др.] Формируя приморские редколесья и криволесья, эти деревья снижают скорость ветра, уменьшают его негативное воздействие на природную среду, выполняют ветрозащитную функцию [2], предотвращают ветровалы [1] и в целом играют важную экологическую роль [10]. На снижение скорости ветра прибрежными древостоями до минимальной неоднократно указывалось в литературе как на фактор, препятствующий ветровалам и буреломам, избыточному испарению воды, способствующий сохранению правильной формы поперечного сечения ствола других древостоев [7, 8, 12, 19, 21, 23, 24 и др.].

Одним из таких ветрозащитных природных сообществ береговой линии Соловецкого архипелага являются березовые криволесья, состоящие преимущественно из березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb.) с вкраплениями березы пушистой (*B. pubescens* Ehrh.) и единичным присутствием ели, ивы, осины. Они охватывают Большой Соловецкий остров с востока, запада и юга, занимая прибрежную территорию на ширину от десятков до 500 м (рис. 1), и лишь на севере чередуются с сосняками.



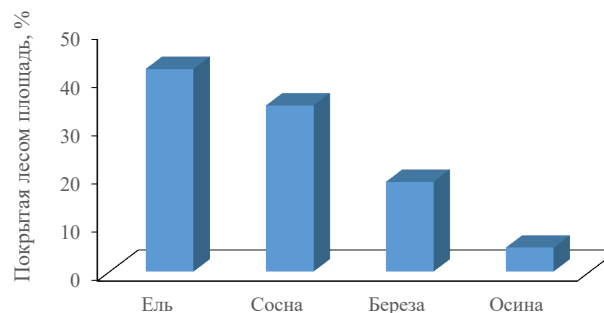
Рис. 1. Криволесья из березы извилистой

Fig. 1. *Betula tortuosa* crooked forests

Не исключено, что именно благодаря этим ветрозащитным фитоценозам сформировался породный состав внутренних частей острова. Леса на Соловках образованы преимущественно елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), осиной (*Populus tremula* L.), березами пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и извилистой (*B. tortuosa* Ledeb.). Преобладают ельники и сосняки (76,4 % лесопокрытой площади) [6] черничных типов [20] (рис. 2). Доля березняков составляет лишь 18,6 % площади, причем сюда входят и береза извилистая, и береза пушистая. Фитоценозы березы извилистой приурочены к побережью, а береза пушистая произрастает в ельниках и реже – в сосняках.

Рис. 2. Распределение преобладающих пород по покрытым лесом землям

Fig. 2. Distribution of predominant species over forested lands



Соловки входят в Список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Исследование природы Соловецких островов является важной задачей [14]. Лесные массивы архипелага относятся к защитным, имеющим историческое и научное значение.

Цель исследования – выявить ветрозащитную роль березняков побережья Соловецких островов.

Объекты и методы исследования

Исследования выполняли в березовых насаждениях кривоствольной формации, представленных березой извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb.) и кривоствольной формой березы пушистой (*B. pubescens* Ehrh.), а также их гибридами, расположенными по побережью Большого Соловецкого острова. Березовые криволесья чистые по составу или с незначительной примесью других пород. Высота деревьев небольшая, очень стабильная и составляет 5–10 м, диаметр – до 10–12 см, густота достаточно значительная, типы условий местопроизрастания – черничный (пробные площади (ПП) 1 и 3) и брусничный (ПП 2), зеленомошная группа типов леса. Относительная полнота древостоев – 0,6–0,7, возраст – 70–80 лет, бонитет – V–Va.

Оценку изменения скорости ветра по мере удаления от берега моря проводили в 3 насаждениях (рис. 3): в куту полукрытого залива (ПП 1), защищенного от ветрового воздействия (конец глухого залива); на мысу морского побережья (ПП 2), испытывающего значительную ветровую нагрузку; на сравнительно ровной береговой линии (ПП 3), которая по влиянию ветра занимает промежуточное положение по отношению к двум другим ПП.

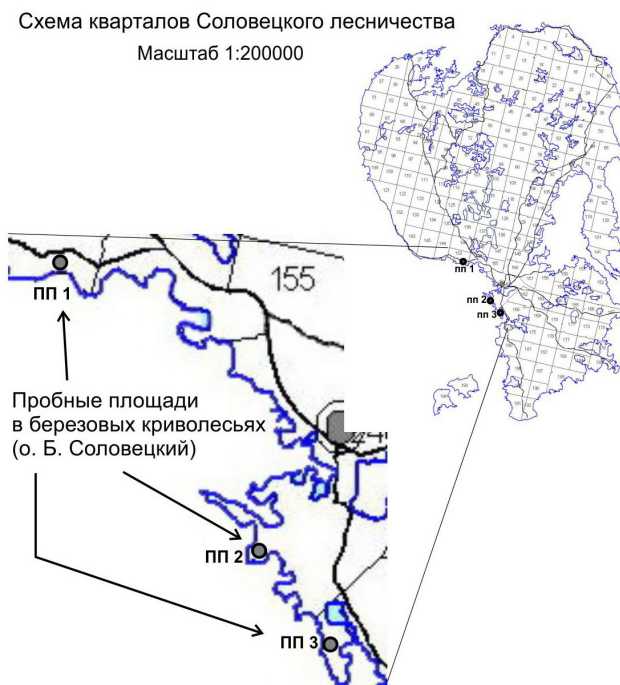


Рис. 3. Места закладки пробных площадей и трансект

Fig. 3. Places of laying out trial plots and transects

Скорость ветра определяли на непровешенных ходовых линиях (трансектах) [9, 15, 16, 18], проложенных на расстоянии 10 м друг от друга (максимальная высота древостоя) перпендикулярно побережью: на ПП 1 – 17 трансект, на ПП 2 – 6, на ПП 3 – 18. Измерения выполняли по мере удаления

от берега моря: на границе суши и моря (открытое пространство); на опушке леса (0 м); на расстоянии 10, 30, 50 и 65–100 м от опушки в глубь леса. Скорость ветра устанавливали при помощи термоанемометра LV-110 с точностью до 0,01 м/с на высоте 2 м в многократной (до 30–60 раз) повторности в каждой точке. Таксацию древостоя проводили с учетом рекомендаций И.И. Гусева [5] и «Полевого лесотаксационного справочника» [13]; определение типа леса – с учетом рекомендаций В.Н. Сукачева и С.В. Зонна [17]. Статистическую обработку материала выполняли в соответствии с [3, 11].

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет средних значений скорости ветра на разных расстояниях от берега моря (см. таблицу) показал, что все значения достоверны для уровня значимости 0,01: расчетный критерий Стьюдента значительно больше табличного и колеблется от 11,0 до 49,2. Точность опыта составляет 2,1–9,9 %.

Скорость ветра в березовых криволинейных по мере удаления от берега моря Wind speed in birch crooked forests with increasing distance from the seashore

Показатель	Берег моря	Опушка (0 м)	Расстояние от опушки, м			
			10	30	50	65–100
<i>III 1</i>						
Скорость на трансектах, м/с	0,57–4,50	0,49–3,47	0,34–2,89	0,27–2,41	0,33–1,36	0,25–0,96
Средняя скорость, м/с	1,72	1,19	0,87	0,85	0,70	0,48
Стандартное отклонение, м/с	0,63	0,50	0,30	0,30	0,26	0,29
Основная ошибка, м/с	0,10	0,08	0,05	0,05	0,04	0,05
Коэффициент изменения, %	45,8	55,0	47,6	48,9	45,4	61,6
Достоверность	17,3	13,8	16,9	17,6	19,2	11,0
Точность, %	7,2	8,5	7,7	8,1	7,1	9,9
Максимальная скорость, м/с	7,50	6,20	4,10	3,40	3,80	2,68
<i>III 2</i>						
Скорость на трансектах, м/с	0,50–3,32	0,54–3,84	0,55–4,09	0,56–3,57	0,64–2,86	0,40–1,65
Средняя скорость, м/с	2,14	2,07	2,00	1,89	1,49	0,93
Стандартное отклонение, м/с	0,38	0,33	0,24	0,33	0,22	0,13
Основная ошибка, м/с	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,02
Коэффициент изменения, %	19,6	16,2	13,1	19,4	16,9	14,8
Достоверность	34,5	40,3	49,2	35,0	40,2	44,1
Точность, %	3,1	2,6	2,1	3,2	2,7	2,4
Максимальная скорость, м/с	4,50	4,90	5,40	4,50	3,60	2,10
<i>III 3</i>						
Скорость на трансектах, м/с	0,92–5,03	0,61–5,42	0,53–3,69	0,50–1,90	0,40–0,99	0,38–0,82

Окончание таблицы

Показатель	Берег моря	Опушка (0 м)	Расстояние от опушки, м			
			10	30	50	65–100
Средняя скорость, м/с	2,13	1,86	1,39	0,88	0,60	0,54
Стандартное отклонение, м/с	0,65	0,57	0,38	0,26	0,19	0,17
Основная ошибка, м/с	0,12	0,10	0,07	0,05	0,03	0,03
Коэффициент изменения, %	38,9	38,8	33,0	32,8	30,7	30,1
Достоверность	18,6	19,8	22,5	20,7	22,8	21,5
Точность, %	7,1	7,0	6,0	6,0	5,6	5,5
Максимальная скорость, м/с	6,40	6,20	5,40	2,46	2,04	1,76

Анализ таблицы выявляет следующее. Скорость ветра – величина изменчивая. Наименьшей изменчивостью она характеризуется на мысу. Коэффициент изменчивости колеблется на разных расстояниях от берега в пределах 13,1...19,6 %: на открытом берегу от 30,1 до 38,9 %; в куту от 45,4 до 61,6 %. Порывы ветра в среднем больше также в куту – 7,5 м/с. На открытом берегу скорость ветра достигает 6,4 м/с, на мысу она составляет лишь 4,5 м/с. То есть скорость ветра наиболее стабильна на мысу и, наоборот, в куту – казалось бы в замкнутом пространстве – ветровой режим наиболее изменчив.

Первые 10 м березового криволесья гасят ветер в куту и на открытом берегу практически одинаково, снижая его соответственно на 27 и 26 % по отношению к опушке леса, на мысу – только на 4 %. На максимальном расстоянии от опушки (65–100 м) скорость ветра гасится в куту на 60, на открытом берегу на 71, а на мысу только на 45 %.

В целом скорость ветра по направлению от морского побережья в глубь березового лесного фитоценоза неравномерна и характеризуется постоянным снижением. На расстоянии до 65–100 м от берега моря она уменьшилась в 2–4 раза (в среднем с 1,72–2,14 до 0,48–0,93 м/с) по сравнению с побережьем.

Сопоставление изменения скорости ветра в различных по свойствам береговой линии березовых криволесьях позволило установить (рис. 4) более медленное и сравнительно небольшое снижение скорости ветра в насаждениях на мысу на всем их протяжении (96,7–43,4 % от скорости ветра на берегу моря). В куту залива снижение скорости ветра более резкое с самого начала и значительное по всему древостоя (69,3–28,2 %). На открытом берегу – более медленное на опушке и на 10 м от нее (87,2–65,3 %), чем в куту залива (69,3–50,5 %). Начиная с расстояния от берега 30 м темпы снижения, наоборот, становятся немного более резкими: 41,2–25,1 % на открытом берегу и 49,5–28,2 % в куту залива.

Влияние березового криволесья на скорость ветра удобнее проследить на ПП 3. Она располагается на сравнительно ровной береговой линии и на скорость ветра не оказывают влияния завихрения, связанные с расположением на мысу или в глубине залива, ветер полностью поглощается березняком. Здесь на опушке значения скорости ветра имеют большой разброс на разных трансектах, но по мере углубления в березняк амплитуда резко уменьшается (рис. 5).

Ветер гасится березовым криволесьем очень быстро. На расстоянии около 50 м от берега скорость ветра становится минимальной и стабилизируется.

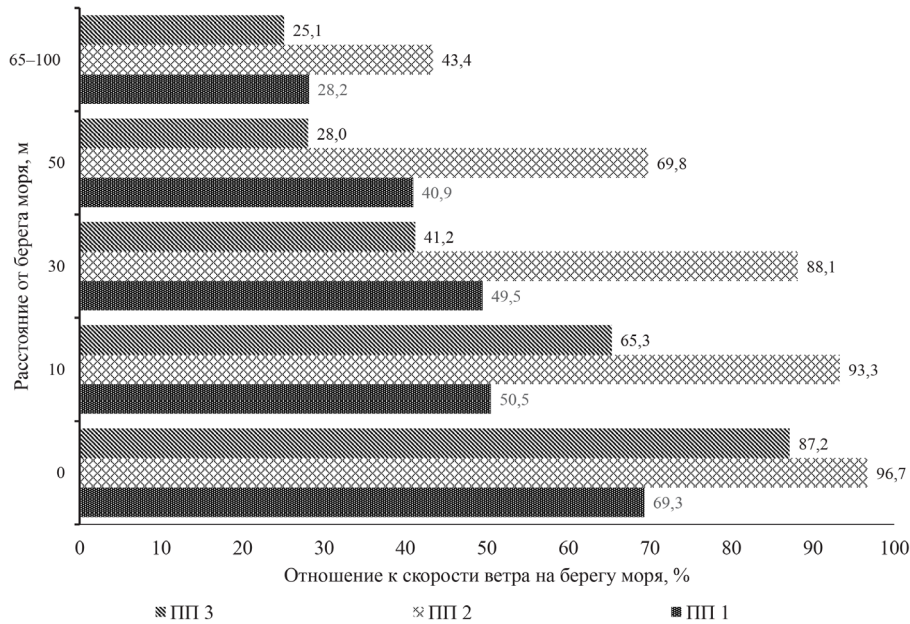
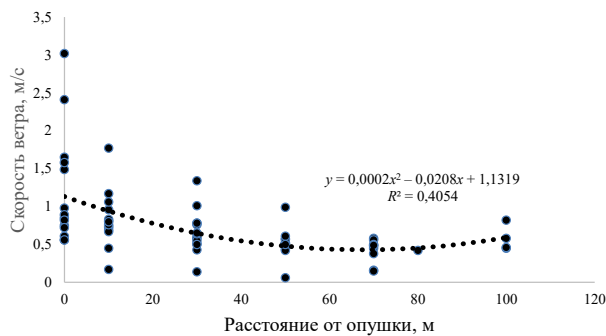


Рис. 4. Изменение скорости ветра в различных по условиям березняках по отношению к скорости ветра на берегу моря

Fig. 4. Wind speed change in birch forests of different conditions in relation to the wind speed on the seashore

Рис. 5. Изменение скорости ветра на разном расстоянии от опушки (ПП 3, точки – среднее по трансекте)

Fig. 5. Wind speed change at different distances from the forest edge (trial plot ПП 3, points – average along the transect)



Выводы

1. Скорость ветра и амплитуда ее колебаний снижаются от берега моря в глубь приморских березовых насаждений. Это изменение носит постоянный характер, но зависит от свойств береговой линии. Березовые криволесья защищают от ветра фитоценозы внутренней части острова.

2. Наибольшая скорость ветра наблюдается на мысу, несколько меньшая на открытом берегу и самая малая – в куту залива. Во всех изученных местах скорость ветра быстро снижается до минимальной, особенно на первых десятках метров березовых насаждений.

3. Березовое криволесье гасит скорость ветра до минимальной на расстоянии около 50 м от берега моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алесенков Ю.М., Андреев Г.В., Иванчиков С.В., Белов Л.А., Чермных А.И. О влиянии ветровала на соотношение диаметров и высот в длительно-производном березняке хвощово-вейниковом // Леса России и хозяйство в них. 2019. № 3(70). С. 48–58.
Alesenkov Yu.M., Andreev G.V., Ivanchikov S.V., Belov L.A., Chermnykh A.I. About Influence of Windfall to Correlation Between Diameter and Height in Long-Term Secondary Horse-Tail and Reed-Grass Birch Stand. *Forests of Russia and economy in them*, 2019, no. 3(70), pp. 48–58. (In Russ.).
2. Ахмиева Р.Б. Ветрозащитные лесные насаждения и их роль в снижении неблагоприятных климатических явлений // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч. Ч. 1. Пенза: Наука и Просвещение, 2017. С. 200–202.
Ahmieva R.B. Vetrosaschitnye Forest Plantations and Their Role in the Reduction of Adverse Climatic Phenomena. *Fundamental and Applied Scientific Research: Current Issues, Achievements and Innovations: Collection of Academic Papers of the VIII International Scientific Conference*: In 4 Parts. P. 1. Penza, Nauka i Prosveshcheniye Publ., 2017, pp. 200–202. (In Russ.).
3. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований. СПб.: Политехн. ун-т, 2016. 125 с.
Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistical Processing of Forest Research Materials*. Saint-Petersburg, SPbSTU Publ., 2016. 125 p. (In Russ.).
4. Горышина Т.К. Экология растений. М.: Высш. шк., 1979. 386 с.
Goryshina T.K. *Ecology of Plants*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 386 s. (In Russ.).
5. Гусев И.И. Таксация древостоя. Архангельск: АГТУ, 2000. 71 с.
Gusev I.I. *Valuation of a Forest Stand*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2000. 71 s. (In Russ.).
6. Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В. Соловецкий лес. Архангельск, 2005. 225 с.
Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Solovetsky Forest*. Arkhangelsk, 2005. 225 p. (In Russ.).
7. Кищенко И.Т. Лесоведение. Петрозаводск: ПетрГУ, 2010. 452 с.
Kishchenko I. *Forest Science*. Petrozavodsk, PertSU Publ., 2010. 452 p. (In Russ.).
8. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 407 с.
Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 407 p. (In Russ.).
9. Мозолева Е.Г., Катаев О.А., Соколова Э.С. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 152 с.
Mozolevskaya E.G., Katayev O.A., Sokolova E.S. *Methods of Forest Pathology Examination of Foci of Stem Pests and Forest Diseases*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 152 p. (In Russ.).
10. Незавитин А.Г., Таран И.В., Бокова Т.И., Логинов С.И., Наплекова Н.Н., Осинцева Л.А., Чемерис М.С. Экологическая роль лесов в Сибири // Вестн. НГАУ. 2015. № 3(36). С. 43–53.
Nezavitin A.G., Taran I.V., Bokova T.I., Loginov S.I., Naplekova N.N., Osintseva L.A., Chemeris M.S. Ecological Role of Forests in Siberia. *Bulletin of NSAU*, 2015, no. 3(36), pp. 43–53. (In Russ.).

11. Никитин К.Е. Методы и техника обработки лесоводственной информации. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 270 с.
Nikitin K.E., Shvidenko A.Z. *Methods and Techniques for Processing Forestry Information*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 270 p. (In Russ.).
12. Погребняк П.С. Общее лесоводство. М.: Книга по Требованию, 2012. 440 с.
Pogrebnyak P.S. *General Forest Science*. Moscow, Kniga po Trebovaniyu Publ., 2012. 440 p. (In Russ.).
13. Полевой лесотаксационный справочник / под общ. ред. С.В. Третьякова, С.В. Ярославцева, С.В. Коптева. Архангельск: САФУ, 2016. 252 с.
Field Forest Inventory Handbook. Ed. by S.V. Tretyakov, S.V. Yaroslavtsev, S.V. Koptev. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 252 p. (In Russ.).
14. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.
Natural Environment of the Solovetsky Archipelago in a Changing Climate. Ed. by Yu.G. Shvartsman, I.N. Bolotov. Yekaterinburg, UrB RAS Publ., 2007. 184 p. (In Russ.).
15. Соболев А.Н., Феклистов П.А. Изменчивость микроклимата в лесных насаждениях Соловецкого архипелага // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 245–254.
Sobolev A.N., Feklistov P.A. Microclimate Variability in Forest Stands of the Solovetsky Archipelago. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 245–254. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.245>
16. Соболев А.Н., Феклистов П.А. Изменение скорости ветра и освещенности в березовых насаждениях на морском побережье (Белое море, остров Б. Соловецкий) // Экология и природопользование: прикладные аспекты: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Аэтерна, 2018. С. 310–314.
Sobolev A.N., Feklistov P.A. Changes in Wind Speed and Illumination in Birch Stands on the Sea Coast (White Sea, B. Solovetsky island). *Ecology and Environmental Management: Applied Aspects. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Ufa, Aeterna Publ., 2018, pp. 310–314. (In Russ.).
17. 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 the Study of Forest Types*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 144 p. (In Russ.).
18. Тальман П.Н., Катаев О.А. Методы лесоэнтомологических обследований. Л.: ВЗЛТИ, 1964. 120 с.
Tal'man P.N., Katayev O.A. *Methods of Forest-Entomological Surveys*. Leningrad, VZLTI Publ., 1964. 120 p. (In Russ.).
19. Тихонов А.С. Лесоведение. 2-е изд. Калуга: ГП Облиздат, 2011. 332 с.
Tikhonov A.S. *Forest Science*. Kaluga, GP Oblizdat, 2011. 332 p. (In Russ.).
20. Феклистов П.А., Соболев А.Н. Лесные насаждения Соловецкого архипелага (структура, состояние, рост). Архангельск: САФУ, 2010. 201 с.
Feklistov P.A., Sobolev A.N. *Forest Stands of the Solovetsky Archipelago (Structure, State, Growth)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 201 p. (In Russ.).
21. Majunke C., Matz S., Müller M. Sturmschäden in Deutschlands Wäldern von 1920 bis 2007. *AFZ-DerWald*, 2008, Nr. 63, S. 380–381. (In Ger.).
22. Schweingruber F.H. *Jahrringe und Umwelt – Dendroökologie*. Birmensdorf, Switzerland, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 1993. 474 S. (In Ger.).

23. Thomasius H., Schmidt P.A. *Wald, Forstwirtschaft und Umwelt*. Bonn, Economica, 1996. 435 S. (In Ger.).

24. Thomasius H.O., Butter D. Studie zueinigen Relationen zwischen Wuchsflaeche, Zuwachs und individueller Stabilitaet von Waldbaeumen, dargestellt an der Baumart Fichte. *Beitraege f. d. Forstwirtschaft*, 1984, B. 18, H. 1, S. 25–28. (In Ger.).

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 630*165.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-101-114

Продуктивность лиственницы различного происхождения в условиях Воронежской области

Т.Е. Галдина, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3573-1570>

А.И. Чернодубов, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5395-4006>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; tatyana_galdina@mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.20 / Одобрена после рецензирования 12.01.21 / Принята к печати 16.01.21

Аннотация. Экспериментальная проверка влияния происхождения семян рода *Larix* на свойства выращенных из них деревьев была начата в прошлом столетии, а попытки вводить лиственницу в условиях лесостепи предприняты еще в 80-х гг. XIX в. Однако общей взаимосвязанной картины факторов, определяющих успешность произрастания лиственницы в условиях лесостепи, до сих пор нет. Цель исследований – выявить влияние на устойчивость и продуктивность лиственничных насаждений в условиях Центральной лесостепи Воронежской области происхождения семян. Объектом стали коллекционно-географические культуры *Larix*, заложенные в 1955 г. в 7-м квартале Животиновского лесничества Воронежского государственного лесотехнического университета. Выявлено, что не все представленные формы лиственниц можно рекомендовать для условий С₂ Центральной лесостепи Воронежской области. Отмечено, в условиях С₂ на серых лесных песчаных почвах хорошо чувствуют себя – характеризуются высокими сохранностью и продуктивностью – лиственницы сибирская, Сукачева и европейская; повышенной устойчивостью обладают лиственницы Сукачева архангельского, сибирская иркутского и красноярского происхождения, лиственница европейская из Прибалтики. Однако при введении в насаждения названных форм лиственниц следует учитывать специфичность климата региона: наличие длительных периодов засухи, приводящих к дефициту влаги. В условиях С₂ лиственница формирует поверхностную корневую систему, что в засушливый период отрицательно сказывается на росте насаждений, вызывает у деревьев стресс, приводящий к ослаблению древостоя. Особенно существенно это проявляется у экземпляров возрастом 55–65 лет. Ослабленный древостой лиственницы не может противостоять фитофагам – заселению черного соснового усача (*Monochamus galloprovincialis* (Olivier)), который способствует полному отпаду лиственничного древостоя в изучаемых условиях. Результаты исследования дают связанную картину особенностей формирования лиственничных насаждений в условиях С₂ Центральной лесостепи Воронежской области, позволяют выделить формы лиственниц, наилучшие для создания производственных участков выращивания этой культуры в Воронежской области.

Ключевые слова: лиственница, коллекционно-географические культуры, лесостепь, условия местопроизрастания, сохранность, устойчивость, продуктивность, Воронежская область

Для цитирования: Галдина Т.Е., Чернодубов А.И. Продуктивность лиственницы различного происхождения в условиях Воронежской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 101–114. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-101-114>

© Галдина Т.Е., Чернодубов А.И., 2022



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

Original article

Productivity of Larch of Different Origin in the Voronezh Region

Tatiana E. Galdina, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3573-1570>

Aleksey I. Chernodubov, Doctor of Agriculture, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5395-4006>

Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; tatyana_galdina@mail.ru

Received on October 7, 2020 / Approved after reviewing on January 12, 2021 / Accepted on January 16, 2021

Abstract. Experimental verification of the influence of *Larix* genus seeds origin on the properties of trees grown from them has been started in the last century, while attempts to introduce larch to forest-steppe were first undertaken in the 1880s. However, there is still no general interrelated pattern of the factors determining the success of larch growth in forest-steppe conditions. The research aims to reveal the effect of seed origin on the stability and productivity of larch plantations in the Central forest-steppe of the Voronezh region. The object is the *Larix* collection and geographical plantations planted in 1955 in the 7th quarter of the Zhivotinovskoe forestry of the Voronezh State Forestry University. Systematic observations of the study object showed that not all of the presented larch forms can be recommended for C₂ conditions of the Central forest-steppe of the Voronezh region. We noted that Siberian larch and Sukachev larch, as well as European larch, grow well in the C₂ conditions on gray forest sandy soils, namely, they are characterized by high preservation and productivity. Sukachev larch of Arkhangelsk origin and Siberian larch of Irkutsk and Krasnoyarsk origins, as well as European larch from the Baltic states, have an increased resistance to natural and climatic factors in the Central forest-steppe of the Voronezh region. However, when introducing the above mentioned forms of larch into plantations, one should take into account the specificity of the climate of the Central forest-steppe of the Voronezh region, which is characterized by long periods of drought, leading to a moisture deficit for the entire plant community. In the C₂ conditions, larch forms a surface root system, which in the dry period negatively affects the growth of stands and causes stress to trees, leading to weakening of the stand. This is especially significant for specimens aged 55–65 yrs. The weakened larch stand cannot resist phytophages, namely, the colonization of the black pine barbell (*Monochamus galloprovincialis* (Olivier)), which enhances the complete falling off of larch stand in the studied conditions. The research results give a related pattern of formation of larch plantations in the C₂ conditions, allow us to select the forms of larch, the best for the creation of production plots of this species in the Voronezh region.

Keywords: larch, collection and geographical plantations, forest steppe, habitat conditions, preservation, stability, productivity, Voronezh region

For citation: Galdina T.E., Chernodubov A.I. Productivity of Larch of Different Origin in the Voronezh Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 101–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-101-114>

Введение

Экспериментальная проверка влияния происхождения семян на рост культур была начата в 20–30 гг. прошлого столетия. Из результатов многолетних исследований, проведенных как у нас в стране, так и за рубежом, следует,



что происхождение семян значительно отражается на росте и продуктивности будущего насаждения [1, 6, 22].

Часто при исследованиях географической изменчивости вида растения анализировали один признак (иногда несколько) и делали выводы только относительно его. Однако любое изменение одного признака тесно связано с изменением всех других. Поэтому делать выводы о географической изменчивости признака следует не только как отдельно взятого, но и на фоне популяционной изменчивости вида. На межпопуляционном уровне некоторые морфологические признаки, не имеющие адаптивного или хозяйственно-экономического значения, как правило, связаны с ценными и могут быть маркерами лучших для лесоводства провениенций [1, 4, 5, 9, 21, 22].

В настоящее время при изучении географической изменчивости вида все большее внимание стало уделяться таким показателям, как устойчивость к антропогенным факторам, качество ствола, древесины и др. Многими авторами отмечается, что продуктивность насаждения характеризуется наименее наследуемыми показателями, и, соответственно, является наименее подходящим для оценки географической изменчивости вида признаком. Так, например, в Финляндии и Швеции при изучении географической изменчивости в культурах приоритетными признаками считаются устойчивость древостоя, качество древесины и ствола.

Одной из пород, привлекающих внимание лесоводов как быстрорастущая, устойчивая и декоративная, обладающая высокими физико-механическими свойствами древесины, является лиственница [3, 7–10, 13, 14, 17–19]. Род *Larix* отличается широким географическим распространением. Доля представителей этого рода в растительном покрове Сибири, Дальнего Востока и Северной Америки значительна. Вид имеет ценную древесину, высокие показатели роста, устойчив к многим биотическим и абиотическим факторам, характеризуется хорошей межвидовой скрещиваемостью с частым эффектом гетерозиса, полиморфизмом биологических и экологических свойств [8, 11, 12, 14].

Опыт интродукции показал, что во многих случаях темпы роста лиственницы более высокие по сравнению с другими хвойными только в первые десятилетия и в определенных экологических условиях. Выявлена значительная дифференциация культур лиственницы по показателям роста и устойчивости в зависимости от видовой принадлежности и происхождения материнских насаждений.

Согласно многолетнему опыту отечественных лесоводов, в условиях лесостепи и степи европейской части России наиболее продуктивным лесообразователем при создании промышленных, защитных, водоохранных и парниковых лесов является лиственница сибирская. Она не произрастает здесь естественно, но введенная искусственно растет прекрасно. Лиственница, имеющая естественный ареал в горах и в условиях континентального климата, очень требовательна к аэрации воздуха, влажности и в период вегетации нуждается в теплой погоде. Однако при перенесении из естественных суровых условий континентального климата в более мягкие условия зоны смешанных лесов и лесостепи устойчивость лиственницы, продуктивность ее насаждений повышаются на 25–45 %. В зоне лесостепи лиственничные насаждения превосходят по качеству ствола и древесины, по продуктивности местные древесные породы (сосну, дуб и т. д.).

Опыт искусственного выращивания лиственницы в разных регионах страны и за рубежом показывает, что лиственница отличается высокой приспособляемостью к новой экологической обстановке. Возникшие под влиянием условий произрастания изменения наследуются потомством [10, 15, 16, 20].

Адаптация видов к изменению условий произрастания зависит от множества факторов: климата, гидрологического режима, почвенного плодородия, соответствия места интродукции естественному ареалу, качества семенного материала, особенностей генотипа популяций, климатического типа и отдельной особи и т. п.

Цель исследования – определение степени влияния происхождения семян на устойчивость и продуктивность лиственничных насаждений. Задачи – выявить особенности произрастания различных форм лиственниц, интродуцированных в Центральную лесостепь Воронежской области, и взаимосвязь места происхождения семян и условий новой территории произрастания.

Объекты и методы исследования

Объектом нашего исследования стал научно-экспериментальный участок коллекционно-географических культур лиственниц возрастом 64 года, заложенный в 7-м квартале Животиновского лесничества Воронежского государственного лесотехнического университета.

В 1955 г. на территории площадью 7 га было заложено 170 испытательных участков по 0,04 га. Каждый участок представлен различными географическими и почвенными экотипами и множеством форм лиственницы. Испытывались 113 происхождений лиственницы Гмелина, сибирской, Сукачева, европейской, Даурской и 57 полусибсов лиственницы сибирской из Хакасии, представляющих деревья неодинаковых морфологических форм из 3 лесхозов разных высотных зон и типов леса. Коллекционно-географические культуры заложены 2-летними сеянцами с размещением 1,5×0,5 м. Ранее участок находился под дубовым древостоем, который в 1944 г. вырубил, а потом раскорчевали. В 1954 г. земли были заняты огородами, затем вспаханы на глубину 30 см. Почвы серые лесные. Тип условий местопроизрастания – С₂.

На отобранных объектах с 1959 по 2019 г. выполняли систематические наблюдения, взятие образцов. Определяли сохранность, продуктивность, качество ствола и древесины, репродуктивную способность различных форм лиственницы [4, 5]. В 2007 г. (возраст культур – 52 года) нами также установлены сохранность, продуктивность, качество ствола и древесины.

На момент обследования (2019 г.) сохранилось 85 испытательных участков (16 экотипов лиственниц), на которых мы провели сплошной пересчет деревьев с распределением по ступеням толщины. Для измерения диаметров ствола на высоте груди использовали мерную вилку, для измерения высот – высотомер. В целях изучения закономерности прироста по диаметру отбирали модельные деревья, имеющие средние показатели высоты и диаметра. По спилам с модельных деревьев получали хронологические данные для построения графиков.

Результаты натурных обследований обрабатывали с использованием программ Excel и StatSoft Statistica 6.0. Вычислены основные статистические характеристики: среднее арифметическое (M), ошибка среднего арифметического (m).

Результаты исследования и их обсуждение

Лиственницы сибирская и Сукачева обладают явно выраженной климатической географической изменчивостью. Северные климатотипы имеют самый короткий период вегетации – 34 дня. Лиственница сибирская с Алтая (49° с. ш., 1600–1800 м над ур. м.) плохо приживается на супесчаных почвах в условиях С₂. В 2019 г. ее сохранность была близка к нулю, т. е. экспериментальные культуры в условиях Воронежской области погибли.

Лиственница Сукачева в коллекции представлена экземплярами, посадочным материалом для которых послужили семена из естественных древостоев Архангельской, Пермской, Свердловской и Челябинской областей, а также из культур Тверской, Ивановской, Костромской областей и Прибалтики (рис. 1).



Рис. 1. Лиственница на объекте 2019 г.: *a* – Сукачева (Прибалтика); *б* – Сукачева (Ивановская и Тверская области); *в* – сибирская (Хакассия, горно-степной район); *z* – сибирская (Иркутская область, 56–59°); *д* – сибирская (Тува)

Fig. 1. Larch at the 2019 site: *a* – Sukachev larch (Baltic region); *б* – Sukachev larch (Ivanovo and Tver regions); *в* – Siberian (Khakassia, mountain-steppe area); *z* – Siberian (Irkutsk region, 56–59°); *д* – Siberian (Tuva Republic)

Сибирская лиственница в составе коллекции представлена образцами из юго-восточной части ареала (49–59° с. ш. 110° в. д.), включая Красноярский край, Иркутскую область, Республики Бурятию и Хакассию, Восточно-Казахстанскую

область (Казахстан, Алтайский горный район) (рис. 1). Районы заготовки семян объединены в 2 района – восточный и западный, в пределах которых они распределены по широтным поясам.

Даурская и европейская лиственницы встречаются среди экземпляров коллекции сравнительно редко.

Анализируя рост лиственницы по диаметру (табл. 1, рис. 2), следует отметить, что в условиях С₂ Центральной лесостепи хорошо растет лиственница европейская. Она характеризуется наибольшим радиальным приростом по диаметру на протяжении всего периода развития. На 2-м месте после нее по этому показателю стоят лиственница сибирская из Иркутской области (52–54°), лиственница Сукачева из Прибалтики и Челябинской области. Наименьший радиальный прирост имеют лиственницы сибирская из Красноярского края и Сукачева из Свердловской области. Лиственница Гмелина оказалась совершенно не приспособлена для условий Центрально-Черноземного района. Ее культуры на песчаных почвах погибли от засухи в 1959 г.

Таблица 1

Таксационная характеристика коллекционно-географических культур лиственницы в условиях лесостепи (2019 г.)
Inventory characteristics of larch collection and geographical plantations growing in forest-steppe conditions (2019)

№ п/п	Происхождение	Координаты, ° с. ш.	Диаметр, см				Средняя высота, м	Запас, м ³ /га
			min	max	M	±m		
<i>Лиственница сибирская</i>								
1	Иркутская область	56–59	10	29	18	0,7	20,4	363
2		54–56	11	28	18	0,5	20,3	380
3	Алтайский край	49	–	–	–	–	–	–
4	Республика Хакассия	53–55	11	27	19	0,6	22,8	437
5	Республика Тува	51–52	11	34	21	1,1	22,7	403
6	Красноярский край	55–56	10	32	18	0,6	20,7	420
7	Иркутская область	52–54	9	27	18	0,4	21,5	361
8	Республика Хакассия (горно-степной район)	52–53	13	31	21	1,1	20,7	421
9	Республика Хакассия (горно-травяной район)	54–56	11	26	19	0,8	20,6	366
10	Республика Хакассия (травяной район)	51–52	8	29	19	0,6	21,8	429
<i>Лиственница Сукачева</i>								
1	Архангельская область	61–64	11	31	19	0,9	21,3	401
2	Свердловская область	58–59	9	34	18	0,5	20,6	409
3	Ивановская и Тверская области	57–58	11	43	19	0,8	21,8	462
4	Прибалтика	57–59	10	38	21	0,9	22,5	505
5	Челябинская область	55	10	29	21	0,9	22,5	461
<i>Лиственница европейская</i>								
1	Прибалтика	57	8	43	21	0,7	21,3	557
<i>Лиственница Даурская</i>								
1	Республика Бурятия	48	0	0	0	0	0	0

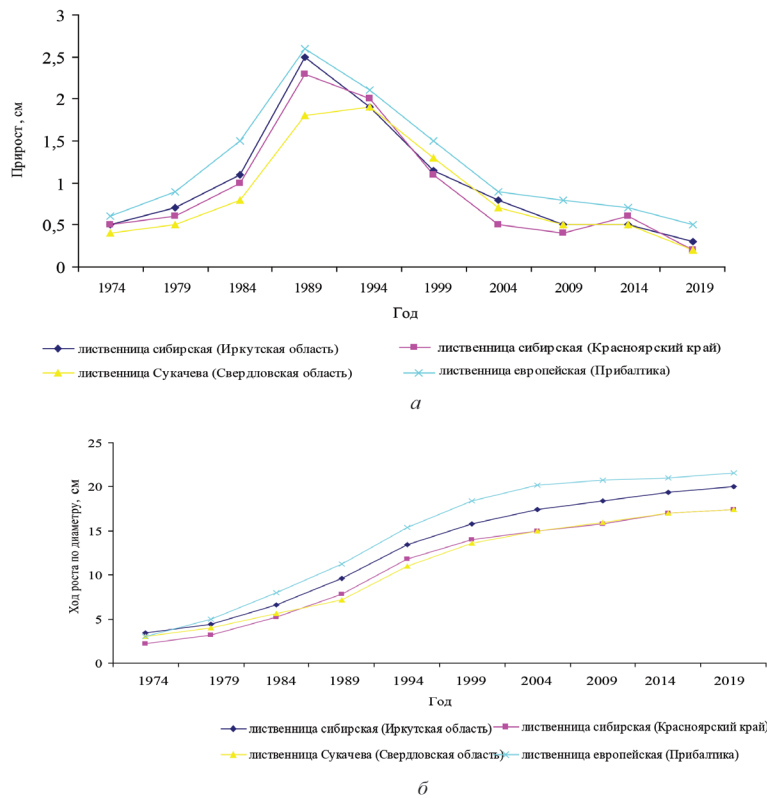


Рис. 2. Радиальный прирост (а) и ход роста по диаметру (б) лиственниц различного происхождения в условиях Центральной лесостепи (2019 г.)

Fig. 2. Radial increment (a) and yield in diameter (b) of larch trees of various origin in the Central forest-steppe (2019)

В табл. 2 представлена общая картина влияния происхождения семян лиственницы на устойчивость насаждений в условиях C_2 Центральной лесостепи в течение последних 12 лет.

В 2007 г. лиственница сибирская из Хакассии, Иркутской области ($54-56^\circ$) и Красноярского края характеризовалась лучшей сохранностью (13–14 %), наихудшую имела лиственница сибирская алтайского происхождения – 6 %. Лучшие по сохранности образцы лиственницы Сукачева получены из Прибалтики и Челябинской области: сохранность – 12 %, а худшие – из Архангельской области (8 %).

Меняющиеся условия среды и возрастные изменения древесных пород являются при интродукции важными факторами роста и устойчивости дерева.

Рис. 3 позволяет проследить зависимость устойчивости культур лиственницы к условиям произрастания от видовой принадлежности и происхождения семян: на одни и те же природно-климатические проявления лиственница реагирует по-разному. Рис. 4 показывает, что более устойчивы к условиям C_2 Центральной лесостепи Воронежской области за последний 12-летний период оказались лиственницы сибирская из Иркутской области ($52-54^\circ$) и Хакассии, Сукачева из Архангельской, Ивановской и Тверской областей. Совершенно не устойчивы к условиям произрастания изучаемой территории лиственницы сибирская с Алтая и Даурская.

Таблица 2

**Динамика изменения сохранности культур лиственницы в условиях
Центральной лесостепи Воронежской области в 2007–2019 гг.
Preservation change dynamics of larch plantations in the Central forest-steppe
of the Voronezh region in 2007–2019**

№ п/п	Происхож- дение	2007				2019			
		Со- хран- ность, %	Количество стволов			Со- хран- ность, %	Количество стволов		
			все- го, шт.	здоро- вые, шт./%	повре- жден- ные, шт./%		все- го, шт.	здоро- вые, шт./%	повре- жден- ные, шт./%
<i>Лиственница сибирская</i>									
1	Иркутская область	9	1200	1200/100	–	5	625	600/96	25/4
2		13	1214	1214/100	–	7	975	925/95	50/5
3	Алтайский край	6	775	400/52	375/48	0	0	–	–
4	Республика Хакассия	13	1220	1220/100	–	6	750	385/53	350/47
5	Республи- ка Тува	10	1000	1000/100	–	5	625	250/40	375/60
6	Краснояр- ский край	14	1300	1275/98	25/2	8	1025	675/66	350/34
7	Иркутская область	13	1271	1246/98	25/2	8	1075	825/77	250/23
8	Республика Хакассия (горно-степ- ной район)	11	1050	1050/100	–	5	725	650/90	75/10
9	Респу- блика Хакассия (горно- травяной район)	1	110	110/100			98	98/100	–
10	Респу- блика Хакассия (травяной)	11	1400	1400/100			685	635/93	50/7
<i>Лиственница Сукачева</i>									
1	Архангель- ская область	8	1125	1075/96			750	550/73	200/27

Окончание табл. 2

№ п/п	Происхождение	2007				2019			
		Сохранность, %	Количество стволов			Сохранность, %	Количество стволов		
			все-го, шт.	здоровые, шт./%	поврежденные, шт./%		все-го, шт.	здоровые, шт./%	поврежденные, шт./%
2	Свердловская область	14	1386	1311/95	75	6	850	645/79	175/21
3	Ивановская и Тверская области	10	1275	1200/94	75	7	925	675/73	250/27
4	Прибалтика	12	1120	1095/98	25	6	800	600/75	200/25
5	Челябинская область	12	1133	1058/93	75	7	885	650/75	225/25
<i>Лиственница европейская</i>									
1	Прибалтика	14	1371	–	–	8	1115	940/84	175/16
<i>Лиственница Даурская</i>									
1	Республика Бурятия	2	217	217/100	–	0	0	–	–

Примечание: Поврежденные – стволы лиственницы повреждены черным сосновым усачом (*Monochamus galloprovincialis* (Olivier)).

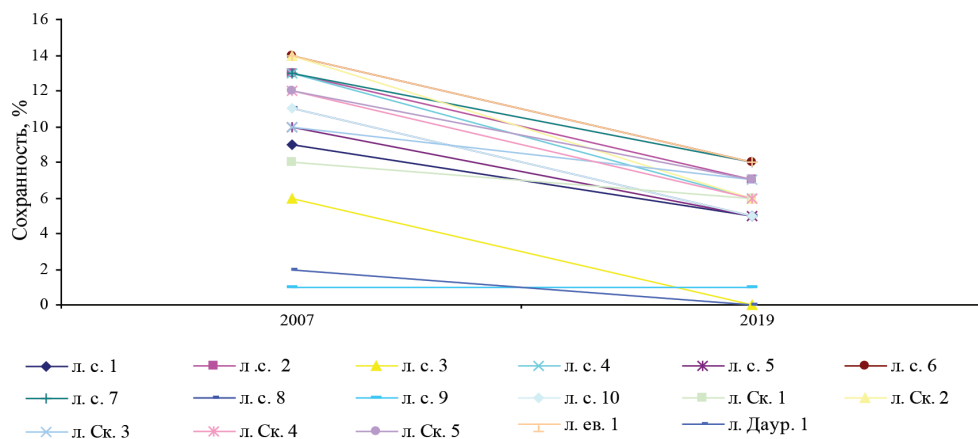


Рис. 3. Влияние происхождения семян на сохранность лиственницы в коллекционно-географических культурах с 2007 по 2019 г.: л. с., л. Ск., л. ев., л. Даур. – лиственницы сибирская, Сукачева, европейская и Даурская соответственно (номер соответствует номеру в табл. 1)

Fig. 3. Influence of seed origin on larch persistence in collection and geographical plantations from 2007 to 2019: л. с., л. Ск., л. ев., л. Даур. – Siberian larch, European larch and Dahurian larch, respectively (number corresponds to the number in table 1)

На диаграмме (рис. 4) также видна сильная реакция на природно-климатические условия С₂ Центральной лесостепи лиственницы сибирской из Хакассии (горно-степной и травяной районы). Ответ на воздействие природно-климатического фактора лиственницы Сукачева из Архангельской, Ивановской и Тверской областей более сдержан, что говорит о большей адаптированности деревьев этих происхождений к условиям произрастания.

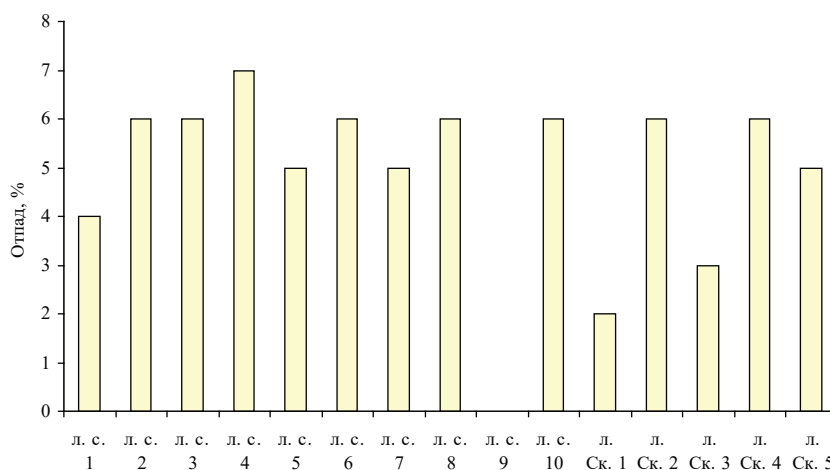


Рис. 4. Динамика отпада лиственницы в коллекционно-географических культурах с 2007 по 2019 г.

Fig. 4. Dynamics of larch falling off in collection and geographical plantations from 2007 to 2019

За последние 12 лет значительный отпад (40–60 %) отмечен в потомстве лиственницы сибирской иркутских (54–56°, 56–59°) климатипов, а также в потомстве лиственницы Сукачева из Прибалтики и Челябинска (до уровня сохранности 6–7 %), лиственницы европейской из Прибалтики (сохранность в настоящее время не превышает 8 %), что определяется не столько географическим происхождением семян, сколько сочетанием факторов – отсутствием осадков в результате засух 2010, 2014, 2017 и 2018 гг. и особенностями почвенного плодородия. Как отмечают П.Д. Андрианов и др., недостаточная обеспеченность почв подвижными формами фосфора и калия при повышенном содержании азота (что имеет место на объекте) в годы засухи приводит к сдерживанию процессов роста и развития лесных сообществ [2].

На рис. 4 отражено, насколько снизилась за 12-летний период (2007–2019 гг.) сохранность потомства лиственниц различного происхождения, произрастающих в условиях С₂ Центральной лесостепи. Уменьшение данного показателя объясняется тем, что в районах с резко континентальным климатом систематически бывают периоды дефицита влаги. Все древесные породы страдают от недостатка воды. Высоко требовательные к влажности лиственничные насаждения, большое количество корней которых обычно сконцентрировано в верхних слоях почв, особенно чувствительны к дефициту влаги.

Дефицит атмосферных осадков влечет за собой и резкое понижение грунтовых вод. Это отрицательно сказывается на жизнедеятельности лиственничных насаждений. На обследуемом объекте остро проявляется влияние недостатка влаги: уровень грунтовых вод, который на участке при благоприятных условиях залегает на глубине 1,0–1,5 м, в засушливый период резко падает

(от 4,0–6,0 м), вызывая сильнейший стресс у лиственницы. Следствием таких воздействий природно-климатических и почвенно-грунтовых условий является ослабление древостоя.

Ослабленный древостой не способен противостоять воздействию антропогенных факторов. Наблюдаются сильный отпад в период засухи и массовое заражение энтомо вредителями. Коллекционно-географические культуры лиственницы на момент обследования (2019 г.) были сильно заселены черным сосновым усачом, который еще больше повреждал насаждение, уже пострадавшее от засух (рис. 5).



Рис. 5. Повреждение лиственницы на опытном объекте черным сосновым усачом

Fig. 5. Larch damage at the experimental site by the black pine barbel

Степень повреждения лиственничных коллекционно-географических культур черным сосновым усачом в зависимости от формовой принадлежности и географического происхождения семенного материала оказалась очень контрастной. Сильно поврежденной была лиственница сибирская из Республик Хакассии и Тувы, Красноярского края, Иркутской области (52–54° с. ш.). Как более устойчивая к энтомо вредителям показала себя лиственница сибирская из Иркутской области (54–59° с. ш.), Хакассии (горно-степной и травяной районы) – 4–7 % поврежденных черным сосновым усачом деревьев. Промежуточное положение по степени уязвленности вредителем имели лиственницы Сукачева и европейская из Прибалтики – 16–27 % поврежденных экземпляров.

Таким образом, исследования коллекционно-географических культур лиственницы, произрастающей в Центральной лесостепи Воронежской области в условиях C_2 , позволили выделить ряд факторов, которые определяют рост и продуктивность вида в месте интродукции. К таким факторам относятся:

погодные условия в зимний период и период вегетации, на которые неодинаково реагируют культуры разного происхождения;

продолжительность периода вегетации, зависящая от принадлежности к подвиду и происхождения;

тип почв (условия C_2) – его влияние увеличивается с возрастом культур лиственницы;

наследственные особенности роста и устойчивости, обусловленные происхождением, различно реагируют на изменения среды, а именно гидротермического коэффициента;

густота посадки – от нее зависит устойчивость насаждения к природно-климатическим условиям в возрастной динамике.

Заключение

При введении в насаждения Центральной лесостепи Воронежской области лиственницы следует учитывать условия местопроизрастания, в которых будут создаваться лиственничные насаждения. Абсолютно не рекомендуется формировать лиственничные насаждения в Центральной лесостепи Воронежской области в условиях C_2 , так как в возрасте 55–65 лет наблюдается сильнейшее ослабление древостоя, связанное с биологическими особенностями испытываемых форм. Однако можно выделить наиболее устойчивые формы для создания производственных участков выращивания этой культуры в регионе: лиственница сибирская из Республики Хакасии (горно-степной и травяной районы) и Красноярского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абаимов А.П., Милютин Л.И., Адрианова И.Ю., Артюкова Е.В., Ефремов С.П. Биоразнообразие лиственниц Азиатской России / отв. ред. С.П. Ефремов, Л.И. Милютин; Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Новосибирск: Гео, 2010. 159 с.

Abaimov A.P., Milyutin L.I., Adrianova I.Yu., Artyukova E.V., Efremov S.P. *Biodiversity of Larches of Asian Russia*. Ed. by S.P. Efremov, L.I. Milyutin. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 159 p. (In Russ.).

2. Андрианов П.Д., Камалов Р.Г., Сабирзянов И.Г., Ситдииков Р.Г. Географические культуры лиственницы в учебно-опытном лесхозе Башкирского государственного аграрного университета. М.: МГУЛ, 2003. 38 с.

Andrianov P.D., Kamalov R.G., Sabirzyanov I.G., Sitdikov R.G. *Larch Provenance Trial Plantations in the Educational and Experimental Forestry of the Bashkir State Agrarian University*. Moscow, MGUL Publ., 2003. 38 p.

3. Глазунов Ю.Б., Мерзленко М.Д., Лобова С.Л. Результат 60-летнего опыта уникальных географических посадок лиственницы // Уч. зап. ПетрГУ. 2017. № 8(169). С. 44–48.

Glazunov Yu.B., Merzlenko M.D., Lobova S.L. Results of the 60-Years Experience of Unique Geographical Larch Plantings. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2017, no. 8(169), pp. 44–48. (In Russ.).

4. Дерюжкин Р.И. Результаты изучения географических культур лиственницы в Воронежской области // Вопросы повышения интенсивности лесного хозяйства: науч. тр. Воронеж. лесотехн. ин-та. 1969. Т. XXXII, вып. 3. С. 38–52.

Deryuzhkin R.I. The Results of Studying Larch Provenance Trial Plantations in the Voronezh Region. *Voprosy povysheniya intensivnosti lesnogo khozyaystva: nauchnyye trudy Voronezhskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1969, vol. 32, iss. 3, pp. 38–52. (In Russ.).

5. Дерюжкин Р.И. Результаты изучения опытных культур лиственницы Хакасского происхождения в Воронежской области // Тр. Воронеж. лесотехн. ин-та. 1971. Т. XXXIII. С. 80–82.

Deryuzhkin R.I. The Results of Studying Larch Experimental Plantations of Khakass Origin in the Voronezh Region. *Trudy Voronezhskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1971, vol. 33, pp. 80–82. (In Russ.).

6. Дылис Н.В. Сибирская лиственница: материалы к систематике, географии и истории. М.: Моск. о-во испытателей природы, 1947. 138 с.

Dylis N.V. *Siberian Larch: Materials on Systematics, Geography and History*. Moscow, MOIP Publ., 1947. 138 p. (In Russ.).

7. Дылис Н.В. Лиственница. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 96 с.

Dylis N.V. *Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 96 p. (In Russ.).

8. Кашин В.И., Козобродов А.С. Лиственничные леса Европейского Севера России. Архангельск: Арханг. фил. Рус. геогр. о-ва РАН, 1994. 220 с.

Kashin V.I., Kozobrodov A.S. *Larch Forests of the European North of Russia*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Branch RGS RAS PUBL., 1994. 220 p. (In Russ.).

9. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae* на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.

Mamayev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (Case Study of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).

10. Мельник П.Г., Карасев Н.Н. Географическая изменчивость лиственницы в фазе приспевания // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 1(84). С. 60–74.

Melnik P.G., Karasev N.N. Geographic Variation of Larch at the Premature Stage. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 1(84), pp. 60–74. (In Russ.).

11. Милютин Л.И., Муратова Е.Н., Ларионова А.Я. Генетико-таксономический анализ популяций лиственниц сибирской и Сукачевы // Лесоведение. 1993. № 5. С. 55–63.

Milyutin L.I., Muratova E.N., Larionova A.Ya. Genetic and Valuation Analysis of Siberian and Sukachev Larch Populations. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1993, no. 5, pp. 55–63. (In Russ.).

12. Орнатский А.Н. Обогащение лесных ресурсов Республики Мордовия посредством интродукции лиственницы сибирской: дис. ... канд. биол. наук. Йошкар-Ола, 2002. 223 с.

Ornatskiy A.N. *Enrichment of Forest Resources of the Republic of Mordovia Through the Introduction of Siberian Larch*: Cand. Biol. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 2002. 223 p. (In Russ.).

13. Погиба С.П., Казанцева Е.В. Методы биометрического анализа в лесной селекции и генетике. М.: МГУЛ, 2014. 45 с.

Pogiba S.P., Kazantseva E.V. *Methods of Biometric Analysis in Forest Breeding and Genetics*. Moscow, MGUL Publ., 2014. 45 p. (In Russ.).

14. Рысин Л.П. Лиственничные леса России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 343 с.

Rysin L.P. *Larch Forests of Russia*. Moscow, KMK Publ., 2010. 343 p. (In Russ.).

15. Тимофеев В.П. Влияние географического происхождения семян на рост лиственницы в культурах // Лесоведение. 1969. № 3. С. 17–29.

Timofeyev V.P. Influence of Seed Geographical Origin on Growth of Larch Plantations. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1969, no. 3, pp. 17–29. (In Russ.).

16. Тихонов П.Р., Наквасина Е.Н. Внутривидовая изменчивость лиственницы Сукачевы (*Larix sukaczowii* Dyl.) по габитуальным признакам в естественных насаждениях Архангельской области // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Естеств. и точн. науки. 2005. Вып. 2. С. 29–35.

Tikhonov P.R., Nakvasina E.N. Intraspecific Variability of Sukachev Larch (*Larix sukaczowii* Dyl.) by Habitual Characteristics in Natural Plantings of the Arkhangelsk Re-

gion. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Ser.: Estestvennyye i tochnyye nauki*, 2005, iss. 2, pp. 29–35. (In Russ.).

17. Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata K. Seed Collection and Seed Quality of *Larix* spp. from Russia: Initial Phase on the Russia-Scandinavian Larch Project. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 4, pp. 39–49.

18. Burleigh J.G., Barbazuk W.B., Davis J.M., Morse A.M., Soltis P.S. Exploring Diversification and Genome Size Evolution in Extant Gymnosperms through Phylogenetic Synthesis. *Journal of Botany*, 2012, vol. 2012, art. 292857. <https://doi.org/10.1155/2012/292857>

19. Fedorkov A. Stem Growth and Quality of Six Provenances of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* Ledeb. in a Field Trial Located in North-West Russia. *Baltic Forestry*, 2017, vol. 23, no. 3(46), pp. 603–607.

20. Frydl J., Sindelar J. Provenance Plots with European Larch (*Larix decidua* Mill.) of the IUFRO Series 1958/59 at the Age of 38 Years in the Czech Republic (CR). *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*, 2003, vol. 20, pp. 5–36.

21. Kulej M. Adaptation of Larch (*Larix decidua*) of Polish Provenances Under Mountainous Conditions of Beskid Sądecki (Southern Poland). *Journal of Forest Science*, 2004, vol. 50(12), pp. 559–565. <https://doi.org/10.17221/4657-JFS>

22. Schober R., Frölich H.J. *Der Garenberger Lärchenprovenienzversuch. Eine biologisch-ertragskundliche Untersuchung und metodische Studie*. Frankfurt am Main, 1967. 208 S. (In Ger.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*181.7:630*231.332:630*174.7.754

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-115-126

Влияние удобрений на суточный рост сосны на торфяно-болотных почвах

Л.В. Зарубина, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAG-8579-2021](https://orcid.org/0000-0003-3834-0521),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3834-0521>

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2. с. Молочное, г. Вологда, Вологодская обл., Россия, 160555; liliya270975@yandex.ru


Поступила в редакцию 28.09.20 / Одобрена после рецензирования 20.12.20 / Принята к печати 12.01.21

Аннотация. Цель исследования – выявление влияния азота на суточный рост и интенсивность физиологических процессов у сосны. Работы проводились в 2017–2018 гг. в северотаежной зоне Архангельской области. Опытным объектом служил 33-летний кустарничково-сфагновый сосняк (64°45' с. ш.), сформировавшийся из подроста сосны после вырубki материнского древостоя. Установлено, что на Севере в сфагновых лесорастительных условиях рост сосны в высоту имеет максимальную скорость в вечерние (сумеречные) и ночные часы. Наибольшая интенсивность физиологических процессов отмечается в светлое время суток: в результате повышенного фотосинтеза дерево получает необходимые для нормального роста энергопластические вещества. В отличие от лишайниковых сосняков, в которых корни не подвержены действию заболачивания, в избыточно увлажненных кустарничково-сфагновых сосняках сосна растет значительно медленнее и в течение суток имеет менее выраженную, чем в сосняках лишайниковых, интенсивность физиологических процессов. Низкая скорость роста и физиологических процессов у сосны в кустарничково-сфагновом сосняке обусловлена нарушением работы ее корневой системы в результате корневого анаэробнозиса, вызываемого затоплением. Постоянная избыточная влажность почвы и, как следствие, ее пониженная аэрация, подавляя поглотительную деятельность и синтетические процессы корней, снижают эффективное действие азота на рост сосны в этих условиях. Вносимые в кустарничково-сфагновые сосняки азотные удобрения в целом позитивно влияют на ростовые и физиологические процессы сосны, однако значительно слабее, чем в сухих лишайниковых борах. Под действием дозы N_{180} у сосны на 30 % усиливается суточный рост в высоту, существенно возрастает интенсивность фотосинтеза, в результате сокращения расхода воды на транспирацию нормализуется водный режим и повышается продуктивность транспирации. Эти позитивные изменения в ростовых и обменных процессах, происходящие под действием вносимых в древостой азотных удобрений, улучшают функциональную деятельность сосны и повышают (в случае дополнительного осушения) продуктивность избыточно увлажненных кустарничково-сфагновых сосняков.

Ключевые слова: сосняк кустарничково-сфагновый, сосна обыкновенная, суточный рост, физиологические процессы, уровень почвенно-грунтовых вод, азот, влияние удобрений

Для цитирования: Зарубина Л.В. Влияние удобрений на суточный рост сосны на торфяно-болотных почвах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 115–126. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-115-126>

© Зарубина Л.В., 2022

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

Original article

Daily Pine Growth on Highmoor Peat Soil under the Influence of Fertilizers

Liliya V. Zarubina, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAG-8579-2021](https://orcid.org/0000-0003-3834-0521),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3834-0521>

Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Schmidta, 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; liliya270975@yandex.ru

Received on September 28, 2020 / Approved after reviewing on December 20, 2020 / Accepted on January 12, 2021

Abstract. The research aims at identifying the effect of nitrogen on daily growth and intensity of physiological processes in pine trees. The research was carried out in 2017–2018 in the north taiga zone of the Arkhangelsk region. A 33-year-old shrub-sphagnum pine forest (64° 45' N), formed of pine undergrowth after felling of a parent stand, served as an experimental object. It was found that in the North in the sphagnum forest site conditions, pine growth in height has a maximum rate in the evening (dusky) and night hours. The highest intensity of physiological processes in pine trees is observed in the daylight hours. As a result of increased photosynthesis, the tree receives the macronutrients necessary for normal growth. Unlike lichen pine forests, in which the roots are not affected by waterlogging, in excessively moistened shrub-sphagnum pine forests pine trees grow much slower and during the day have a less evident intensity of physiological processes than in lichen pine forests. The low growth rate and slow physiological processes of pine in shrub-sphagnum pine forest are due to the disturbance of its root system as a result of root anaerobiosis caused by flooding. Constant excessive soil humidity and, as a consequence, its reduced aeration, reduce the effective action of nitrogen on the growth of pine trees in these conditions, and at the same time inhibit the absorptive activity and synthetic processes of the roots. Nitrogen fertilizers applied to shrub-sphagnum pine forests have a generally positive effect on the growth and physiological processes of pine trees, but act much weaker than in dry lichen pine forests. Under the influence of the nitrogen dose N_{180} pine trees have a 30 % increase in daily growth in height, the intensity of photosynthesis increases significantly, and as a result of reduced water consumption for transpiration, the water regime is normalized and transpiration productivity increases. These positive changes in growth and metabolic processes, occurring under the influence of nitrogen fertilizers introduced into the stands, improve the functional activity of pine and increase (in the case of additional drainage) the productivity of excessively moistened shrub-sphagnum pine forests.

Keywords: shrub-sphagnum pine forest, Scots pine, daily growth, physiological processes, water table, nitrogen, impact of fertilizers

For citation: Zarubina L.V. Daily Pine Growth on Highmoor Peat Soil under the Influence of Fertilizers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 115–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-115-126>

Введение

Леса Севера имеют экологическую и хозяйственную ценность, являются национальным богатством страны, важнейшим фактором природной среды, активно участвующим в биохимическом круговороте веществ. Известны их высокая заболоченность, бедность минеральными элементами, особенно подвижными формами [16, 17]. Согласно данным Архангельского лесоустроитель-



ного предприятия, в составе эксплуатационного фонда Архангельской области на долю лесов на гидроморфных почвах с участием сосны приходится 2/3 от общей площади лесов региона [16].

Происходящие в затопленной почве анаэробные процессы, изменяя газовый и питательный режим корнеобитаемой среды, нарушают синтетическую и поглотительную деятельность корней растений, взаимосвязи между побегами и корневой системой, вызывают торможение роста корней по отношению к росту надземных органов, скорости физиологических и ростовых процессов. У относительно приспособляющихся растений, произрастающих на затопленной почве, формируются признаки, обуславливающие определенную устойчивость к данным условиям [3, 9, 24]. В целях повышения продуктивности лесов во многих странах мира широко используется химическая и осушительная мелиорация [9, 10, 15]. В условиях затопленных почв наряду с наблюдением за ростовой активностью особую научную и практическую значимость приобретает изучение у древесных растений суточных и сезонных ритмов физиологической деятельности. Рассмотрением данного вопроса занимался ряд отечественных и зарубежных ученых [8, 10, 21]. Однако по обширному северному региону сведений о характере влияния удобрений на ростовые процессы сосны, произрастающей на затопленной почве, в научной литературе нет.

Цель исследования – изучение влияния азота на суточный рост и ход физиологических процессов у сосны в условиях затопления.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в 2017–2018 гг. в северотаежной зоне Архангельской области (64°45' с. ш.). Опытным объектом служил 33-летний кустарничково-сфагновый сосняк, сформировавшийся из подроста сосны после вырубки материнского древостоя. Опытный объект занимает значительную часть бывшего экспериментального участка «Опытное поле» академика И.С. Мелехова и относится к гидроморфному экологическому ряду лесов с избыточным увлажнением. В 1947 г. на участке ручным способом был вырыт одиночный осушительный канал, который давно разрушен, захламлен упавшими деревьями и не работает, движение воды в нем отсутствует.

Живой напочвенный покров участка мозаичный. Редкие мочажины перемежаются с бугристыми участками, занятыми моховой растительностью, синузиями багульника болотного (*Ledum palustre*), кассандры (*Chamaedaphne calyculata*), подбела обыкновенного (*Andromeda polifolia*), морошки (*Rubus chamaemorus*). Породный состав насаждения 10С, густота – около 2,0 тыс. экз./га, средняя высота сосны – 1,6 м. Почва – торфяно-перегнойная на мощных торфах верхового типа, заболачивание – более 3 м.

Для внесения удобрений подготовлены 2 опытные площадки размером по 30×30 м и контрольная. В центре каждой из 3 площадок для наблюдений за положением уровня почвенно-грунтовых вод (УПГВ) выкопано по 2 скважины, нулевые отметки на которых установлены согласно проведенной нивелировке. Для замера температуры почвы использованы коленчатые термометры Савинова.

Азотное удобрение в виде мочевины (содержание азота – 46 %) – наиболее эффективное азотное удобрение для лесов, значительно ускоряющее у

сосны рост, фотосинтез и транспорт ассимилятов [10–12] – было внесено вручную во влажную почву 5 июня 2017 г. в дозе 180 кг действующего вещества (д.в.) на 1 га. На каждой опытной площадке и в контроле подобрано по 10 наиболее перспективных, характеризующихся сходной величиной годичного прироста главных осевых побегов за последние годы деревьев сосны I и II классов роста (по Крафту).

Для удобства снятия замеров около каждой модели из подсобного материала изготовлены специальные подмости. Поскольку деревья небольшие и расположены далеко друг от друга, было решено удобрять не всю площадь пробы, а лишь отдельные деревья на ней. Согласно принятой в опыте дозе азота расчетами установлено, что для удобрения 1 дерева необходимо 1 кг (986 г) технического удобрения, или 460 г д.в. Почвенные анализы выявили содержание общего азота в торфяной залежи перед внесением удобрения: в слое 5–10 см – 2,01 %, в слое 10–20 см – 2,10 %. После внесения удобрения содержание азота в сентябре 2017 г. в указанных слоях торфа возросло соответственно до 2,58 и 2,50 %.

Ход суточного роста сосны в высоту определяли прямыми замерами и путем фотографирования с помощью смартфона на фоне плотно прикрепленной к стволу линейки. Интенсивность фотосинтеза изучали изотопным методом с использованием радиоуглеродной метки [2] с удельной радиоактивностью газовой смеси в замкнутой системе 0,2 МБк/л в 6-кратной повторности, интенсивность транспирации – методом быстрого взвешивания [6] в 12-кратной повторности, митохондриальное дыхание отделенных от дерева корней – методом учета выделяющегося CO_2 [2] в 8-кратной повторности. Небольшое время (0,5 ч), прошедшее после отделения корня от дерева, позволяло работать с корнем как с интактным [14]. Освещенность замеряли люксметром Ю116 М по 30–35 точкам, температуру и влажность воздуха – психрометром Ассмана в 3-кратной повторности, температуру почвы – коленчатыми и срочными термометрами по 20 скважинам.

Исследования проводили в первые 2 года после внесения удобрений в периоды самых длинных на Севере световых дней. Замеры суточного роста главного побега и интенсивности физиологических процессов осуществляли через каждые 4 ч. Одновременно в эти же сроки оценивали положение УПГВ, освещенность, температуру воздуха и почвы. Визуально по наличию осадков и облачности неба определяли состояние погоды.

Результаты исследования и их обсуждение

Начало вегетационного периода 2017 г. характеризовалось относительно холодной погодой с частым выпадением осадков, иногда в виде снега. Май также был холодным и снежным. В 1-й половине июня дневная температура воздуха на опытном участке не поднималась больше 6–10 °С, ночная – больше 2–4 °С. Температура почвы в слое 0–10 см не превышала 3–5 °С. В ночные часы понизу, вдоль почвы, часто наблюдались слабые заморозки. УПГВ из-за медленного оттаивания почвы располагался в непосредственной близости от ее поверхности и лишь в отдельные сухие периоды в некоторых местах опускался ниже 8–12 см, поэтому корни сосны постоянно оставались затопленными или подтопленными.

Первые признаки набухания почек и разрушения на них покровных чехликов в этот год обозначились очень поздно, только к 10 июня – почти на 1 месяц позже обычных сроков. В литературе не раз отмечалось, что на Севере под влиянием ненастных погодных условий или при наступлении чрезвычайной ситуации возможен сдвиг начала и окончания роста сосны [4, 26]. В нашем опыте такой чрезвычайной ситуацией стала длительная холодная погода весной и в начале лета, а также затопление корней сосны.

Наблюдения за суточным ростом главного осевого побега сосны проводились 28 июня и 2–3 июля. Раньше начать исследования не позволяло отсутствие у сосны активного роста побегов по причине холодной и ненастной погоды. К 28 июня корнеобитаемый слой почвы все еще оставался подтопленным (9 см), влажность торфяного профиля в слое 5–10 см была высокая (92 %). Освещенность в дневные часы из-за постоянно облачного неба не превышала 16–24 тыс. лк, дневная температура воздуха – 13,0 °С, температура почвы в слое 5–10 см – 8,0 °С. Интенсивность фотосинтеза у прошлогодней хвои оказалась низкая – не более 12 мг CO₂/(г·ч) на площадках с азотом и не более 11 мг CO₂/(г·ч) в контроле. Дыхание мелких корневых окончаний на контрольном участке было 0,54 мг CO₂/(г·ч), на удобренных площадках – 0,59 мг CO₂/(г·ч).

Со 2 июля заметно потеплело. УПГВ понизился до 15 см. Влажность верхнего (5–10 см) слоя торфа уменьшилась до 87 %. Дневная температура воздуха повысилась до 22 °С, температура почвы в слое 5–10 см – до 13 °С. Дыхание мелких корневых окончаний в контроле возросло до 0,62 мг CO₂/(г·ч), на площадках с азотом – до 0,83 мг CO₂/(г·ч). Интенсивность фотосинтеза у 2-летней хвои под действием азота увеличилась до 17 мг CO₂/(г·ч), в контроле – до 14 мг CO₂/(г·ч). С этого периода начался активный рост молодых побегов и хвои. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Первые круглосуточные наблюдения за ростом верхушечного побега сосны, проведенные в 2017 г. с 0 до 24 ч 28 июня, показали, что линейный прирост главного осевого побега в высоту составил в опыте 17 мм/сут., в контроле – 10 мм/сут. За 2 суток, с 0 ч 2 июля до 24 ч 3 июля, в опыте побег увеличился на 3 см, в контроле – на 2 см. Более интенсивно побеги росли в вечерние и ночные часы (с 16 до 4 ч). За этот период они прирастали в опыте на 9 мм, в контроле на 5 мм. Всего за 6 суток, с 28 июня до 3 июля, длина главного побега у сосны на площадках с повышенным уровнем азотного питания увеличилась на 7,1 см, в контроле – на 3,5 см. Несмотря на установившуюся в регионе с 5 июля теплую погоду с дневными температурами 21–25 °С, рост сосны начал быстро ослабевать, особенно в контроле.

К концу общего периода роста (11 июля) длина главного побега на площадках с удобрением составляла 25,4±1,3 см, с естественным уровнем азотного питания – 16,9±1,1 см, на боковых ветвях первой мутовки – 15,5±0,5 и 12,2±0,3 см соответственно. За счет действия азота дополнительный прирост верхушечного побега составил 8,5 см, осевого побега на боковых ветвях первой мутовки – 3,3 см. В 2015 и 2016 гг. перед внесением удобрения длина верхушечного побега у сосны была 22,4±0,83 и 23,6±0,77 см соответственно. После окончания роста на молодых побегах сформировались вегетативные почки прироста будущего года. Их длина на площадках с азотом была 1,0–1,2 см, в контроле – 0,7–0,9 см.

Таблица 1

Влияние азота на суточный рост и интенсивность физиологических процессов у сосны в кустарничково-сфагновом сосняке в 2017 г.
Influence of nitrogen on daily growth and intensity of physiological processes in pine trees in the shrub-sphagnum pine forest in 2017

Время замеров, ч	Температура, °С	Освещенность, тыс. лк	Контроль		Опыт		Фотосинтез, мг CO ₂ /(г·ч)		Транспирация, мг H ₂ O/(г·ч)		
			длина главного побега, см	прирост, см	длина главного побега, см	прирост, см	контроль	опыт	контроль	опыт	
<i>28 июня</i>											
0.00	10,1	0,3	9,4±0,1	0	13,2±0,2	0	0,2	0,3	Отсутствует		
4.00	11,0	3,0	10,0±0,4	0,6	14,1±0,1	0,9	0,9	1,0	30	29	
8.00	12,5	19,3	10,0±0,2	0,6	14,3±0,4	1,1	10,5	11,9	206	182	
12.00	13,0	24,0	10,1±0,4	0,7	14,4±0,6	1,1	11,2	13,5	348	317	
16.00	9,0	22,0	10,1±0,1	0,7	14,5±0,1	1,3	10,8	12,3	230	218	
20.00	8,8	4,6	10,2±0,4	0,8	14,7±0,3	1,5	1,4	1,7	74	73	
24.00	7,6	0,2	10,4±0,1	1,0	14,9±0,2	1,7	0,1	0,3	8	10	
<i>2 июля</i>											
0.00	11,3	0,2	10,9±0,3	0	16,7±0,5	0	0,1	0,1	13	13	
4.00	12,9	3,6	11,0±0,2	0,1	17,0±0,5	0,3	0,8	0,9	22	20	
8.00	16,1	20,7	11,1±0,2	0,2	17,1±0,2	0,4	12,1	14,7	193	189	
12.00	22,0	32,5	11,4±0,3	0,5	17,3±0,2	0,6	13,4	18,1	359	319	
16.00	21,0	27,0	11,6±0,5	0,7	17,6±0,6	0,9	12,8	16,8	188	164	
20.00	15,0	10,6	11,7±0,4	0,8	17,9±0,3	1,2	6,2	8,8	88	83	
24.00	9,0	0,2	11,9±0,2	1,0	18,3±0,7	1,6	0,1	0,1	9	8	
<i>3 июля</i>											
0.00	9,0	0,2	11,9±0,3	1,0	18,3±0,7	1,6	0,1	0,1	9	8	
4.00	6,5	4,2	12,1±0,4	1,2	18,5±0,3	1,8	1,2	0,9	23	19	
8.00	18,1	38,7	12,2±0,2	1,3	18,7±0,6	2,0	15,3	17,7	182	169	
12.00	24,0	50,5	12,3±0,4	1,4	18,8±0,4	2,1	14,6	16,1	399	358	
16.00	23,0	44,0	12,4±0,3	1,5	19,3±0,3	2,6	15,0	16,8	275	254	
20.00	19,0	18,6	12,6±0,2	1,7	19,7±0,6	3,0	15,5	17,8	128	100	
24.00	14,5	0,2	12,9±0,3	2,0	20,0±0,9	3,3	0,2	0,2	23	21	

Примечание: общий прирост сосны: в опыте – 25,4±1,3 см, в контроле – 16,9±1,1 см.

Начало вегетационного периода 2018 г. характеризовалось теплой и относительно сухой погодой. Со 2-й половины мая и до конца месяца дневная температура воздуха не опускалась ниже 22–29 °С. Температура в корнеобитаемом горизонте поддерживалась на уровне 8–10 °С. Интенсивные осадки отсутствовали. УПГВ располагался на расстоянии 16–20 см от поверхности почвы. Явные признаки набухания вегетативных почек и освобождения их от покровных чехликов обозначились уже 19–20 мая, или на 3 недели раньше по сравнению с 2017 г., что соответствовало обычным срокам начала роста сосны на Севере [4].

В этот год наблюдения за суточным ростом верхушечного побега сосны одновременно с изучением хода физиологических процессов проводились с 0 ч 17 июня до 24 ч 19 июня и отдельно в 12 ч 20 и 21 июня. К началу исследований дневная температура воздуха на опытном участке была 24–28 °С, ночная – 18–19°. Температура почвы в корнеобитаемом слое (0–20 см) – 10,5–13,0 °С. УПГВ залегал на глубине 15–17 см от поверхности почвы. Ход суточного линейного роста главного осевого побега и физиологических процессов у сосны в 2018 г. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние азота на суточный рост и интенсивность физиологических процессов у сосны в кустарничково-сфагновом сосняке в 2018 г.
Influence of nitrogen on daily growth and intensity of physiological processes in pine trees in the shrub-sphagnum pine forest in 2018

Время опыта, ч	Температура, °С	Освещенность, тыс. лк	Контроль		Опыт		Фотосинтез, мг CO ₂ /(г·ч)		Транспирация, мг H ₂ O/(г·ч)	
			длина главного побега, см	прирост, см	длина главного побега, см	прирост, см	контроль	опыт	контроль	опыт
<i>17 июня</i>										
0.00	12,0	0,3	7,2±0,7	0	11,8±0,5	0	0,1	1,0	Отсутствует	
4.00	12,0	3,0	7,4±0,6	0,2	12,0±0,5	0,2	0,9	0,8	32	33
8.00	24,0	19,3	7,5±0,5	0,3	12,1±0,8	0,3	10,5	11,9	154	149
12.00	29,0	54,0	7,7±0,8	0,5	12,3±0,5	0,5	16,2	23,5	248	227
16.00	26,5	52,0	7,8±0,7	0,6	12,6±0,8	0,8	14,8	22,3	230	218
20.00	18,0	12,6	8,0±0,5	0,8	13,2±0,5	1,4	6,4	8,7	74	73
24.00	10,0	0,2	8,3±0,7	1,1	13,6±0,9	1,8	0,1	1,3	Отсутствует	
<i>18 июня</i>										
0.00	10,0	0,2	8,3±0,4	1,1	13,6±0,5	1,8	0,1	0,1	Отсутствует	
4.00	10,5	3,6	8,8±0,3	1,6	14,1±0,8	2,3	0,8	0,9	22	20
8.00	24,1	20,7	8,9±0,6	1,7	14,2±0,8	2,4	12,1	13,7	213	203
12.00	31,0	62,5	9,0±0,5	1,8	14,3±0,7	2,5	19,3	25,1	369	349
16.00	27,0	57,0	9,1±0,4	1,9	14,4±0,5	2,6	17,0	23,8	350	334
20.00	21,5	10,6	9,1±0,7	1,9	14,5±0,5	2,7	6,2	8,8	128	103
24.00	18,0	0,2	9,2±0,5	2,0	15,0±0,5	3,2	0,1	0,1	Отсутствует	
<i>19 июня</i>										
0.00	18,0	0,2	9,2±0,8	2,0	15,0±0,7	3,2	0,1	1,0	Отсутствует	
4.00	18,5	3,0	9,3±0,9	2,1	15,1±0,5	3,3	0,9	0,8	30	33
8.00	23,0	19,3	9,3±0,5	2,1	15,2±0,6	3,4	10,5	11,9	124	109
12.00	22,0	24,0	9,3±0,8	2,1	15,7±0,5	3,9	11,2	13,5	348	327
16.00	19,0	22,0	9,4±0,5	2,2	15,8±0,8	4,0	10,8	12,3	230	218
20.00	16,0	12,6	9,5±0,6	2,3	16,2±0,5	4,4	6,4	8,7	74	73
24.00	15,0	0,2	9,7±0,7	2,5	16,4±0,5	4,6	0,1	1,3	Отсутствует	
<i>20 июня</i>										
12.00	16,0	21,2	10,1±0,9	2,9	16,8±0,8	5,0	10,2	12,0	238	217
<i>21 июня</i>										
12.00	12,0	11,0	10,1±0,6	2,9	17,2±0,7	5,4	6,7	7,2	152	123

Примечание: общий прирост сосны: в опыте – 18,0±0,6 см, в контроле – 10,3±0,4 см.

За сутки с 0 до 24 ч 17 июня прирост верхушечного побега у сосны составил на площадке с азотным удобрением 18 мм, в контроле – 11 мм. За следующие сутки, 18 июня, длина верхушечного побега дополнительно увеличилась в опыте на 14 мм, в контроле – на 9 мм. Всего за 5 суток, с 17 по 21 июня, она возросла на 5,4 и 2,9 см соответственно. Наибольший суточный прирост побегов в контроле (2–9 мм) и опыте (7–15 мм) был зафиксирован с 16 до 4 ч. В утренние и дневные часы прирост побегов у всех моделей оказался значительно ниже, чем в вечернее и ночное время.

В этот год интенсивный рост главного побега в течение суток совпал с благоприятным температурным режимом воздуха: 17–18 июня температура воздуха в дневное время была 24–31 °С, в ночные часы снижалась незначительно (до 18 °С), освещенность при переменной облачности в околополуденные часы колебалась от 24 до 62 тыс. лк. Стояла сухая погода. После прихода 19 июня на территорию района холодного арктического циклона дневная температура воздуха стала быстро опускаться и уже днем 21 июня не превышала 12 °С. В результате за сутки, с 12 ч 20 июня до 12 ч 21 июня, длина главного побега в опыте увеличилась лишь на 4 мм, в контроле – на 1 мм. Затем пошли ливневые дожди, которые с небольшими перерывами продолжались до 10 июля – рост сосны начал быстро затухать.

В этот год формирование верхушечного побега у сосны в контроле закончилось 24 июня, в опыте – 4 июля, или в опыте на 10 дней позже, чем в контроле. За дополнительный период (с 24 июня по 4 июля) длина главного побега на опытных площадках увеличилась на 2,3 см. В конце общего периода роста длина главного осевого побега на контрольной площадке была $10,3 \pm 0,4$ см, на опытных площадках – $18,0 \pm 0,6$ см, осевого побега на первой боковой мутовке – $5,9 \pm 0,2$ и $9,1 \pm 0,4$ см соответственно. За счет действия азота дополнительный прирост верхушечного побега составил 7,7 см, осевого побега на первой боковой мутовке – 3,2 см.

Причиной слабого роста сосны в заболоченных сосняках стали нарушение у сосны нормальной работы корневой системы из-за анаэробнозиса, вызываемого частым затоплением и низкой обеспеченностью почвы элементами минерального питания [1, 3, 9, 18–20, 24], а также задержка снабжения растущих побегов и корней ассимилятами в результате блокирования выхода их из донорного листа и передвижения в транспортных путях [2, 7, 11, 13, 21–23]. Такие указания имеются и в работе [25]. По данным А.А. Захарина [5], средняя скорость роста у большинства высших растений составляет около 1,0 мм/ч. В сосняках лишайниковых Крайнего Севера сосна растет со скоростью 0,5–0,6 мм/ч, а под влиянием N_{180} – со скоростью 1,04–1,20 мм/ч [10, 21].

Суточный ход фотосинтеза у сосны, как было выявлено, тесно связан со световым режимом и температурой воздуха. В течение суток 17 и 18 июня 2018 г. наибольшая интенсивность фотосинтеза отмечалась с 8 до 16 ч. У опытных моделей она оказалась значительно выше, чем в контроле, и у прошлогодней хвои составляла 11,9–25,1 и 10,5–19,3 мг $CO_2/(г \cdot ч)$ соответственно. В эти же часы наблюдалась и самая высокая транспирация, которая у растений на участках с дополнительным азотным питанием была заметно ниже, чем у контрольных растений, – соответственно 149–349 и 154–369 мг $H_2O/(г \cdot ч)$. После прихода

в район 19 июля холодного циклона интенсивность как физиологических, так и ростовых процессов у сосны значительно понизилась.

Заключение

Наблюдения за суточным ростом верхушечного побега в высоту одновременно с изучением интенсивности физиологических процессов у сосны в кустарничково-сфагновом сосняке позволили установить причинно-следственную связь между скоростью суточного роста побегов и действием азота. Было обнаружено, что у сосны в заболачиваемых сосняках северо-таежной зоны (64°45' с. ш.) суточный и сезонный рост побегов, интенсивность физиологических процессов значительно ниже, чем у сосны в лишайниковых борах Крайнего Севера (66°45' с. ш.).

Причиной слабого роста сосны в этих условиях могло стать нарушение у нее гормонального обмена из-за плохой работы корней. Внесение в кустарничково-сфагновый сосняк азотного удобрения значительно усилило у сосны активность ростовых и физиологических процессов. По данным нашего исследования в северотаежной зоне в 33-летних кустарничково-сфагновых сосняках при естественном уровне азотного питания сосна растет в высоту со скоростью 5–11 мм/сут., под влиянием дополнительного внесения азота (N₁₈₀) – со скоростью 14–18 мм/сут. Интенсивность фотосинтеза за счет действия азота повышается на 12–19 %. Следовательно, в заболоченных типах леса азот способен существенно увеличивать скорость суточного и сезонного роста побегов у сосны. Связь роста побегов с уровнем азотного питания оказалась достаточно тесной ($r = 0,74 \pm 0,04$).

В нашем опыте азот не оказывал существенного влияния на суточную ритмику роста побегов у сосны, он только усиливал ее проявление. Результаты круглосуточных наблюдений показали, что в северотаежной зоне у сосны обыкновенной в заболачиваемых кустарничково-сфагновых сосняках усиление роста главного терминального побега в длину происходит в сумеречные и ночные часы, а замедление – в утренние и дневные. В районе исследований продолжительность светового периода в июне составляет около 22 ч, а явно выраженный ночной период при ясной погоде практически отсутствует. Максимальный прирост сосны в высоту в этих широтах происходит в конце июня–начале июля, а интенсивный – чаще во 2–3-й декадах июня, когда продолжительность дневного периода наибольшая. Максимальная интенсивность фотосинтеза и транспирации у сосны отмечается в околополуденные часы при высоком стоянии солнца над горизонтом. Дыхание корней наиболее активно в вечерние часы и связано с интенсивным притоком в них ассимилятов из листа после активного дневного фотосинтеза.

Действие азота, вносимого в кустарничково-сфагновые сосняки, на рост сосны в целом позитивное. В данных лесорастительных условиях его эффективность определяется уровнем влагообеспеченности почвы и погодными условиями региона. Постоянная избыточная влажность почвы и, как следствие, ее пониженная аэрация, подавляя поглотительную деятельность и синтетические процессы корней, снижают эффективное действие азота на рост сосны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Веретенников А.В., Коновалов В.Н. Влияние осушения на интенсивность дыхания корней *Picea abies* Karst. (*Pinacea*) в ельнике осоково-хвощево-сфагновом северной подзоны тайги // Ботан. журн. 1979. № 2. С. 252–254.
Veretennikov A.V., Kononov V.N. The Effect of Drainage on the Roots Respiration Rate of *Picea abies* Karst. (*Pinacea*) in the Sedge Horsetail Sphagnum Fir Forest of the North Taiga Subzone. *Botanicheskiy Zhurnal*, 1979, no. 2, pp. 252–254. (In Russ.).
2. Вознесенский Л.В., Зеленский О.В., Семихатова О.А. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений. М.; Л.: Наука, 1965. 305 с.
Voznesenskiy L.V., Zalenskiy O.V., Semikhatova O.A. *Research Methods for Photosynthesis and Plant Respiration*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 305 p. (In Russ.).
3. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н., Феклистов П.А., Клевцов Д.Н. Динамика дыхания корней сосны и ели в северотаежных фитоценозах // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014. № 2. С. 52–59.
Zarubina L.V., Kononov V.N., Feklistov P.A., Klevtsov D.N. Dynamics of Root Respiration in Pine and Spruce Trees of Northern Taiga Plant Communities. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"*, 2014, no. 2, pp. 52–59. (In Russ.).
4. 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>
5. Захарин А.А. Метод регистрации быстрой кинетики роста корней и надземных органов проростков // Физиология растений. 1993. Т. 40, № 6. С. 940–946.
Zakharin A.A. Method for Registration of Growth Rapid Kinetics of Roots and Aerial Organs of Seedlings. *Fiziologiya Rastenij = Russian Plant Physiology*, 1993, vol. 40, no. 6, pp. 940–946. (In Russ.).
6. Иванов Л.А., Силина Ю.Л., Цельникер Ю.Л. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях // Ботан. журн. 1950. Т. 35, вып. 2. С. 171–185.
Ivanov L.A., Silina Yu.L., Tsel'niker Yu.L. On the Method of Rapid Weighing to Determine Transpiration in the Wild. *Botanicheskiy Zhurnal*, 1950, vol. 35, iss. 2, pp. 171–185. (In Russ.).
7. Киризий Д.А., Франтийчук В.В., Стасик О.О. Содержание растворимых углеводов и старение флагового листа пшеницы при экспериментальном блокировании оттока ассимилятов // Физиология растений и генетика. 2015. Т. 47, № 2. С. 136–146.
Kiriziy D.A., Frantiychuk V.V., Stasik O.O. The Content of Soluble Carbohydrates and the Aging of the Wheat Flag Leaf during Experimental Blocking of the Assimilates Outflow. *Plant Physiology and Genetics*, 2015, vol. 47, no. 2, pp. 136–146. (In Russ.).
8. Кищенко И.Т. Сезонный рост сосны при внесении азотных удобрений // Лесоведение. 1985. № 2. С. 73–78.
Kishchenko I.T. Pine Seasonal Growth with the Application of Nitrogen Fertilizers. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1985, no. 2, pp. 73–78. (In Russ.).
9. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на осушаемых землях. Архангельск: АГТУ, 2010. 295 с.
Kononov V.N., Zarubina L.V. *Ecological and Physiological Features of Conifers on Drained Lands*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2010. 295 p. (In Russ.).
10. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах. Архангельск: АГТУ, 2011. 338 с.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ecological and Physiological Features of Conifers on Fertilized Soils*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2011. 338 p. (In Russ.).

11. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Влияние дозы азота при подкормках на отток ^{14}C -ассимилятов у сосны в сосняках лишайниковых // Изв. вузов. Лесн журн. 2012. № 1. С. 7–13.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. Impact of Nitrogen Dose on the ^{14}C -Assimilates Outflow in Pine Trees at the Lichen Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 1, pp. 7–13. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b50/xnxx1.pdf>

12. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Транспорт, распределение и потребление ^{14}C -ассимилятов у сосны и ели в северотаежных фитоценозах при различном световом и азотном питании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 77–94.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. Transport, Distribution and Consumption of Pine and Spruce ^{14}C -Assimilates in Northern Phytocenoses under Different Illumination and Nitrogen Nutrition. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3, pp. 77–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-77-94>

13. Коновалов В.Н., Листов А.А. Влияние условий минерального питания на дыхание корней сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 1989. № 4. С. 15–19.

Konovalov V.N., Listov A.A. The Influence of Mineral Nutrition Conditions on the Respiration of Scots Pine Roots. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1989, no. 4, pp. 15–19. (In Russ.). http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/854/15_19.pdf

14. Мамаев В.В. Суточные и сезонные изменения интенсивности выделения CO_2 у скелетных корней сосны и березы в природных условиях // Лесоведение. 1983. № 2. С. 33–36.

Mamayev V.V. Daily and Seasonal Changes in the Intensity of CO_2 Emission in the Pine and Birch Root Fibrils in Natural Conditions. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1983, no. 2, pp. 33–36. (In Russ.).

15. Тараканов А.М. Рост осушаемых лесов и ведение в них хозяйства. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 238 с.

Tarakanov A.M. *Growth and Management of Drained Forests*. Arkhangelsk, NRIF Publ., 2004. 238 p. (In Russ.).

16. Грубин Д.В., Третьяков С.В., Коптев С.В. Динамика и перспективы лесопользования в Архангельской области. Архангельск: АГТУ, 2000. 96 с.

Trubin D.V., Tretyakov S.V., Koptev S.V. *Dynamics and Prospects of Forest Management in the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2000. 96 p. (In Russ.).

17. Федорец Н.Г. Трансформация азота в почвах лесных биогеоценозов Северо-Запада России: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: Пушкино, 1997. 41 с.

Fedorets N.G. *Nitrogen Transformation in the Soils of Forest Biogeocenoses in the North-West of Russia*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, Pushkino Publ., 1997. 41 p. (In Russ.).

18. Цельникер Ю.Л. Дыхание корней и его роль в углеводном балансе древостоя // Лесоведение. 2005. № 6. С. 11–18.

Tsel'niker Yu.L. Root Respiration and its Role in the Carbon Budget of a Stand. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2005, no. 6, pp. 11–18. (In Russ.).

19. Albaugh T.J., Lee Allena H., Dougherty Ph.M., Johnsen K.H. Long Term Growth Responses of Loblolly Pine to Optimal Nutrient and Water Resource Availability. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 192, iss. 1, pp. 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.002>

20. Kaczmarck D.J., Pope P.E. The Relationship between Soil Nutrient Availability and Foliar Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Hardwoods. *Annual Meeting of the American Society of Agronomy 1993*. Cincinnati, 1993, p. 336.

21. Konovalov V.N., Zarubina L.V., Goreva A.D. Peculiar Influence of Nitrogen on the Daily Growth and Photosynthesis of Scots Pine in the Far North. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 263, art. 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012011>
22. Laitinen K., Luomala E.-M., Kellomäki S., Vapaavuori E. Carbon Assimilation and Nitrogen in Needles of Fertilized and Unfertilized Field-Grown Scots Pine at Natural and Elevated Concentrations of CO₂. *Tree Physiology*, 2000, vol. 20, iss. 13, pp. 881–892. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.13.881>
23. Öquist G., Huner N.P.A. Photosynthesis of Overwintering Evergreen Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, vol. 54, pp. 329–355. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.072402.115741>
24. Palta J.A., Nobel P.S. Influence of Soil O₂ and CO₂ on Root Respiration for *Agave deserti*. *Physiologia Plantarum*, 1989, vol. 76, iss. 2, pp. 187–192. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb05630.x>
25. Saur E. Interactive Effects of P-Cu Fertilizers on Growth and Mineral Nutrition of Maritime Pine. *New Forests*, 1993, vol. 7, iss. 2, pp. 93–105. <https://doi.org/10.1007/BF00034193>
26. Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E. Adaptive Responses of Morphological Forms of Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Stressful Conditions of the Northern Taiga (in the Northern Dvina Basin). *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, iss. 4, pp. 377–387. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040091>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*161

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-127-145

Лесопригодность экотопов Волго-Ахтубинской поймы для культур сосны

А.С. Манаенков[✉], д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр.; ResearcherID: [Y-8283-2018](https://orcid.org/0000-0002-2084-2147),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-2147>

А.С. Пономарев, аспирант; ResearcherID: [AAH-5068-2020](https://orcid.org/0000-0003-1885-9959),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1885-9959>

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексной мелиорации и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; manaenkov1@yandex.ru[✉], girolike@gmail.com

Поступила в редакцию 16.11.20 / Одобрена после рецензирования 13.02.21 / Принята к печати 16.02.21

Аннотация. Наиболее обширные песчаные массивы на юге Европейской России сосредоточены в поясе сухих степей и полупустынь. Эффективное использование данных земель требует создания защитных лесных насаждений из засухоустойчивых хвойных пород – сосны обыкновенной и сосны крымской. Производительность и долговечность таких древостоев широко варьируют по территории и зависят от наличия дополнительного к атмосферным осадкам водного питания и минеральной обеспеченности корнеобитаемого слоя. В связи с этим особый интерес для лесоразведения представляют песчаные массивы «остепненных» речных долин, сложенные многофазными или однофазными полиминеральными породами. В число важных объектов лесоразведения входит северная (в пределах Волгоградской области), наиболее высокая и дренируемая часть Волго-Ахтубинской поймы. Зарегулирование стока р. Волги Волжской ГЭС привело к перестройке режимов поверхностных и грунтовых вод, становлению новых условий водно-минерального питания и изменению других важных факторов существования лесных экосистем на данной территории. Цель – разработать классификацию экотопов Волго-Ахтубинской поймы по условиям водно-минерального питания, культивирования, ожидаемой производительности и долговечности насаждений сосны. Исследованы связи ростовых показателей древостоев *Pinus silvestris* L. с почвенно-грунтовыми и гидрологическими условиями на разных экотопах крупногрядистой и переходной пойм после зарегулирования стока р. Волги Волжской ГЭС. Выявлены закономерности динамики этой связи. Установлено, что в северной части Волго-Ахтубинской долины (примерно до линии Капустин Яр – Каменный Яр) с усилением слоистости, утяжелением гранулометрического состава корнеобитаемого слоя до супесчаного, понижением уровня поверхности при небольшом удалении от дренирующего русла влагообеспеченность и рост культур сосны обыкновенной улучшаются, повышается лесопригодность экотопов. На почвах, подстилаемых мощными суглинками, существует опасность раннего распада и гибели высокополнотных сосняков в периоды маловодных и засушливых лет. По этим показателям, а также условиям создания лесных культур, производительности и долговечности насаждений выделено 3 группы лесопригодности экотопов. Наименее благоприятные экотопы – на высоких участках грядистой и переходной пойм с маломощными почвами различного состава на одно-

фазных рыхлых песках при глубоком (более 4–5 м) залегании зеркала грунтовой воды в межень. Наиболее благоприятные – хорошо дренируемые участки переходной поймы с легкими почвами на мощных слоистых, преимущественно супесчаных отложениях, а также на песках с близким к поверхности залеганием грунтовой воды. Средние по условиям – слабо дренируемые участки переходной поймы с маломощными супесчаными и суглинистыми почвами на мощных суглинках.

Ключевые слова: зарегулирование стока, остепнение экотопов, экологические факторы, древостой сосны, ростовые показатели, лесорастительные условия, однородные группы экотопов, лесоразведение, сосна обыкновенная, сосна крымская, Волго-Ахтубинская пойма

Для цитирования: Манаенков А.С., Пономарев А.С. Лесопригодность экотопов Волго-Ахтубинской поймы для культур сосны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 127–145. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-127-145>

Original article

Forest Sustainability of Ecotopes of the Volga-Akhtuba Floodplain when Cultivating Pine Plantations

Alexander S. Manaenkov[✉], Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [Y-8283-2018](https://orcid.org/0000-0002-2084-2147), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-2147>

Alexander S. Ponomarev, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAH-5068-2020](https://orcid.org/0000-0003-1885-9959),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1885-9959>

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; manaenkov1@yandex.ru[✉], girolike@gmail.com

Received on November 16, 2020 / Approved after reviewing on February 13, 2021 / Accepted on February 16, 2021

Abstract. In the south of European Russia, the largest sand massifs are found in the zone of dry steppes and semi-deserts. Effective utilization of such lands requires creation of protective forest planting of drought-resistant coniferous species like Scots pine and Crimean pine. The productivity and longevity of such stands vary widely over the territory and depends on the presence of additional to atmospheric precipitation water supply and the root layer mineral supply. In this regard, sand massifs of steppified river valleys composed of multiphase or single-phase polymineral rocks are of particular interest for afforestation. One of the most important objects of afforestation is the Northern (within the Volgograd region) highest and most drained part of the Volga-Akhtuba floodplain. Volga River damming by the Volga Hydroelectric Station (Volga GES) led to a restructuring of surface and ground water regimes, formation of new conditions of water and mineral nutrition and changes in other important factors of forest ecosystems in the area. The research aims at developing a classification of the Volga-Akhtuba floodplain ecotopes by water-mineral nutrition conditions, cultivation, expected productivity and longevity of pine plantings. We studied relationships of growth parameters of *Pinus silvestris* L. stands with soil-ground and hydrological conditions in different ecotopes of the large hilly and transitional floodplains after the Volga River damming by the Volga GES. Dynamics patterns of this relationship were revealed. It was found that in the northern part of the Volga-Akhtuba valley (approximately up to the Kapustin Yar – Kamenny Yar line) with increasing stratification, heavier granulometric composition



of the root layer to sandy loam layer, lowering the surface level at a small distance from the drainage channel moisture supply and growth of Scots pine plantations improve, forest suitability of ecotopes increases. There is a risk of early decay and death of high-density pine forests in periods of low water and dry years on soils underlain by thick loams. Three groups of ecotope forest suitability were identified according to these indicators, as well as the conditions for the creation of forest plantations, productivity and longevity of plantings. The least favorable ecotopes are in the highlands of the hilly and transitional floodplains with minor soils of different composition on single-phase open-textured sands with deep (more than 4–5 m) groundwater table during low-water season. The most favorable are well-drained areas of the transitional floodplain with light soils on thick stratified predominantly sandy loam sediments, as well as on sands with close to the surface groundwater occurrence. Average ecotopes in terms of conditions are poorly drained areas of the transitional floodplain with minor sandy loam and loamy soils on deep loams.

Keywords: damming, steppification of ecotopes, environmental factors, pine stand, growth parameters, forest site conditions, homogeneous ecotope groups, afforestation, Scots pine, Crimean pine, Volga-Akhtuba floodplain

For citation: Manaenkov A.S., Ponomarev A.S. Forest Sustainability of Ecotopes of the Volga-Akhtuba Floodplain when Cultivating Pine Plantations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 4, pp. 127–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-127-145>

Введение

Зарегулирование речного стока плотинами гидроэлектростанций, гидрозвулов, других крупных гидротехнических сооружений и подчинение его режима отраслевым интересам неизменно ведут к негативному изменению условий жизнеобеспечения природных пойменных экосистем, их глубокой перестройке и, как правило, к снижению устойчивости и биологической продуктивности всего ландшафтообразующего комплекса низовий речных долин, переходу его в новое состояние [8, 19, 20].

В северной части Волго-Ахтубинской поймы произошло углубление русла реки, а также сформировались мелководные перекаты, препятствующие поступлению полых вод в центральную часть поймы [6]. В зависимости от природно-экономических и политических особенностей стран и регионов мира предпринимаются различные меры противодействия подобным негативным процессам. Наиболее действенными считаются совершенствование методики прогноза обеспеченности стока и оптимизация режима пропуска воды в период половодий и паводков, адаптация природно-хозяйственного комплекса к трансформированным гидрологическим условиям пойменных земель [2, 18].

На территории засушливых регионов, где интразональность пойм особенно выражена, существенная перестройка режима поверхностных и грунтовых вод вследствие зарегулирования руслового стока и снижения поемности земель способствует началу зональных процессов, сужает экологическую нишу древесной флоры. Полнотные древостои лесных экосистем, существование которых невозможно без дополнительного к влаге атмосферных осадков грунтового водного питания, деградируют, замещаются лесонасаждениями малоценных ксерофитных пород или уступают место степным экосистемам. Процесс ксерофитизации и остепнения наиболее характерен для экотопов высокой и средней поймы [5, 19].

Снижение уровня и качества лесистости пойменных земель – нежелательное явление [17]. Блокировать его можно только активизацией лесокультурных работ, для чего требуется всестороннее изучение и объективная оценка динамики лесопригодности экотопов в условиях измененного гидрологического режима.

На европейской территории России наиболее важный объект искусственного облесения – северная (в пределах Волгоградской области), наиболее высокая и дренируемая часть Волго-Ахтубинской долины, расположенная на границе сухой степи и полупустыни в окружении промышленно развитой, плотно заселенной территории. Зарегулирование стока р. Волги Волжской ГЭС в 1958 г. привело к сокращению степени и продолжительности затопления данной территории в весенне-летний период примерно в 2 раза (с 50–60 % площади на 1,0–1,5 мес. до 30 % при продолжительности не более 2 нед.). Причем изменение режима затопления особенно резко проявилось в средние и маловодные годы [16].

Участки гривистой поймы с маломощными почвами на однофазном древнеаллювиальном кварцевом песке и отложениях преимущественно легкого гранулометрического состава при залегании грунтовой воды (ГВ) в межень глубже 3–5 м из-за редкого непродолжительного затопления в весеннее половодье стали значительно суше и беднее. Несмотря на существенное увеличение нормы осадков (с 355 до 410–420 мм/год при испаряемости 650–700 мм/год) и значительную водность Волги [7, 9], участки в основном лишились древесной растительности, стали рекреационно непривлекательными и частично перешли в категорию бросовых земель.

Большая часть таких земель приурочена к руслам рек Волги, Ахтубы, крупных рукавов и ериков и по природоохранно-хозяйственным соображениям подлежит облесению. Однако попытки создания на данных землях лесных культур лиственных пород-мезофитов не имеют успеха. Такие культуры плохо приживаются, медленно растут и рано распадаются. На их фоне выгодно отличаются только зеленые островки сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.), заложенные в порядке производственного опыта в разные годы рядовой посадкой сеянцев с 3-метровыми междурядьями.

Цель исследования – разработать классификацию экотопов Волго-Ахтубинской поймы по условиям водно-минерального питания, культивирования, ожидаемой производительности и долговечности насаждений сосны.

Объекты и методы исследования

Лесорастительные условия, рост и состояние насаждений сосны изучали в 2005, 2006 [10] и 2017–2019 гг. на 22 пробных площадях (ПП), заложенных в 15–76-летних культурах. Применены методы бурового зондирования зоны аэрации почвогрунта и оценены связи ростовых показателей модельных деревьев с почвенно-грунтовыми, климатическими и гидрологическими факторами [1, 15]. ПП закладывали с использованием общепринятых методов лесной таксации в наиболее типичной части насаждений вдоль рядов посадки культур. Число и длину рядов определяли исходя из наличия на ПП не менее 100 живых деревьев. Для анализа хода роста культур подбирали и срубали на уровне почвы среднее (модельное) дерево. Измеряли его длину и протяженность живой

кроны, по пневому срезу устанавливали возраст. Производили обмер хлыста и фиксировали ежегодные приросты в высоту от вершины до спила, учитывая высоту пня. Ширину годичных колец с распределением на раннюю и позднюю древесину изучали на выпилах срубленных модельных деревьев и на ядрах, взятых на высоте 1,3 м на 2–3 средних деревьях каждой ПП.

Скважины на ПП закладывали ручным буром на глубину 2,5–4,0 м – при близком залегании грунтовой воды, на глубину 5 м и более – в прирусловой пойме при большой мощности зоны аэрации почвогрунта, сложенного однофазным песком. Описание почвогрунта производили по шкале Н.А. Качинского с распределением на рыхлый и связный песок, супесь, легкий, средний и тяжелый суглинок. Из наиболее представленных слоев отбирали образцы для определения содержания физической глины в лабораторных условиях. Глубину залегания грунтовой воды (меженный уровень) устанавливали с помощью металлической «хлопушки» и шнура-рулетки в конце июля – сентябре года закладки ПП.

Метеоданные и расходы полой воды Волжской ГЭС за период роста насаждений получены из базы данных Волгоградского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Волжского гидроузла. Корреляционный анализ данных полевых наблюдений по ходу роста деревьев проводили с использованием программы Statgraphics 5.0 +.

Принимали во внимание следующие обстоятельства:

доступность почвенной влаги для сосны определяется не только влажностью и капиллярностью питающего слоя, но и его насыщенностью корнями, которая быстро уменьшается с глубиной и снижением минеральной обеспеченности грунтов [14];

текущий прирост сосны в высоту является функцией влагообеспеченности насаждения в предыдущем гидрологическом году (ГГ), а по диаметру – в текущем [1];

при отсутствии альтернативных источников влаги изменчивость текущего прироста прямо пропорциональна динамичности атмосферного увлажнения и влагоемкости корнеобитаемого слоя (КС) [12];

продолжительность периода большого роста сосны (текущий прирост в высоту 40 см и более) увеличивается с улучшением лесорастительных условий [13];

доля участия поздней древесины в формировании радиального прироста прямо пропорциональна обеспеченности насаждений влагой во 2-й половине вегетационного периода [15];

формирование весенне-летнего стока Волги и его влияние на рост древостоев в основном обусловлены гидрометеорологическим режимом на территории водосборных бассейнов в среднем и верхнем течении реки [4], который слабо коррелирует с флуктуациями погодных условий в ее низовьях.

Коэффициент чуткости прироста сосны в высоту, %, полученный по формуле Т.Т. Бинтвинскас [1]:

$$Чк = \frac{\sum_{1}^{n} |\Delta Z_h|}{\sum_{1}^{n} \Delta Z_h} \cdot 100,$$

где $\sum_{1}^{n} |\Delta Z_h|$ – абсолютные разности очередных годичных приростов в высоту;

$\sum_{1}^{n} \Delta Z_h$ – сумма годичных приростов в высоту за исследуемый период.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что во всем гипсометрическом поясе изучаемых площадей прирусловой и переходной поймы (превышение над меженным урезом воды в р. Волге от 5 до 8–10 м и более) признаки затопления в половодье на протяжении последних 15–18 лет отсутствуют. Средневзвешенное содержание глинистых частиц в КС сосны (2,0–3,5 м) колеблется в широких пределах (от 3 до 25 %) и соответствует требовательности этой породы к плодородию [9]. В зоне аэрации почвогрунта формируются 2 слоя регулярного увлажнения: верхний (мощностью 1,5–2,5 м) за счет атмосферных осадков и нижний (с глубины 1,5–3,0 м и более) вследствие подъема ГВ в половодье и паводки. Капиллярно-подвешенную влагу верхнего (корненасыщенного) слоя сосна интенсивно использует в 1-й половине вегетации, нижнего (менее интенсивно) во 2-й – после схода полой воды и значительного просыхания КС. Благодаря этому в пойме сосна меньше страдает от позднелетне-осеннего дефицита почвенной влаги, чем на песках речных террас и возвышенностей с недоступной ГВ, и может формировать высокопроизводительные (табл. 1) долговечные насаждения.

Анализ ростовых показателей сосны на ПП свидетельствует об их сложной многофакторной детерминированности. Внешние и внутренние (обусловленные состоянием и фазами развития древостоя) факторы воздействуют на данные показатели в совокупности, нивелируя или усиливая влияние отдельных внешних факторов (весеннего расхода воды, количества атмосферных осадков за ГГ, гипсометрического уровня, состояния и строения почвогрунта, хозяйственных мероприятий). Создается сложная и динамичная мозаика питательных режимов древостоя, затрудняющая их классификацию. Для распределения пойменных земель по степени лесопригодности необходима многосторонняя оценка этих режимов.

Так, даже на самых высоких (ПП 6, 8, 9, 14, 18–22) участках гривистой поймы с маломощными почвами и почти однофазными песчаными почвогрунтами сила влияния суммы осадков за июль–сентябрь, когда КС бывает наиболее иссушен, на текущий прирост сосны в высоту на протяжении всего периода жизни насаждения не превышает 11–17 %. С ростом капиллярности грунта (ПП 2–4, 13, 15–17), приближением уровня ГВ к поверхности (ПП 1, 4, 5, 10) влияние уменьшается до 1–3 %. Связь текущего прироста с суммой осадков за август–сентябрь остается ощутимой.

В целом на рост сосновых культур в высоту на песчаных экотопах крупногривистой поймы наибольшее влияние ($r^2 = 13–25\%$) оказывает сумма осадков за весь ГГ, теплый период ($r^2 = 13–29\%$) и особенно апрель–июнь ($r^2 = 15–34\%$), когда формируется текущий прирост и почвенная влага десугируется наиболее интенсивно. Последнее свидетельствует о том, что в 1-й половине вегетации, при значительной влажности КС, подпертая половодьем грунтовая влага практически не используется на транспирацию древостоев. Этому способствует и низкая температура влаги. В послепаводковый период под действием гравитации грунтовая влага интенсивно стекает и остается доступной в небольшом количестве. Наличие супесчаных прослоев в толще песка (ПП 7, 11, 12) замедляет процесс гравитационного иссушения почвы и повышает запасы подвешенной влаги. Маломощный (0,3–0,5 м) слой связной почвы (ПП 6 и 9), подстилаемый однофазным песком, напротив, снижает эффективность осадков теплого периода и лесопригодность высоких экотопов.

Таблица 1

Экологические условия и таксационные показатели насаждений сосны
в Волго-Ахтубинской пойме
Environmental conditions and valuation indicators of pine plantings
in the Volga-Akhtuba floodplain

№ ПП	Почва	Уровень грунтовой воды (УГВ, м)	Средневзвешенное содержание физической глины, %	Густота, шт./га	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Класс бонитета	Полнота, ед.	Запас, м ³ /га	Период большого роста, лет
1	Супесчаная маломощная на песке	2,5	6,0	620	34	18	21	1а	0,6	165	>29
2	Супесчаная маломощная на суглинке	2,3	8,5	830	35	19	22	1а	0,8	340	21
3	Суглинистая мощная на суглинке	3,5	25,0	650	18	9	11	1	0,3	28	–
4	Суглинистая маломощная на аллювиальном суглинке	3,5	18,0	230	18	11	12	1	1,0	160	–
5	Суглинистая среднemocная на песке	2,7	19,0	1200	28	13	18	1а	0,8	210	19
6	Суглинистая маломощная на песке	>5,0	4,0	1040	31	9	14	3	0,6	85	21
7	Песчаная маломощная на слоистом аллювиальном песке	>5,0	6,0	400	51	17	30	2	0,8	270	–
8		>5,0	3,0	1500	37	14	16	1	0,9	220	>29
9	Супесчаная среднemocная на слоистом аллювиальном песке	>5,0	6,0	870	37	11	17	3	0,8	110	22

Окончание табл. 1

№ ПП	Почва	Уровень грунтовой воды (УГВ, м)	Средневзвешенное содержание физической глины, %	Густота, шт./га	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Класс бонитета	Полнота, ед.	Запас, м ³ /га	Период большого роста, лет
10	Супесчаная маломощная на слоистом аллювиальном песке	3,2	5,0	1150	34	15	17	1	0,8	200	>30
11	Песчаная среднemocная на слоистой аллювиальной супеси	>5,0	13,5	770	64	22	25	1	0,9	370	>57
12		>5,0	11,0	370	55	19	28	2	0,7	200	–
13	Супесчаная среднemocная на аллювиальном суглинке	>5,0	19,5	1760	32	17	18	1a	1,3	380	>26
14	Песчаная маломощная на слоистом аллювиальном песке	>5,0	5,0	1390	26	11	13	1a	0,8	110	>17
15	Суглинистая мощная на суглинке	4,0	25,0	1575	30	17	19	1a	0,8	368	22
16		4,0	23,0	761	38	19	22	1a	0,8	254	25
17	Песчаная среднemocная на слоистом аллювиальном суглинке	6,0	18,0	740	39	20	24	1a	0,6	322	27
18	Песчаная маломощная на песке	9,0	5,0	1346	38	11	18	3	0,6	254	22
19		9,0	5,0	2032	15	5	8	2	0,7	38	–
20		8,0	3,0	1143	38	11	14	3	0,7	120	23
21		8,0	5,0	923	42	14	18	2	0,7	89	25
22*		8,0	5,0	347	39	7	16	5	0,7	31	21

*Сосна крымская.

Повышенные суммы осадков за теплый период предыдущего ГГ, особенно за август–сентябрь, благоприятно ($r^2 = 18$ и 50%) сказываются и на росте высокополнотных культур вблизи дренирующих водотоков (ПП 1 и 7), где с угасанием половодья зеркало ГВ стремительно понижается, а подвешенная влага из увлажненного ею подстилающего песка стекает за пределы КС.

На участках с большой мощностью слоистых отложений влияние осадков теплого периода на рост сосновых насаждений прослеживается слабее, а грунтового увлажнения остается заметным и при залегании зеркала воды в межень ниже 3–5 м (ПП 3, 13, 17). В этих условиях несколько увеличивается и эффективность атмосферных осадков холодного периода.

Однако положительное влияние повышенных сумм атмосферных осадков на рост насаждений сосны зависит не только от мощности, состава и строения почвогрунта КС, но и от возраста, густоты, охвоенности и состояния древостоя, наличия конкурентов в виде лиственных пород и т. п. То есть от факторов, определяющих потребность насаждения в почвенной влаге. Несмотря на большую изменчивость корреляционной связи прироста с почвенно-грунтовыми условиями, самую значительную величину она имеет, когда древостой достигает возраста 11–20...11–30 лет – после прекращения агротехнических уходов, смыкания культур при сохранении способности к быстрому росту.

На рост сосны в молодом возрасте на песчаных экотопах высокой поймы (ПП 6, 8, 14, 18, 19) небольшое положительное воздействие оказывает повышенная сумма осадков и за май–июнь текущего ГГ (года формирования прироста).

С увеличением возраста древостоя, углублением вертикальных корней и притуплением прироста (снижением относительной транспирационной активности) влияние осадков уменьшается, становясь малозаметным (ПП 2, 5, 10, 11) с года установления устойчивого контакта корней древостоя с капиллярной каймой ГВ.

Положительное влияние расхода воды Волжской ГЭС в предыдущем году (за весь год) на текущий прирост сосны в высоту также обусловлено высотным уровнем и гранулометрическим составом почвогрунта. На песчаных отложениях крупногравистой поймы оно не превышает 10% (ПП 20) и ослабевает как с повышением уровня поймы (ПП 18), так и в понижениях, где расположенная наиболее глубоко часть корневой системы сосны в периоды максимального сброса воды может погружаться в ГВ и снижать свою активность. На территории переходной поймы положительное влияние повышенной водности на прирост достигает максимума ($r = 0,42$) вблизи дренирующих водотоков на участках со слоистыми относительно легкими слагающими породами (ПП 17).

Рассчитанный коэффициент чуткости выявляет сложную, но в целом объяснимую закономерность (табл. 2). Так, наименее чуткими к условиям среды ($Чк \leq 20\%$) оказались молодняки и средневозрастные насаждения (ПП 4, 15, 17), произрастающие вблизи дренирующих водотоков на мощных слоистых супесчано-суглинистых отложениях, обеспечивающих высокий капиллярный подъем грунтовой влаги. Несколько более чуткими ($Чк = 24–29\%$) – насаждения на экотопах с близким к поверхности уровнем ГВ (ПП 1, 2, 10), а также на мощных слоистых, преимущественно суглинистых отложениях вдали от дренирующего водотока (ПП 3, 13, 16). Коэффициент чуткости в пределах $30–41\%$

имеют насаждения на мало- и среднемоощных суглинистых почвах, подстилаемых песком (ПП 5 и 6), на супесчаных почвах, развитых на мощных слоистых, преимущественно легких отложениях (ПП 9 и 11), а также на песчаных почвах и однофазных песках высоких экотопов крупногивистой поймы (ПП 14, 18–21). Наиболее чувствительные к условиям среды ($Чк = 52–54\%$) – относительно густое (1500 дер./га) средневозрастное насаждение сосны обыкновенной на песчаной почве (ПП 8) и насаждение сосны крымской на рыхлом песке высокой поймы (ПП 22).

Для менее чувствительных насаждений характерен и меньший коэффициент вариации текущего прироста.

Таблица 2

**Экологические условия и прирост в высоту культур сосны
в Волго-Ахтубинской пойме**
**Environmental conditions and height growth of pine plantations
in the Volga-Akhtuba floodplain**

№ ПП	УГВ, м	Средневзвешанное содержание физической глины, %	Средний прирост, см				Коэффициент вариации текущего прироста в высоту, %	Чк, %
			за всю жизнь	11–20 лет	21–30 лет	31–39 лет		
1	2,5	6,0	50,6	68,7	59,9	–	37,3	29
2	2,3	8,5	54,8	64,0	57,4	–	29,2	24
3	3,5	25,0	45,7	52,8	–	–	43,8	26
4	3,5	18,0	61,7	75,0	–	–	35,7	16
5	2,7	19,0	46,0	59,7	34,0	–	41,3	37
6	>5,0	4,0	30,0	34,6	25,6	–	36,7	30
8	>5,0	3,0	37,0	46,5	34,2	–	47,0	54
9	>5,0	6,0	27,0	29,9	25,8	12,7*	48,2	37
10	3,2	5,0	44,4	43,5	41,5	–	27,2	25
11	>5,0	13,5	35,1	59,1	36,2	21,4	48,5	38
13	>5,0	19,5	56,1	67,8	40,0	–	43,3	25
14	>5,0	5,0	43,3	45,7	41,8**	–	42,2	30
15	4,0	25,0	51,0	75,0	42,0	–	46,3	19
16	4,0	23,0	48,9	76,7	43,7	13,4	49,1	25
17	6,0	18,0	52,9	85,0	48,0	28,2	43,5	20
18	9,0	5,0	34,2	50,0	25,1	–	46,8	37
19	9,0	5,0	32,9	–	–	–	39,5	33
20	8,0	3,0	29,0	39,8	28,6	9,8	51,7	40
21	8,0	5,0	31,0	45,2	34,8	9,8	55,7	41
22	8,0	5,0	18,5	27,6	20,3	16,1	48,5	52

Примечание: Прирост культур в высоту изучался в 2005 (на ПП 1–11) и в 2017 гг. (на ПП 11, 13–22). *За 6 лет. **За 4 года.

Средний прирост сосны в высоту в первые 1–2 десятилетия после смыкания крон в насаждении (табл. 2), т. е. в период максимума его потребности во влаге, непродуктивного испарения осадков и отсутствия влияния агротехнических

уходов, на разных по почвенно-грунтовым условиям участках Волго-Ахтубинской поймы имеет большую пестроту.

На участках с мало- и среднемощными супесчаными и суглинистыми почвами, подстилаемыми аллювиальным песком при глубоком залегании ГВ, в первые 10 лет жизни молодняка прирост не достигает 40 см, а за следующие 10 лет уменьшается до 25–26 см (ПП 6 и 9). Уже к 25–30 годам бонитет насаждений снижается до II,5–III класса (см. табл. 1, рис. 1). Эоловая переработка маломощной почвы (облегчение гранулометрического состава покровных отложений) несколько улучшает лесорастительные условия. На переветренных участках средний прирост в молодняках (до 20 лет) составляет 40–50 см, а затем снижается до среднего уровня (25–35 см). Культуры до 25–30 лет соответствуют I–II, а позднее II–II,5 классам бонитета (ПП 8, 14, 18, 20, 21).

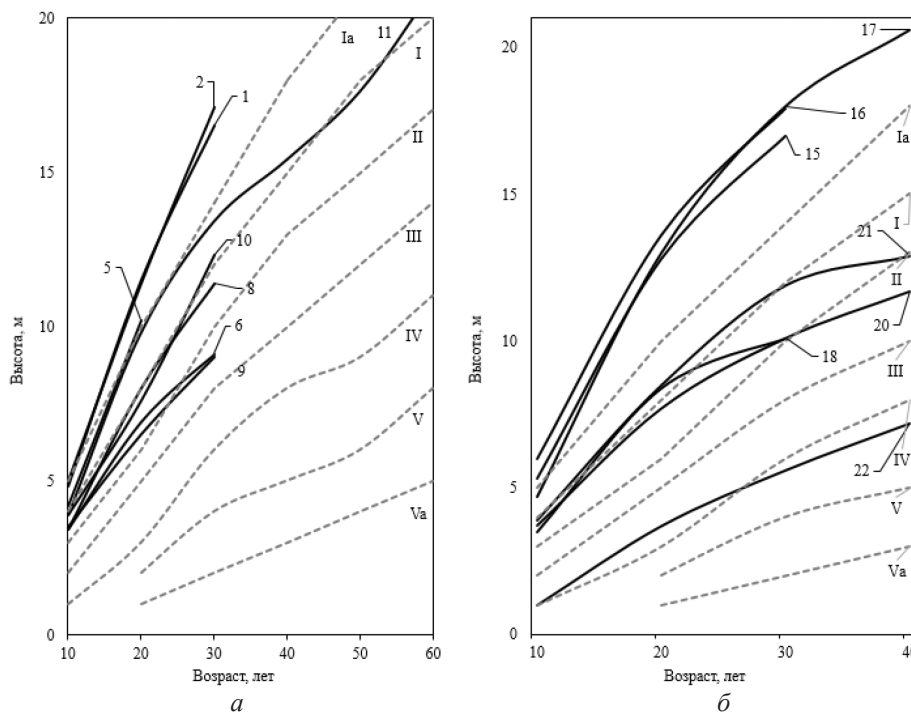


Рис. 1. Ход роста в высоту и бонитет (I–V) древостоя сосны на различных экотопах Волго-Ахтубинской поймы: а – ПП 1, 2, 5, 6, 8–11; б – ПП 15–18 и 20–22

Fig. 1. Height growth rate and quality class (I–V) of pine stands on various ecotopes of the Volga-Akhtuba floodplain: а – sample areas 1, 2, 5, 6, 8–11; б – 15–18 and 20–22

Следует отметить, что, несмотря на замедленный рост (в 40 лет бонитет насаждения ниже IV класса), на однофазных аллювиальных песках здоровые устойчивые насаждения образует сосна крымская *Pinus pallasiana* Lamb., произрастающая на ПП 22 (см. табл. 2 и рис. 1). Повышенная отзывчивость текущего прироста этого вида на атмосферные осадки апреля–июня ($r = 0,42–0,56$), по-видимому, обусловлена высокой охвоенностью деревьев и большим коэффициентом транспирационной активности, чем у сосны обыкновенной.

На легких и средних почвах (супесчаных и суглинистых), подстилаемых мощными слоистыми грунтами (ПП 11, 13, 15–17), в 1-е десятилетие средний прирост сосны в молодняках составляет 60–70 см и более, а во 2-е уменьшается до 35–45 см.

На легких мощных почвогрунтах после достижения корнями капиллярной каймы ГВ он снова существенно увеличивается (ПП 11) – производительность насаждений на разных по капиллярности подстилающих породах выравнивается.

В целом насаждения сосны обыкновенной на таких экотопах до 40–60 лет развиваются по I–Ia бонитетам и выше. Однако на суглинках вследствие активного роста в первые 3–4 десятилетия и большой потребности во влаге высокополнотные древостои сосны обыкновенной в аномальные годы подвержены риску критического снижения влагообеспеченности – при совпадении острозасушливых лет с низким уровнем весеннего стока – следствием может быть внезапное расстройство древостоя и его распад. В этих условиях преимущество в устойчивости и долговечности имеют насаждения более засухоустойчивой сосны крымской [2, 3, 6, 11].

Особые условия водного режима древостоя формируются на дренируемых участках переходной поймы с ГВ ближе 3,0–3,5 м к поверхности. Экотопы можно разделить на 2 группы: сложенные преимущественно песчаным и слоистым многофазным аллювием. В 1-е годы жизни культуры сосны растут на них так же, как и на отложениях аналогичного строения высокой поймы. На песчаных почвогрунтах сосна достигает слоя постоянного увлажнения ГВ только к 10–15 годам и во 2-м десятилетии ее рост либо усиливается, либо остается на относительно высоком уровне (на ПП 10 средний прирост в высоту около 40 см). На многофазных отложениях слой постоянного грунтового увлажнения достигается корнями раньше и примерно до 30 лет насаждения растут наиболее энергично (бонитет – выше Ia) – средний прирост в высоту составляет 60–75 см (ПП 1, 2, 4, 5), а в последующее десятилетие он уменьшается, но остается значительным. В этих условиях сосна обыкновенная способна формировать производительные и долговечные насаждения, а также образовывать смешанные с лиственными породами (робинией, ильмом, вязом приземистым и др.) древостои.

Связь среднего прироста насаждений в высоту (Zh_{cp} , см) с почвенно-грунтовыми условиями – средневзвешенным содержанием физической глины в КС (Гл, %) и глубиной залегания зеркала ГВ в межень (УГВ, м) – за периоды с 11 до 20 лет (после смыкания крон), с 21 до 30 лет и всей жизни насаждения (А) подчиняется функциям: $Zh_{cp(11-20)} = 48,86 + 1,11Гл - 0,78УГВ$ ($R^2 = 52,9\%$); $Zh_{cp(21-30)} = 59,26 - 0,25Гл - 2,86УГВ$ ($R^2 = 44,7\%$); $Zh_{cp(A)} = 53,24 - 2,23УГВ + 0,31Гл$ ($R^2 = 57,8\%$).

Из них следует, что в пойменных условиях положительное влияние влагоемкости и минерального богатства КС на рост сосновых культур уменьшается с их возрастом с 50,5 % в 11–20 лет до мало ощутимой величины (8–9, %) в 21–30 лет. На протяжении всей жизни насаждений оно составляет около 41 % и свидетельствует о повышенном значении данных факторов для соснового древостоя в 1-е годы его жизни. Влияние глубины залегания ГВ, напротив, увеличивается соответственно с 19 до 41 %, а в течение жизни древостоя составляет около 53 %, т. е. в этих условиях по мере взросления насаждений интенсивность их роста все больше зависит от доступности ГВ и после 10–15 лет корреляционная связь прироста и УГВ становится сильной.

Наиболее интегральным показателем качества лесорастительных условий является период большого роста сосны (ПБР). Для всей совокупности изучаемых насаждений он подчиняется следующим функциям: $ПБР = 28,78 - 0,12Гл - 0,68УГВ$ ($R^2 = 16,9\%$); $ПБР = 25,09 + 0,08Гл$ ($r^2 = 47,0\%$); $ПБР = 26,40 -$

– 0,50УГВ ($r^2 = 11,5 \%$). Из них следует, что на экотопах Волго-Ахтубинской поймы продолжительность этого периода в наибольшей мере лимитируется минеральным богатством почвенного раствора. Повышенное содержание физической глины и буферной влаги в КС ускоряет рост молодняков, но с возрастом древостоя этот эффект сходит на нет. Положительное влияние богатства почвы на рост сосны в исследуемых древостоях значительно вследствие небольшого возраста преобладающей части насаждений.

Опускание уровня ГВ глубже 2,5–3,0 м в большинстве случаев ведет к сокращению периода большого роста, т. е. ухудшает лесорастительные условия. Отсюда следует, что различное сочетание основных экологических факторов дает разный лесорастительный эффект. Так, отдельный анализ хода роста свидетельствует об увеличении до 57 % влияния контакта корней с ГВ на рыхлых однофазных песках крупногравитой поймы (ПП 18, 20 и 21) как о факторе, определяющем продолжительность большого роста сосны. Небольшие (1–2 %) различия в содержании физической глины на протяженность периода практически не влияют: ПБР = $44,0 + 1,0Гл - 3,0УГВ$ ($R^2 = 100 \%$); ПБР = $22,25 + 0,25Гл$ ($r^2 = 3,6 \%$); ПБР = $40,0 - 2,0УГВ$ ($r^2 = 57 \%$).

На почвенных разностях, развитых на мощных, преимущественно суглинистых отложениях (ПП 2, 13, 15–17), влияние на рост сосны УГВ снижается до 41 % и становится отрицательным (приближение зеркала к поверхности нередко сокращает период большого роста), а связь УГВ с содержанием физической глины повышается до слабой: ПБР = $19,31 + 0,03Гл + 1,13УГВ$ ($R^2 = 41 \%$); ПБР = $21,70 + 0,13Гл$ ($r^2 = 11 \%$); ПБР = $19,62 + 1,19УГВ$ ($r^2 = 30 \%$).

На супесчаной и суглинистой мало- и среднемощной почве, подстилаемой песком (ПП 1, 5, 6, 8), наоборот, близко расположенные ГВ увеличивают продолжительность большого роста и долговечность древостоев сосны, а утяжеление гранулометрического состава почвы при глубоком залегании подпертой влаги сокращает их: ПБР = $23,69 - 0,39Гл + 1,21УГВ$ ($R^2 = 50 \%$); ПБР = $28,26 - 0,47Гл$ ($r^2 = 44 \%$); ПБР = $141,50 - 45,00УГВ$ ($r^2 = 92 \%$).

На слоистых, преимущественно легких (песчано-супесчаных) отложениях (ПП 9–11) позитивное влияние экологических факторов на рост сосновых насаждений уравнивается и достигает максимальной величины: ПБР = $59,87 + 2,13Гл - 12,67УГВ$ ($R^2 = 100 \%$); ПБР = $5,81 + 3,74Гл$ ($r^2 = 89 \%$); ПБР = $110,76 - 23,02УГВ$ ($r^2 = 88 \%$). Последнее свидетельствует о том, что пригодность таких экотопов для сосняков быстро снижается как с облегчением гранулометрического состава почвогрунта при глубоком залегании ГВ, так и с понижением зеркала ГВ при легком составе отложений. Однако при наиболее частом сочетании этих факторов в условиях переходной поймы лесопригодность экотопов становится максимальной и приводит к снижению значения других факторов, в том числе хозяйственных, при культивировании насаждений.

Наибольший текущий прирост по диаметру (6–12 мм/год) сосна имеет до 8–12 лет во всем диапазоне лесорастительных условий гравитой поймы (рис. 2). Максимальной величины этот показатель достигает в насаждениях на относительно богатых почвах, мощных слоистых почвогрунтах (15–25 % физической глины в КС) и при близком залегании ГВ. На протяжении последующих десятилетий радиальный прирост уменьшается (рис. 3), но наравне со спадами испытывает и подъемы.

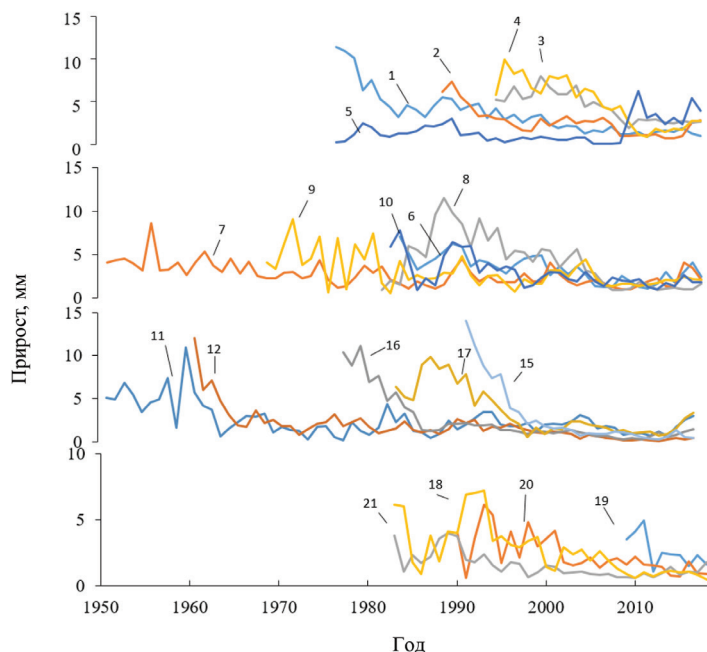


Рис. 2. Текущий прирост по диаметру стволов сосны в древостоях на различных экотопах Волго-Ахтубинской поймы на ПП 1–12, 15–21 (радиальный прирост культур изучался в 2018 г., в ноябре)
 Fig. 2. Current radial growth of pine stands in various ecotopes of the Volga-Akhtuba floodplain at the sample areas 1–12, 15–21 (radial growth of plantations was studied in November, 2018)

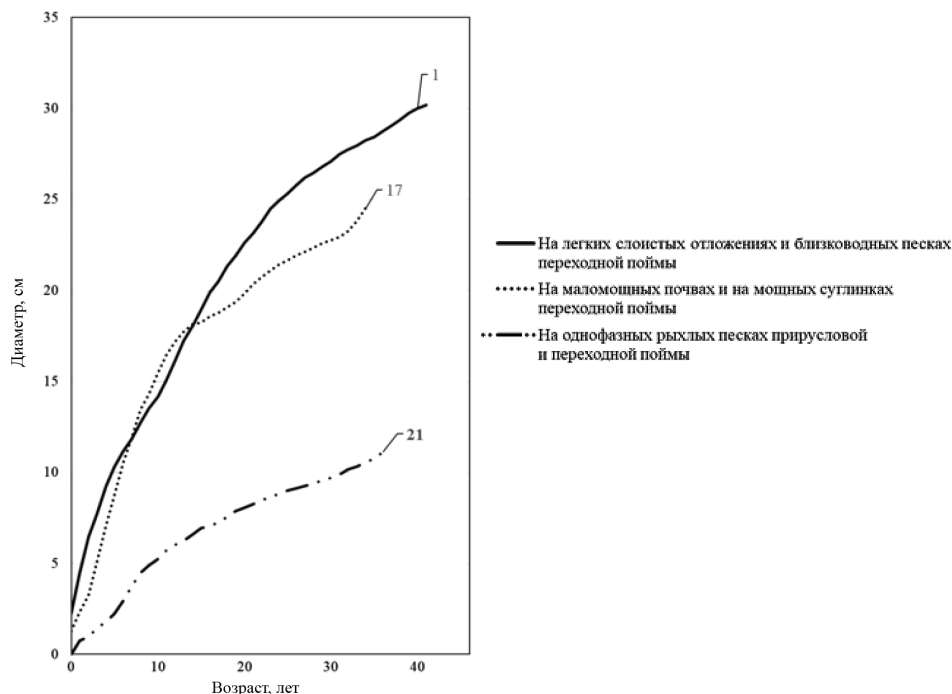


Рис. 3. Ход роста по диаметру сосны в древостоях на различных экотопах Волго-Ахтубинской поймы на ПП 1, 17 и 21 (радиальный прирост культур изучался в 2018 г., в ноябре)
 Fig. 3. Radial growth rate of pine stands in various ecotopes of the Volga-Akhtuba floodplain at the sample areas 1, 17 and 21 (radial growth of plantations was studied in November, 2018)

С увеличением возраста насаждений колебания прироста также уменьшаются и являются результирующей множества факторов, определяющих влагообеспеченность древостоя, что не позволяет легко проследить влияние суммы атмосферных осадков. Тем не менее можно утверждать, что спады прироста, как правило, приходится на засушливые годы. Наибольшее влияние на годовичное кольцо оказывают суммы осадков за весь текущий ГГ, за апрель–октябрь и июль–сентябрь. Максимум (16–36 %) оно достигает в наиболее высокополнотных насаждениях, насаждениях на легких почвах и особенно на мощных рыхлых песках крупногравистой поймы.

Кривая прироста ранней древесины почти в точности повторяет кривую прироста годовичного кольца и достаточно динамична, а поздней – более стабильна (табл. 3). Прирост поздней древесины у сосны на пойменных землях в наибольшей степени, но относительно слабо (на 5–10 %), обусловлен осадками за июль–сентябрь. Исключение составляют быстро растущие молодняки и насаждения на мощных низковлагодомных песках, где величина этого показателя прямо и сильно (на 40–42 %) зависит от суммы осадков за обозначенный период. С повышением доступности ГВ влияние осадков снижается до 1–6 %.

Таблица 3

**Экологические условия и радиальный прирост культур сосны
в Волго-Ахтубинской пойме
Environmental conditions and radial growth of pine plantations
in the Volga-Akhtuba floodplain**

№ ПП	УГВ, м	Средневзвешенное содержание физической глины, %	Средний прирост р / п / г, мм			
			за всю жизнь	11–20 лет	21–30 лет	31–40 лет
1	2,5	6,0	2,8 / 0,8 / 3,6	3,1 / 1,1 / 4,2	1,9 / 0,5 / 2,4	1,1 / 0,4 / 1,5
2	2,3	8,5	1,9 / 0,7 / 2,6	1,7 / 0,9 / 2,6	1,0 / 0,3 / 1,3	–
3	3,5	25,0	3,4 / 1,0 / 4,4	2,4 / 1,0 / 3,4	1,9 / 0,7 / 2,6*	–
4	3,5	18,0	3,5 / 1,4 / 4,9	2,1 / 1,2 / 3,3	1,6 / 0,7 / 2,3*	–
5	2,7	19,0	2,0 / 0,9 / 2,9	2,9 / 1,4 / 4,3	1,5 / 0,6 / 2,1	0,6 / 0,2 / 0,8
6	>5,0	4,0	2,8 / 0,7 / 3,4	3,0 / 0,7 / 3,7	1,4 / 0,5 / 1,9	1,9 / 1,0 / 2,9 **
7	>5,0	13,5	2,1 / 0,6 / 2,7	2,7 / 0,8 / 3,5	1,8 / 0,8 / 2,6	1,4 / 0,3 / 1,9
8	>5,0	3,0	3,4 / 0,8 / 4,2	4,4 / 1,6 / 6,0	2,2 / 0,5 / 2,7	1,0 / 0,2 / 1,2***
9	>5,0	6,0	1,3 / 1,7 / 3,0	0,7 / 2,7 / 3,4	1,9 / 0,6 / 2,5	2,0 / 0,5 / 2,5
10	3,2	5,0	2,4 / 0,5 / 2,9	2,3 / 0,5 / 2,8	0,4 / 0,6 / 2,0	1,3 / 0,4 / 1,7****
11	>5,0	13,5	1,9 / 0,6 / 2,5	2,2 / 0,7 / 2,9	0,8 / 0,5 / 1,3	1,4 / 0,5 / 1,9
12	>5,0	11,0	1,3 / 0,6 / 1,9	1,0 / 1,0 / 2,0	0,8 / 0,6 / 1,4	1,2 / 0,6 / 1,8
15	4,0	25,0	2,4 / 0,5 / 2,9	0,8 / 0,3 / 1,1	0,5 / 0,1 / 0,6	–
16	4,0	23,0	1,9 / 0,5 / 2,5	1,3 / 0,5 / 1,8	0,7 / 0,3 / 1,0	0,4 / 0,3 / 0,7
17	6,0	18,0	2,7 / 0,8 / 3,5	1,8 / 0,7 / 2,5	1,2 / 0,4 / 1,6	1,3 / 0,5 / 1,9**
18	9,0	5,0	1,9 / 0,7 / 2,7	2,1 / 1,2 / 3,3	1,3 / 0,3 / 1,6	0,7 / 0,2 / 0,9 / **
20	8,0	3,0	2,1 / 0,3 / 2,4	1,8 / 0,4 / 2,2	1,0 / 0,3 / 1,3	–
21	8,0	5,0	1,2 / 0,3 / 1,5	1,0 / 0,4 / 1,4	0,6 / 0,2 / 0,8	0,8 / 0,3 / 1,2****
22	8,0	5,0	2,4 / 0,3 / 2,9	0,8 / 0,3 / 1,1	0,5 / 0,1 / 0,6	–

Примечание: Средний прирост – средняя толщина годовичного кольца: р – ранней древесины; п – поздней; г – всего годовичного кольца. *За 4 года. **За 5 лет. ***За 7 лет. ****За 6 лет.

Средний прирост ранней древесины у сосны в условиях Волго-Ахтубинской поймы варьирует от 3,5 до 1,2 мм/год. Он выше (2,8–3,5 мм) в насаждениях на связных слоистых грунтах и при близком залегании ГВ и увеличивается вместе с содержанием физической глины в КС. Самый низкий темп (в среднем 1,7 мм/год) прироста ранней древесины наблюдается у культур на высоких песчаных экотопах гривистой поймы (ПП 9, 14, 18–21).

Средний прирост поздней древесины сосны составляет 0,3–1,7 мм/год. Самые высокие значения (0,8–1,7 мм) он имеет в разреженных насаждениях, произрастающих на супесчаных слоистых почвогрунтах (ПП 9). Средним темпом прироста поздней древесины характеризуются насаждения на суглинистых отложениях, а наименьшим (0,3–0,4 мм) – на мощных рыхлых песках.

Несколько иной закономерности подчиняется доля поздней древесины в структуре радиального прироста. Несмотря на его значительные различия, она увеличивается с 13–16 % у сосны на мощных песках и суглинках до 25–30 % у сосны на территориях с относительно близким залеганием воды к поверхности. Строгой зависимости от гранулометрического состава КС при этом нет.

Средний прирост годового кольца сосны в насаждениях северной части Волго-Ахтубинской поймы как результирующая приростов ранней и поздней древесины подчиняется общей закономерности и варьирует в пределах 4,9 (ПП 4) – 1,5 мм (ПП 21). С увеличением возраста древостоя он снижается и достигает минимума после 30–35 лет.

Заключение

Таким образом, в северной части Волго-Ахтубинской долины (примерно до линии Капустин Яр – Каменный Яр) с усилением слоистости, утяжелением гранулометрического состава корнеобитаемого слоя до супесчаного, понижением высоты при небольшом удалении от дренирующего русла влагообеспеченность и рост культур сосны обыкновенной улучшаются, а пригодность экотопов гривистой поймы для них повышается. С понижением уровня экотопов и ухудшением дренируемости почвогрунтов растет опасность гибели сосняков в периоды высоких и экстремальных половодий и паводков. По этим показателям, а также условиям создания лесных культур, производительности и долговечности насаждений экотопы можно объединить в следующие относительно однородные группы (классы).

Наименее благоприятны для произрастания сомкнутых древостоев сосны высокие экотопы гривистой и переходной поймы с маломощными почвами различного состава на однофазных рыхлых песках при глубоком (более 4–5 м) залегании зеркала грунтовых вод в межень. На переветренных участках условия несколько улучшаются, повышается производительность насаждений, но в целом бонитет спелых древостоев не превысит здесь II,5–III класса, долговечность – 50 лет. Однако культивирование сосны на таких экотопах вследствие простоты агротехнических приемов наименее энергоемко и не имеет альтернативы.

Наиболее благоприятные условия для произрастания монокультур сосны имеют хорошо дренируемые участки переходной поймы с легкими почвами на мощных слоистых, преимущественно супесчаных отложениях, а также на песках с близким к поверхности залеганием грунтовой воды. При относительно низкой затратности лесокультурных и лесоводственных мероприятий бонитет спелых насаждений здесь может достигать I класса, а долговечность – 60–80 лет и более.

Средними по условиям для культур сосны обыкновенной являются слабодренируемые участки переходной поймы с маломощными супесчаными и суглинистыми почвами на мощных суглинках. При высокой энергии роста и производительности в первые 3 десятилетия (бонитет насаждений – Ia и выше) древостой быстро созревают и распадаются вследствие большой потребности во влаге и резкого снижения влагообеспеченности в маловодные и засушливые годы. Без своевременных лесоводственных уходов – прореживания – продолжительность жизни насаждений в таких условиях не превысит 40–45 лет.

Экотопы средней группы целесообразно отводить под выращивание сырьевых плантаций сосны обыкновенной или многоцелевые насаждения сосны крымской, ценных лиственных пород. Особенностью их культивирования является необходимость большого числа агротехнических уходов, прореживания молодняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с.
Bitvinskask T.T. *Dendroclimatic Studies*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p. (In Russ.).
2. Брылев В.А., Овчарова А.Ю. Эколого-экономическая оптимизация обводнения Волго-Ахтубинской поймы // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естеств. науки. 2013. № 5(177). С. 67–70.
Brylev V.A., Ovcharova A.Yu. Ecological and Economic Optimization of Irrigation of the Volga-Akhtuba Floodplain. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2013, no. 5(177), pp. 67–70. (In Russ.).
3. Гаель А.Г., Зюзь Н.С. Строение культур сосны на песчаных почвах степного Дона // Биол. науки. 1985. № 7. С. 85–92.
Gayel' A.G., Zyuz' N.S. Structure of Pine Plantations on Sandy Soils of the Steppe Don. *Biologicheskkiye nauki*, 1985, no. 7, pp. 85–92. (In Russ.).
4. Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство): нац. докл. / под ред. А.И. Бедрицкого. М.: ГЕОС, 2018. 357 с.
Global Climate and Soil Cover of Russia: Assessment of Risks and Eco-Economic Consequences of Land Degradation. Adaptive Systems and Technologies of Rational Nature Management (Agriculture and Forestry): National Report. Ed. by A.I. Bedritskiy. Moscow, GEOS Publ., 2018. 357 p. (In Russ.).
5. Голуб В.Б., Чувашов А.В., Бондарева В.В., Герасимова К.А., Николайчук Л.Ф. Изменения состава флоры Волго-Ахтубинской поймы после зарегулирования водного стока р. Волги // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 1(82). С. 54–61
Golub V.B., Chuvashov A.V., Bondareva V.V., Gerasimova K.A., Nikolaichuk L.F. Changes in the Flora Composition of the Volga-Akhtuba Floodplain after Regulation of the Flow of Volga River. *Arid Ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 1(82), pp. 54–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10083>
6. Горелиц О.В., Землянов И.В. Современный механизм заливания территории Волго-Ахтубинской поймы в период половодий (в пределах Волгоградской области) // Научный потенциал регионов на службу модернизации. 2013. № 2(5). С. 9–18.
Gorelits O.V., Zemlyanov I.V. Modern Mechanism of Flooding the Volga-Akhtuba Floodplain during Seasonal Floods (Within the Volgograd Region). *Nauchnyy potentsial regionov na sluzhbu modernizatsii*, 2013, no. 2(5), pp. 9–18. (In Russ.).

7. Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. 2014. № 3(60). С. 14–32.

Kuz'mina Zh.V., Treshkin S.Ye. Climate Change in the Lower Volga Basin and Its Influence on the Ecosystems. *Arid Ecosystems*, 2014, no. 3(60), pp. 14–32 (In Russ.).

8. Лобойко В.Ф., Овчарова А.Ю., Никитина Н.С. Особенности водного режима Нижней Волги и его влияние на состояние северо-западной части Волго-Ахтубинской поймы // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса. 2018. № 4(52). С. 159–173.

Loboyko V.F., Ovcharova A.Yu., Nikitina N.S. Features of the Water Regime of the Lower Volga and Its Impact on the Condition of the North-Western Part of the Volga-Akhtuba Floodplain. *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex*, 2018, no. 4(52), pp. 159–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-12>

9. Манаенков А.С. Особенности водного режима корнеобитаемого слоя и засухоустойчивость культур сосны // Лесоведение. 2009. № 2. С. 52–61.

Manaenkov A.S. Specific Features of the Water Regime in Root-Dwelling Layer and Drought-Resistance of Pine Plantations. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2009, no. 2, pp. 52–61. (In Russ.).

10. Манаенков А.С. Лесомелиорация арен засушливой зоны. 2-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 428 с.

Manaenkov A.S. *Forest Reclamation of Arid Zone Arenas*. Volgograd, Federal Scientific Center of Agroecology RAS Publ., 2018. 428 p. (In Russ.).

11. Манаенков А.С., Сурхаев Г.А., Сурхаев И.Г. Особенности облесения песчаных земель Терско-Кумского междуречья культурами сосны // Лесн. хоз-во. 2010. № 5. С. 36–38.

Manaenkov A.S., Stepanova Z.A., Surkhayev I.G. Features of Afforestation of Sandy Lands of the Terek-Kum Interfluvium with Pine Plantations. *Lesnoye khozyaystvo*, 2010, no. 5, pp. 36–38. (In Russ.).

12. Методические рекомендации по проектированию рубок ухода в искусственных молодняках сосны степной зоны ЕТР / разраб. и подгот. А.С. Манаенков. М.: Россельхозакадемия, 2004. 34 с.

Manaenkov A.S. *Methodology Recommendations for the Thinning Design in Artificial Young Pine Stands of the Steppe Zone of the European Part of Russia*. Moscow, Rossel'khozakademiya Publ., 2004. 34 p. (In Russ.).

13. Миронов В.В. Экология хвойных пород при искусственном лесоразведении. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 232 с.

Mironov V.V. *Conifers Ecology in Artificial Afforestation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 232 p. (In Russ.).

14. Орлов А.Я., Кошельков С.П. Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с. Orlov A.Ya., Koshel'kov S.P. *Soil Ecology of Pine*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 323 p. (In Russ.).

15. Прозоров Н.А. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны обыкновенной как один из показателей изменчивости экологических условий ее произрастания на песках степной зоны // Лесомелиорация и ландшафт: сб. науч. тр. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1993. Вып. 1(105). С. 145–157.

Prozorov N.A. Influence of Climatic Factors on the Scots Pine Radial Growth as an Indicator of Environmental Conditions Variability of Pine Growth on the Steppe Zone Sands. *Forest Reclamation and Landscape: Collection of Academic Papers*. Volgograd, VNIALMI Publ., 1993, iss. 1(105), pp. 145–157. (In Russ.).

16. Шенпель П.А. Паводок и пойма. Волгоград: Ниж.-Волж. кн. изд-во, 1986. 241 с. Sheppel' P.A. *River Flood and Floodplain*. Volgograd, Nizhne-Volzhskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1986. 241 p. (In Russ.).

17. De Resende A.F., Schöngart J., Streher A.S., Ferreira-Ferreira J., Fernandez Piedade M.T., Freire Silva T.S. Massive Tree Mortality from Flood Pulse Disturbances in Amazonian Floodplain Forests: The Collateral Effects of Hydropower Production. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 659, pp. 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.208>

18. Fan H., He D., Wang H. Environmental Consequences of Damming the Mainstream Lancang-Mekong River: A Review. *Earth-Science Reviews*, 2015, vol. 146, pp. 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.03.007>

19. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E., Karimova T.Yu. Effects of River Flow Regulation and Climate Fluctuations on Dynamic Changes in the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Delta and Floodplain. *Arid Ecosystems*, 2015, vol. 5, pp. 230–242. <https://doi.org/10.1134/S2079096115040071>

20. Zhao P., Cornelis W., Tang X., Zhao P., Tang J. Does Damming Streams Alter the Water Use Strategies of Riparian Trees? A Case Study in a Subtropic Climate. *Land Degradation & Development*, 2020, vol. 31, iss. 8, pp. 927–938. <https://doi.org/10.1002/ldr.3500>

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 630*378.33

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155

Обоснование показателя гибкости плота из сплоченных единиц

В.В. Васильев¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [ABG-5020-2021](https://orcid.org/0000-0002-5763-1650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5763-1650>

Д.Н. Афоничев², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-8541-2017](https://orcid.org/0000-0001-9066-6428),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

¹Филиал АО «Управляющая Компания ЭФКО» в г. Алексеевке, ул. Фрунзе, д. 2, г. Алексеевка, Белгородская обл., Россия, 309850; vasiliev.vladimir87@mail.ru

²Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, д. 1, г. Воронеж, Россия, 394087; dmafonichev@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.03.21 / Одобрена после рецензирования 10.06.21 / Принята к печати 14.06.21

Аннотация. Для обеспечения безаварийного сплава лесоматериалов в плотах на малых и средних реках следует учитывать особенности формирования гибкости плота и выполнять необходимые при этом расчеты. Цель исследования – разработка усовершенствованной методики вычисления показателей, обеспечивающих гибкость плота, изготавливаемого из плоских сплоченных единиц. Гибкость плота формируется через установление оптимального интервала между плоскими сплоченными единицами, который непосредственно влияет на показатель гибкости. Минимально допустимый интервал между сплоченными единицами зависит от длины лежней в линейке: лежня, проложенного вдоль выпуклого борта, и лежня, проложенного вдоль вогнутого борта. Длина данных лежней в лесотранспортной единице будет определяться минимальным радиусом поворота сплавного хода, шириной линейки, длиной плоских сплоченных единиц и расстоянием от борта плота до лежня. При установлении оптимального интервала между плоскими сплоченными единицами и гибкости плота принято, что линейка из плоских сплоченных единиц, независимо от сильного свального течения, проходит в габаритах сплавного хода, где ось сплавного хода совпадает с осью плота, а плоские сплоченные единицы, расположенные между 1-й и последней сплоченными единицами, могут свободно перемещаться в продольном направлении. Используя предложенную методику расчета гибкости плота, исследовали зависимости интервала между плоскими сплоченными единицами в плоту от минимального радиуса поворота сплавного хода, ширины линейки и длины плоских сплоченных единиц. Установили, что при увеличении радиуса поворота сплавного хода интервал между плоскими сплоченными единицами уменьшается, а коэффициент гибкости плота увеличивается. Интервал между плоскими сплоченными единицами становится больше с ростом ширины плоских сплоченных единиц, а коэффициент полндревесности плота в этом случае уменьшается. При увеличении длины плоской сплоченной единицы интервал между плоскими сплоченными единицами растет – коэффициент полндревесности плота снижается.



Ключевые слова: плотовой сплав лесоматериалов, сплавной ход, плот, плоская сплотовая единица, лежень, интервал, гибкость плота

Для цитирования: Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Обоснование показателя гибкости плота из сплотовых единиц // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 146–155. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-146-155>

Original article

Flexibility Justification of a Raft Made of Raft Units

*Vladimir V. Vasiliev*¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABG-5020-2021](https://orcid.org/0000-0002-5763-1650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5763-1650>

*Dmitry N. Afonichev*², Doctor of Engineering, Prof; ResearcherID: [J-8541-2017](https://orcid.org/0000-0001-9066-6428),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

¹Branch of OOO “EFKO Management Company” in the city of Alekseyevka, ul. Frunze, 2, Alekseyevka, Belgorod Region, 309850, Russian Federation; vasiliev.vladimir87@mail.ru

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, ul. Michurina, 1, Voronezh, 394087, Russian Federation; dmafonichev@yandex.ru

Received on March 5, 2021 / Approved after reviewing on June 10, 2021 / Accepted on June 14, 2021

Abstract. In order to provide accident free timber rafting on small and medium-sized rivers, it is necessary to consider in detail the features of ensuring the raft flexibility with all the necessary calculations. The research aims at developing an improved methodology for calculating the parameters that ensure the flexibility of a raft made of flat raft units. The raft flexibility is formed through the optimal interval between flat raft units, which directly affects the flexibility index. The minimum allowable interval between raft units depends on the length of guard rails in the section line: the guard rail laying along the section line convex side and the guard rail laying along the section line concave side. Length of the guard rails in the timber transportation unit will be determined by the minimum turning radius of the rafting course, the section line width, the length of flat raft units and the distance from the raft board to the guard rail. When determining the optimal interval between the flat raft units and the raft flexibility, it is assumed that the section line of flat raft units, regardless of a strong piling current, passes within the raft course dimensions, where the raft course axis coincides with the raft axis, and the flat raft units located between the 1st and the last flat raft units can move freely in the longitudinal direction. We have studied the dependences of the interval between flat raft solid units on the minimum turning radius of the raft course, the section line width and the length of flat raft units, using the proposed methodology for calculating raft flexibility. We have found that with increasing turning radius of the rafting course, the interval between the flat raft units decreases, and the raft flexibility index increases. The interval between flat raft units becomes larger as the width of flat raft units increases and the coefficient of raft section density decreases in this case. As the length of the flat raft unit increases, the interval between flat raft units increases; the coefficient of raft section density decreases.

Keywords: timber rafting, rafting course, raft, flat raft unit, guard rail, interval, raft flexibility index

For citation: Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Flexibility Justification of a Raft Made of Raft Units. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 4, pp. 146–155 (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-146-155>



Введение

В настоящее время лесные насаждения, в составе которых есть спелая высококачественная древесина, как правило, произрастают в труднодоступных местах, где отсутствуют дороги [14, 18, 19]. В таких условиях единственным экономически выгодным видом транспорта является водный транспорт, так как в лесных районах развита сеть малых и средних рек [11, 12, 15, 17]. Для того чтобы осуществить перевозку лесоматериалов по воде, их грузят на баржи и суда [13] или изготавливают из круглых лесоматериалов сплотовые единицы с последующим формированием из них плотов различных конструкций [3, 4, 6, 16, 20].

Выполнение работ по сплаву лесоматериалов в плотках требует обеспечения высоких транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортных единиц (линеек, плотов), предназначенных для первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов [3, 4, 6, 8–10]. Основными такими показателями необходимо считать следующие [1–5, 7]: габаритные размеры, гибкость, коэффициент полнодревесности, объем, форму, способ и эффективность формирования, сопротивление движению, способ управления и управляемость, волноустойчивость, прочность.

При организации сплава лесоматериалов в плотках на малых и средних реках при первоначальном плотовом сплаве следует ориентироваться на изготовление плотов из плоских сплотовых единиц. Для организации безаварийной проводки плотов по транспортным путям с лимитирующими габаритами сплавного хода в первую очередь необходимо правильно рассчитать габаритные размеры плотов, а также обеспечить при изготовлении их достаточную гибкость.

Основная методика расчета габаритных размеров плотов для первоначального плотового сплава лесоматериалов описана в источниках [5, 7]. В то время как технология обеспечения гибкости данных плотов [5] и все приведенные расчеты имеют общий характер и подходят только для плотов традиционной конструкции. Таким образом, для организации безаварийного сплава лесоматериалов в плотках на малых и средних реках следует рассмотреть особенности обеспечения гибкости плота и выполнить необходимые при этом расчеты.

Цель исследования – разработка усовершенствованной методики расчета показателей, обеспечивающих гибкость плота из плоских сплотовых единиц.

Объекты и методы исследования

Обеспечение гибкости плота, изготовленного из плоских сплотовых единиц, осуществляется через установление оптимального интервала между плоскими сплотовыми единицами $i_{\text{ПСЕ}}$. При этом он будет непосредственно влиять на показатель гибкости плота $\lambda_{\text{ПДЛ}}$. Принят теоретический метод исследования.

В практических условиях при формировании плотов, предназначенных для первоначального плотового сплава древесины, расположение лежней относительно ряда плоских сплотовых единиц имеет 2 варианта. Первый вариант, который предусматривает расположение лежня по борту плота, представлен на рис. 1, а. Второй вариант, приведенный на рис. 1, б, регламентирует отнесение лежня от бортов плота на расстояние $a_{\text{БЛ}}$.

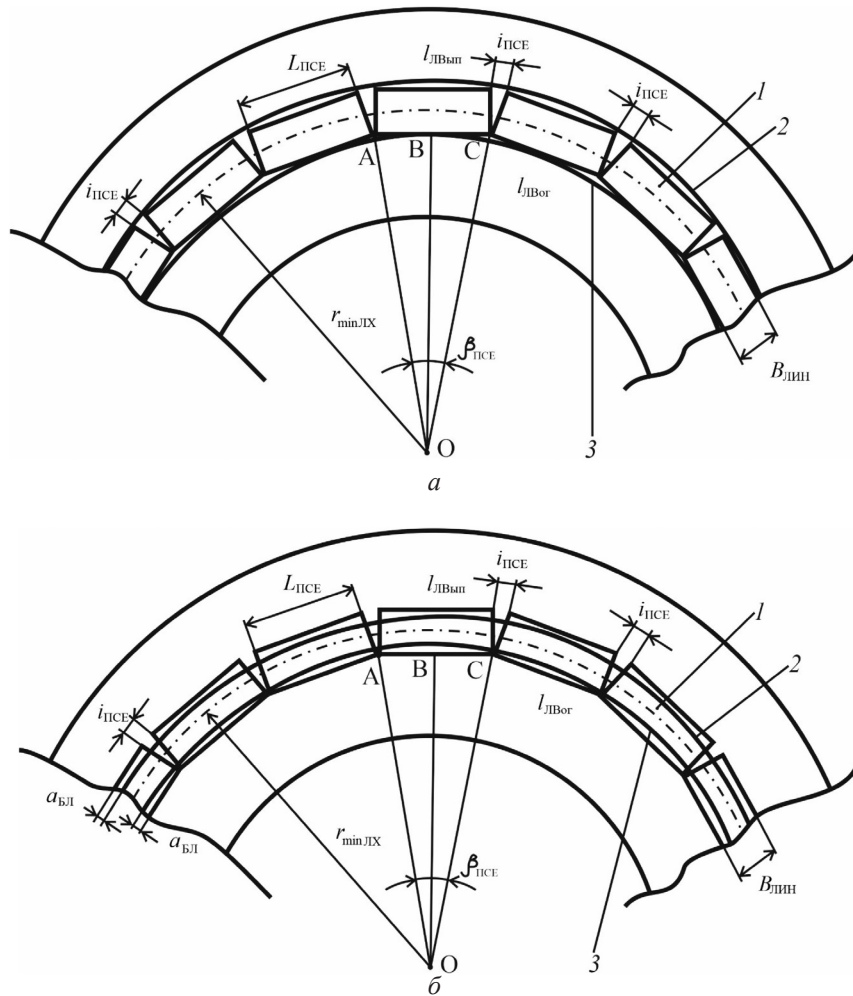


Рис. 1. Схема расположения линейки из плоских сплочных единиц на криволинейном участке сплавного хода: *а* – 1-й вариант; *б* – 2-й вариант (*1* – плоская сплочная единица; *2* – бортовой лежень, проложенный по выпуклому борту линейки; *3* – бортовой лежень, проложенный по вогнутому борту линейки)

Fig. 1. Layout of a raft section line on a curved part of the rafting course: *a* – 1st option; *b* – 2nd option (*1* – flat raft unit; *2* – guard rail laying along the section line convex side; *3* – guard rail laying along the section line concave side)

Анализируя схемы, представленные на рис. 1, можно сделать вывод, что минимально допустимый интервал между сплочными единицами зависит от длины лежня в линейке, проложенного вдоль выпуклого борта $l_{\text{Выв}}$, и длины лежня в линейке, проложенного вдоль вогнутого борта $l_{\text{Вор}}$. В свою очередь длина данных лежней будет определяться минимальным радиусом поворота сплавного хода $r_{\text{min.ЛХ}}$, шириной линейки $B_{\text{Лин}}$, длиной плоских сплочных единиц $L_{\text{ПСЕ}}$, а также расстоянием от борта плота до лежня.

При установлении оптимального интервала между плоскими сплочными единицами и показателя гибкости плота принимаем, что линейка из плоских сплочных единиц независимо от сильного свального течения проходит

в габаритах сплавного хода, где ось сплавного хода совпадает с осью плота, а плоские сплотовые единицы, расположенные между 1-й и последней сплотовыми единицами, могут свободно перемещаться в продольном направлении. При этом данной линейке свойственно принимать форму круга, т. е. образовывать кольцо с диаметром $2r_{\min LX}$, а 1-я и последняя плоские сплотовые единицы имеют возможность соединиться друг с другом.

Учитывая установленные по схеме рис. 1, а условия, получим зависимости для определения длины лежня в линейке, проложенного вдоль выпуклого борта, и длины лежня в линейке, проложенного вдоль вогнутого борта:

$$l_{LVып} = 2\pi \left(r_{\min LX} + \frac{B_{ЛИН}}{2} \right); \quad (1)$$

$$l_{LVог} = 2\pi \left(r_{\min LX} - \frac{B_{ЛИН}}{2} \right). \quad (2)$$

По схеме, представленной на рис. 1, б, –

$$l_{LVып} = 2\pi \left(r_{\min LX} + \frac{B_{ЛИН}}{2} - a_{БЛ} \right); \quad (3)$$

$$l_{LVог} = 2\pi \left(r_{\min LX} - \frac{B_{ЛИН}}{2} + a_{БЛ} \right). \quad (4)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости (1) и (2) позволяют определить сумму интервалов между плоскими сплотовыми единицами для схемы на рис. 1, а:

$$\sum i_{ПСЕ} = l_{LVып} - l_{LVог} = 2\pi \left(r_{\min LX} + \frac{B_{ЛИН}}{2} \right) - 2\pi \left(r_{\min LX} - \frac{B_{ЛИН}}{2} \right) = 2\pi B_{ЛИН}.$$

По зависимостям (3) и (4) можно найти сумму интервалов между плоскими сплотовыми единицами для схемы, приведенной на рис. 1, б:

$$\begin{aligned} \sum i_{ПСЕ} &= l_{LVып} - l_{LVог} = 2\pi \left(r_{\min LX} + \frac{B_{ЛИН}}{2} - a_{БЛ} \right) - 2\pi \left(r_{\min LX} - \frac{B_{ЛИН}}{2} + a_{БЛ} \right) = \\ &= 2\pi B_{ЛИН} - 4\pi a_{БЛ}. \end{aligned}$$

Интервал между двумя плоскими сплотовыми единицами для обеих рассматриваемых схем определяется по следующей формуле:

$$i_{ПСЕ} = \frac{\sum i_{ПСЕ}}{n_{ПСЕКЛ}}, \quad (5)$$

где $n_{ПСЕКЛ}$ – максимальное количество круговой установки плоских сплотовых единиц в линейке, шт.

В этой формуле максимальное количество круговой установки плоских сплотовых единиц в линейке будет зависеть от угла поворота одной сплотовой единицы $\beta_{ПСЕ}$ и минимального радиуса поворота сплавного хода. Таким образом, максимальное количество плоских сплотовых единиц в линейке при их круговой установке будет равно

$$n_{ПСЕКЛ} = \frac{360}{\beta_{ПСЕ}}. \quad (6)$$

Угол поворота одной плоской сплottedной единицы составит

$$\beta_{\text{ПСЕ}} = 2 \arctg \frac{L_{\text{ПСЕ}}}{2r_{\text{minЛХ}} - B_{\text{ЛИН}}}.$$

Необходимо отметить, что при расчете максимального количества круговой установки плоских сплottedных единиц в линейке по зависимости (6) полученное значение округляется до целого числа в меньшую сторону.

Зная длину линейки $L_{\text{ЛИН}}$, которая определяется расчетным путем, можно вычислить максимально возможное количество установки плоских сплottedных единиц в линейке, при котором она может быть проведена по излучине с минимальным радиусом закругления сплавного хода безопасно. Следовательно, максимальное количество плоских сплottedных единиц в линейке $n_{\text{ПСЕЛ}}$ с учтенным транспортным запасом, равным $i_{\text{ПСЕ}}$, составит

$$n_{\text{ПСЕЛ}} = \frac{L_{\text{ЛИН}}}{L_{\text{ПСЕ}} + i_{\text{ПСЕ}}}.$$

Полученное из данного равенства значение округляется до целого в меньшую сторону и принимается как базовое для рассматриваемых транспортных условий.

Гибкость плота, в соответствии с рис. 1, б, будет определяться отношением длины лежня в линейке, проложенного вдоль выпуклого борта, к длине лежня в линейке, проложенного вдоль вогнутого борта. На основании формул (1) и (2) показатель гибкости плота

$$\lambda_{\text{ГПЛ}} = \frac{l_{\text{ЛВып}}}{l_{\text{ЛВог}}} = \frac{2r_{\text{minЛХ}} + B_{\text{ЛИН}}}{2r_{\text{minЛХ}} - B_{\text{ЛИН}}}.$$

Для схемы, представленной на рис. 2:

$$\lambda_{\text{ГПЛ}} = \frac{l_{\text{ЛВып}}}{l_{\text{ЛВог}}} = \frac{2r_{\text{minЛХ}} + B_{\text{ЛИН}} - 2a_{\text{БЛ}}}{2r_{\text{minЛХ}} - B_{\text{ЛИН}} + 2a_{\text{БЛ}}}.$$

Определив по двум этим зависимостям гибкость, можно установить степень жесткости плота. Если $1,03 \geq \lambda_{\text{ГПЛ}} \geq 1,00$ [5], то рассматриваемый плот будет считаться жестким; если $1,12 \geq \lambda_{\text{ГПЛ}} > 1,03$ – полужестким; если $\lambda_{\text{ГПЛ}} > 1,12$ – гибким.

Для безопасной транспортировки плота по рекам с лимитирующими габаритами сплавного хода необходимо максимально точно рассчитывать по зависимости (5) минимально допустимый интервал между плоскими сплottedными единицами. Данный уровень расчета будет удовлетворять всем условиям [3, 4, 6, 16, 20] обеспечения прочности конструкции во время ее эксплуатации с учетом достоверных расчетов на прочность сплottedного и формировочного такелажа.

Используя полученную методику расчета гибкости плота, построим графики зависимости интервала между плоскими сплottedными единицами в плоту от минимального радиуса поворота сплавного хода, ширины линейки и длины плоских сплottedных единиц.

Построение графика зависимости интервала между плоскими сплottedными единицами в плоту от минимального радиуса поворота сплавного хода осуществлялось при условии, что $L_{\text{ПСЕ}} = 6$ м, $a_{\text{БЛ}} = 0,5$ м, $B_{\text{ЛИН}} = 4$ м. Радиус поворота сплавного хода изменялся от 20 до 140 м с шагом 20 м. Получен-

ный график представлен на рис. 2, *a*, откуда видно: при увеличении радиуса поворота сплавного хода интервал между плоскими сплоточными единицами уменьшается, а следовательно, коэффициент гибкости плота растет.

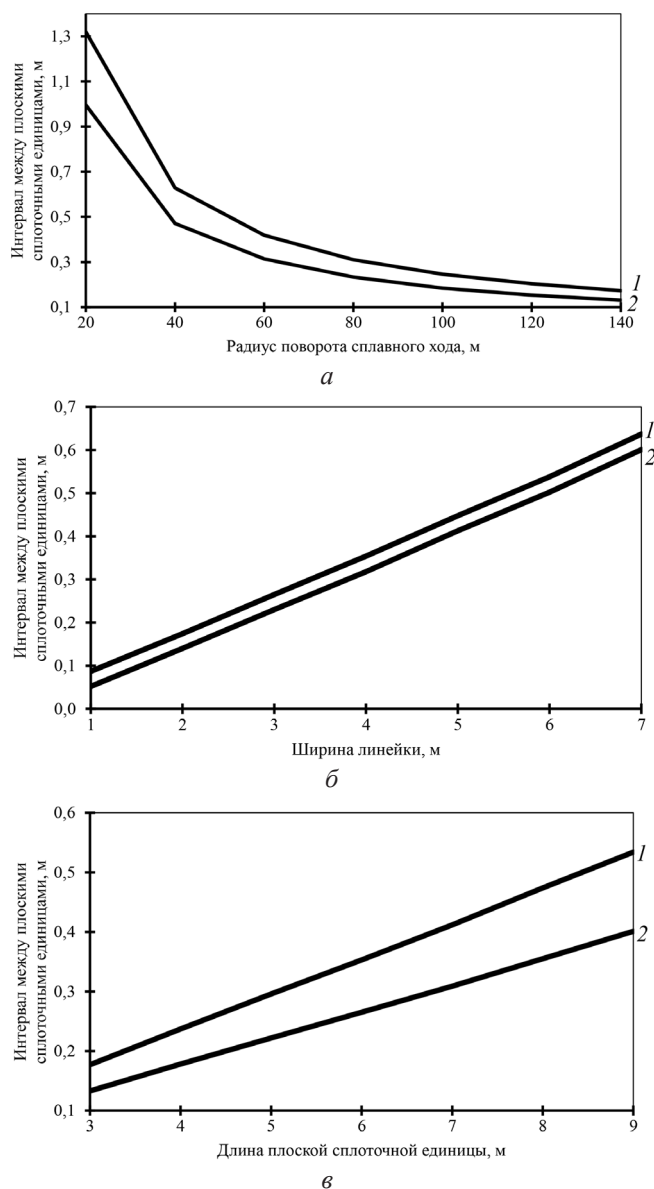


Рис. 2. Зависимость интервала между плоскими сплоточными единицами в плоту от радиуса поворота сплавного хода (*a*), ширины линейки (*б*) и длины плоской сплоточной единицы (*в*): 1 – расположение линейки из плоских сплоточных единиц на криволинейном участке сплавного хода по схеме рис. 1, *a*; 2 – по схеме рис. 1, *б*

Fig. 2. Dependence of the interval between flat raft units in a raft on the turning radius of the rafting course (*a*), the section line width (*б*) and the flat raft unit length (*в*): 1 – arrangement of a section line of flat raft units on the curved part of the rafting course according to the scheme of fig. 1, *a*; 2 – according to the scheme of fig. 1, *б*

График зависимости интервала между плоскими сплотовыми единицами в плоту от ширины линейки приведен на рис. 2, б. Построение данного графика осуществлялось при условии, что $L_{\text{ПСЕ}} = 6$ м, $a_{\text{БЛ}} = 0,2$ м, $r_{\text{минЛХ}} = 70$ м. Ширина линейки изменялась от 1 до 7 м с шагом 1 м. В соответствии с графиком интервал между плоскими сплотовыми единицами увеличивается с ростом ширины линейки, а коэффициент полндревесности плота уменьшается.

На рис. 2, в представлен график зависимости интервала между плоскими сплотовыми единицами в плоту от длины плоских сплотовых единиц. Данный график строился при следующих условиях: $B_{\text{лин}} = 4$ м, $a_{\text{БЛ}} = 0,5$ м, $r_{\text{минЛХ}} = 70$ м. Длина плоских сплотовых единиц изменялась от 3 до 9 м с шагом 1 м. Согласно представленному графику, при увеличении длины плоской сплотовой единицы интервал между плоскими сплотовыми единицами становится больше, а значит, коэффициент полндревесности плота уменьшается.

Анализируя представленную методику расчета интервала между плоскими сплотовыми единицами в плоту, предназначенного для эксплуатации на реках с малыми глубинами, а также графики, изображенные на рис. 2, можно сделать вывод, что интервал между плоскими сплотовыми единицами зависит от параметров плота и параметров самих плоских сплотовых единиц, их конструктивных особенностей, габаритов сплавного хода.

Заключение

Оптимальный интервал между плоскими сплотовыми единицами в плоту зависит от минимального радиуса поворота сплавного хода, ширины и длины плоской сплотовой единицы, а также от характера расположения буксирного троса в ряду плоских сплотовых единиц. Гибкость плота определяется оптимальным интервалом между плоскими сплотовыми единицами в ряду, т. е. отношением длины лежня, проложенного вдоль выпуклого борта, к длине лежня, проложенного вдоль вогнутого борта. Из этого следует, что чем меньше радиус поворота сплавного хода, тем больше устанавливается интервал между плоскими сплотовыми единицами в плоту.

Интервал между плоскими сплотовыми единицами становится больше при увеличении ширины плоских сплотовых единиц, коэффициент полндревесности плота в этом случае уменьшается. При увеличении длины плоской сплотовой единицы интервал между плоскими сплотовыми единицами растет, а коэффициент полндревесности плота уменьшается.

Использование на практике рассмотренной методики обоснования интервала между сплотовыми единицами и принципа расчета гибкости плота даст возможность осуществлять эффективный и экологически безопасный первоначальный сплав лесоматериалов в плотях из плоских сплотовых единиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильев В.В. Эксплуатационные показатели сплотовой единицы стабилизированной плавучести // Уч. зап. ПетрГУ. 2011. № 8. С. 100–102.
Vasil'ev V.V. Performance Indicators of Raft Sections with Stabilized Buoyancy. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8, pp. 100–102. (In Russ.).

2. Васильев В.В. Изменение осадки плоской сплочной единицы // Лесотехн. журн. 2013. № 1(9). С. 78–86.
Vasilyev V.V. Flat Raft Draft Changing. *Forestry Engineering Journal*, 2013, no. 1(9), pp. 78–86. (In Russ.).
3. Васильев В.В. Повышение эффективности и экологической безопасности плотового сплава лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2013. 259 с.
Vasiliev V.V. *Improving the Efficiency and Environmental Safety of Timber Rafting*: Cand. Eng. Sci. Diss. Voronezh, 2013. 259 p. (In Russ.).
4. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов. Saarbrücken (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
Vasiliev V.V., Afonichev D.N. *Improved Systems of Timber Rafting*. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ.).
5. Куколевский Г.А., Зайцев А.А. Первоначальный плотовый лесосплав. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 88 с.
Kukolevskiy G.A., Zaytsev A.A. *Spring Timber Rafting*. Moscow, Lesnaya promyshlennost, Publ., 1976. 88 p. (In Russ.).
6. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение. Архангельск: АГТУ, 2007. 492 с.
Mitrofanov A.A. *Timber Floating. New Technologies, Scientific and Maintenance Engineering Support*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 492 p. (In Russ.).
7. Овчинников М.М., Полищук В.П., Григорьев Г.В. Транспорт леса: в 2 т. Т. 2. Лесосплав и судовые перевозки. М.: Академия, 2009. 208 с.
Ovchinnikov M.M., Polishchuk V.P., Grigoriev G.V. *Forest Transport: In 2 Vol. Vol. 2. Timber Floating and Ship Transportation*. Moscow, Akademiya Publ., 2009. 208 p. (In Russ.).
8. Посыпанов С.В. Исследование геометрических характеристик плавающей двухъярусной пакетной сплочной единицы // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 215. С. 176–191.
Posypanov S.V. Investigation of the Geometric Characteristics of a Floating Bilevel Packaged Rafting Unit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2016, no. 215, pp. 176–191. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.176-191>
9. Посыпанов С.В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 141–153.
Posypanov S.V. Numerical Determination of the Geometric Parameters of a Transport Floating Roundwood Bundle. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 1, pp. 141–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.141>
10. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–52.
Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2007, no. 1, pp. 45–52. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/3c6/3c66c8d06d36d7b633ef4eb67892e4d6.pdf>
11. Armanini A. *Principles of River Hydraulics*. Transl. from Italian by G. Zummo. Cham, Springer, 2018. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68101-6>
12. Davie T., Quinn N.W. *Fundamentals of Hydrology*. London, Routledge, 2019. 306 p. <https://doi.org/10.4324/9780203798942>
13. Guy R.J. *Embarcation modulaire pour le transport des grumes par voie d'eau = Modular Craft for the Transport of Logs by Water*. Patent FR no. FR 2 882 723 A1, 2005. (In Fr.).
14. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mamatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems

(the Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 313–319. <https://doi.org/10.5937/jaes16-16908>

15. Pandey A., Mishra S.K., Kansal M.L., Singh R.D., Singh V.P. *Hydrological Extremes*. Cham, Springer, 2021. 446 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59148-9>

16. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of Hydrodynamic Resistance of a Raft Composed of the Flat Rafting Units of Various Draft. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2018*. Bulgaria, 2018, pp. 765–772. <https://doi.org/10.5593//sgem2018V/1.5/S03.093>

17. Subramanya K. *Engineering Hydrology*. New Dehli, McGraw-Hill, 2021. 592 p.

18. Syunev V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V., Seliverstov A., Gerasimov Yu., Karvinen S., Väliky E. Comparison of Wood Harvesting Methods in the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 120*. METLA, 2009. 117 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp120.htm> (accessed 05.03.21).

19. Tan J. Planning a Forest Road Network by Spatial Data Handling-Network Routing System. *Acta Forestalia Fennica*, 1992, no. 227, art. 7673. <https://doi.org/10.14214/aff.7673>

20. Yukawa Sh. *Method for Transporting Timbers by Sea*. Patent US no. US 3450279 A, 1969.

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 630*383

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-156-172

Расчет величины задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог

М.В. Мащнев¹, преподаватель; ResearcherID: [AAG-1713-2019](https://orcid.org/0000-0002-5984-7033),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-7033>

Н.Г. Пономарева²✉, канд. техн. наук; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

О.Н. Тверитнев¹, преподаватель; ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>

П.В. Тихомиров³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [E-3104-2019](https://orcid.org/0000-0003-4708-0645),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>

Д.М. Левушкин⁴, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAS-4522-2021](https://orcid.org/0000-0002-4787-6371),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>

А.Н. Брюховецкий¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-6930-2021](https://orcid.org/0000-0003-3247-3411),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, просп. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия, 394036; m.matsnew@yandex.ru, tveritneffo@yandex.ru, bruhoveckiy@rambler.ru

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

³Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; vtichomirov@mail.ru

⁴Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; levushkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 05.05.21 / Одобрена после рецензирования 08.08.21 / Принята к печати 14.08.21

Аннотация. Формализованное описание процесса строительства, включающее перечень работ, порядок их выполнения, характеристику взаимосвязей между работами, особенности технологии ведения работ, реализуется в организационно-технологических моделях. Наиболее полное математическое описание имеют сетевые модели. Однако у сетевого моделирования строительного потока есть серьезные недостатки. С помощью сетевой модели можно достаточно точно отобразить только взаимосвязь специализированных дорожных потоков при расчленении объекта на участки, равные по величине сменным захваткам. Такие графики эффективны при планировании дорожных работ и оперативном управлении ими в небольшом плановом периоде (декаде, месяце). При укрупнении сетевой модели для перспективного планирования потока нарушается адекватность отображения реального строительного процесса. В разрабатываемых в настоящее время так называемых обобщенных сетевых моделях совмещение процессов и обеспечение их непрерывности достигаются введением связей между работами, которые характеризуются временными параметрами, принимающими любые, в том числе отрицательные значения. Сложность математического описания этих моделей затрудняет их использование при решении оптимизационных задач. Цель – разработка математической модели и алгоритма расчета оперативного регулирования задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Предложена модель

© Мащнев М.В., Пономарева Н.Г., Тверитнев О.Н., Тихомиров П.В., Левушкин Д.М., Брюховецкий А.Н., 2022

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

комплексного объектного потока, в которой дискретный характер имеет время работы потока. Это условие реализуется в модели путем деления планового периода работы комплексного потока на равные промежутки времени – интервалы планирования. На основе классификационной схемы задач календарного планирования, а также анализа существующих экономико-математических моделей и методов можно дать следующую характеристику модели комплексного дорожно-строительного потока: модель календарного планирования, разрабатываемая с целью определения оптимальных заделов по элементам дорожной конструкции, является детерминированной (на 1-й стадии), дискретной во времени технологической моделью, в терминах «объемов» – с переменными скоростями ведения работ.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога, задел, модель дорожно-строительного потока, алгоритм расчета задела, проектирование лесовозных дорог

Для цитирования: Мацнев М.В., Пономарева Н.Г., Тверитнев О.Н., Тихомиров П.В., Левушкин Д.М., Брюховецкий А.Н. Расчет величины задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 156–172. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-156-172>

Original article

Calculating the Groundwork Volume for the Construction of Logging Roads

Maksim V. Matsnev¹, Lecturer; ResearcherID: [AAG-1713-2019](https://orcid.org/0000-0002-5984-7033),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-7033>

Natalia G. Ponomareva², Candidate of Engineering; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

Oleg N. Tveritnev¹, Lecturer; ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>

Petr V. Tikhomirov³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [E-3104-2019](https://orcid.org/0000-0003-4708-0645), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>

Dmitry M. Levushkin⁴, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAS-4522-2021](https://orcid.org/0000-0002-4787-6371), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>

Andrei N. Briukhovetskii¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAF-6930-2021](https://orcid.org/0000-0003-3247-3411), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, prosp. Revolyutsii, 19, Voronezh, 394036, Russian Federation; m.matsnev@yandex.ru, tveritneffo@yandex.ru, bruhoveckiy@rambler.ru

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

³Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; vtichomirov@mail.ru

⁴Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institut'skaya, 1, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russian Federation; levushkin@mgul.ac.ru

Received on May 5, 2021 / Approved after reviewing on August 8, 2021 / Accepted on August 14, 2021

Abstract. Organizational and engineering models provide a formalized description of the construction process, including a list of operations, their sequence, description of the relationship between the operations, and the features of the work technology. Network models



This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

have the most complete mathematical description. However, a number of authors in their works point to serious shortcomings inherent in the network modeling of construction flow. The network model allows displaying accurately enough only the relationship of specialized traffic flows when the object is divided into sections equal in size to interchangeable grips. Such schedules are quite effective in planning and operational management of road works in a short planning period (decade or month). The adequacy of the real construction representation is violated when the network model is enlarged for long-term planning of the flow. The currently developed so-called generalized network models achieve process combination and continuity by introducing links between the operations, characterized by temporal parameters assuming any values, including negative values. However, the complexity of the mathematical description of these models still prevents their use in solving optimization problems. The research aims at developing a mathematical model and an algorithm for calculating the operational control of the groundwork volume during the construction of logging roads. A model of a complex object flow is proposed, where the flow operation time has a discrete nature. This condition is realized in the model by dividing the planned operation period of a complex flow into equal time intervals – scheduling intervals. The below described model of complex road construction flow can be presented on the basis of the scheduling task classification scheme and the analysis of existing economic and mathematical models and methods. The scheduling model developed for the purpose of determining the optimal groundwork for the road construction elements is a deterministic (at the 1st stage), discrete in time, engineering model with variable speeds of operations.

Keywords: logging road, groundwork, road construction flow model, calculation algorithm of groundwork, design of logging roads

For citation: Matsnev M.V., Ponomareva N.G., Tveritnev O.N., Tikhomirov P.V., Levushkin D.M., Briukhovetskii A.N. Calculating the Groundwork Volume for the Construction of Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 156–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-156-172>

Введение

Вопрос о расширении производства дорожных работ в зимнее время в значительной степени зависит от правильного планирования этих работ, заранее проведенной тщательной подготовки соответствующих заделов по земляному полотну, обеспечивающих базу для последующих работ. Определение рациональных производственных заделов требует применения аппарата математического моделирования. Теоретические основы поточного метода строительства рассматривались Афанасьевым В.А., Будниковым М.С., Курьяновым В.К., Рыбальским В.И., Макеевым В.С., Филахтовым А.Л. и др.

Цель исследования – разработка математической модели и алгоритма расчета оперативного регулирования задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог в случае поточного производства дорожно-строительных работ при заданном директивном сроке и с учетом климатических факторов района лесозаготовок, имеющихся производственных мощностей строительства.

Формализованное описание задачи включает следующие допущения.

1. Указывается объем ввода лесовозной автомобильной дороги (км) по годам строительства.

2. В период планирования от 2 лет и более формализованное описание обеспечивает непрерывность планирования работы и позволяет судить о величине и структуре заделов в году, предшествующем году с плановым задани-

ем по вводу, а также о работах, которые необходимо выполнить в плановом году для обеспечения своевременного ввода лесовозной автомобильной дороги в году, следующем за плановым. При этом в расчетный период планирования включается год, предшествующий 1-му году с плановым заданием по вводу. В расчетный период будет входить 2 года выполнения работ без их полного завершения. Охват плановым периодом нескольких лет не отменяет общности постановки задачи при расчете работы потока в течение года.

3. Пусковые комплексы планируемого годового ввода определяются по каждому расчетному году.

4. Плановый период разбит на равные промежутки времени – интервалы планирования. Выбор интервалов планирования зависит от уровня разработки плана (проект организации строительства, проект производства работ) и от принятой в строительной организации формы оперативного планирования и учета (декадная, недельная).

5. Нормативная и сменная производительности всех специализированных потоков (км/смена) определяются по технологическим картам. Сменная производительность потока по возведению земляного полотна (км) является переменной величиной. Она зависит от объема земляных работ на каждом километре лесовозной автомобильной дороги.

Сменные производительности потоков по устройству основания приняты постоянными и соответствующими участкам лесовозной автомобильной дороги. Изменение производительности может быть вызвано сменой конструкции дорожной одежды, технологии выполняемых работ, а в некоторых случаях изменением среднего расстояния перевозки основных материалов.

6. Влияние метеорологических и организационных факторов на строительный процесс учитывается с помощью коэффициентов продуктивности потока K_1 , условий работы потока K_2 и сменности потока $K_{см}$. Коэффициент продуктивности потока определяет соотношение рабочих и календарных дней в плановом интервале. Коэффициент K_1 принимает значения: $0 \leq K_1 \leq 1$. Если $K_1 = 0$, то работы специализированным потоком в этой декаде не ведутся по технологическим ограничениям (ограниченность строительного сезона по климатическим факторам) и для этого потока вводится ожидание календарного периода, когда $K_1 > 0$.

Коэффициент условий работы K_2 характеризует изменение нормативной сменной производительности потока в отдельные периоды. Для дорожно-строительных работ, выполняемых в зимнее время, данный коэффициент вводится к значениям нормативной производительности в зависимости от принадлежности района строительства к температурным зонам и группе работ. В целях усредненного учета влияния на производительность труда перерывов на обогрев в течение рабочего дня табличное значение коэффициента условий работы увеличивается на 10 %. Изменение нормативной сменной производительности потока в летний строительный сезон может быть обусловлено организационными причинами. Коэффициент $K_2 = 0$ в случае организационных перерывов в работе потока, перебазирования машин и т. д.

Значения коэффициентов K_1 , K_2 , $K_{см}$ задаются в виде матрицы. В строках матрицы перечислены плановые интервалы года, в столбцах – технологические потоки, на пересечении столбца и строки – значение соответствующего коэффициента.

7. Расчет потоков искусственных сооружений, линейных зданий, мостов и сосредоточенных земляных работ предусмотрен по отдельным графикам и не включается в настоящую модель. Сроки выполнения этих работ должны назначаться таким образом, чтобы обеспечить непрерывность линейных технологических потоков. Нумерация потоков принята в соответствии с технологической последовательностью производства работ: 1-й – возведение земляного полотна, 2-й – устройство слоев основания, 3-й – устройство покрытия.

8. Предлагаемая организационно-технологическая модель после выполнения зимних работ специализированным потоком, если нет технологических ограничений ($K_1 \neq 0$), весной, после оттаивания сооруженных зимой конструкций, перед выполнением работ следующим потоком предусматривает дополнительную работу, а в случае необходимости доуплотнение и достройку отдельных слоев, положенных зимой. Состав этих работ и их сменная производительность определяются по технологическим картам достройки. В модели учтено, что при строительстве i -го конструктивного слоя в зимний период происходит перекрытие предшествующего ($i - 1$)-го слоя, а готовность i -го слоя для строительства последующего ($i + 1$)-го будет обеспечена только в летний строительный сезон, после производства дополнительных работ.

9. Директивный срок строительства задается как номер интервала планирования, до которого должно быть закончено строительство завершающего конструктивного элемента дороги с осуществлением ее ввода в эксплуатацию. Если эта дата не прописана, то директивным сроком считается последний интервал планирования в завершеном году планового периода, когда для последнего потока каждый из коэффициентов продуктивности и условия работы не равен нулю.

Объекты и методы исследования

Экономико-математическая модель задачи состоит из следующих основных элементов.

Исходные данные. Технологические ограничения и организационные требования: $T = (1, t)$ – плановый период строительства; $j = 1, 2, \dots, t$ – порядковый номер интервала планирования; $T_{\text{пр}}, T_1, T_2$ – годы планового периода (год, предшествующий 1-му году с плановым вводом; 1-й год с плановым вводом; 2-й год с плановым вводом соответственно); t – количество интервалов в плановом году; $i = 1, 2, \dots, m$ – порядковый номер специализированного потока; h_{i1}, h_{i2} – соответственно интервалы начала и конца летнего строительного сезона; $b = 1, 2, \dots, B$ – порядковый номер километра дороги; $s^{\text{н}} - s^{\text{к}}$ – участки сосредоточенных земляных работ, исключаемые из расчета специализированного потока; $E_{i,(i+1)}$ – минимальный организационно-технологический разрыв между i -м и $(i + 1)$ -м потоками, км; d_b – объем земляных работ на b -м километре, м³; $k_{1ij}, k_{2ij}, k_{\text{см}ij}$ – соответственно коэффициенты продуктивности, условия работы потока, сменности i -го потока в j -м интервале; λ – коэффициент, учитывающий незавершенность работ в зимний период; ε – доля потребности в машиносменах при выполнении работ зимнего периода в общей потребности машиносмен данного механизма при выполнении всего объема работ специализированным потоком на 1 км.

Нормативные и стоимостные характеристики: C_z – сметная стоимость z -го комплекса; $p_i(\Delta b)$ – сметная стоимость 1 км на участке Δb , выполненного потоком; $a_i^x(\Delta b)$ – требуемое количество машино-смен машин x -й группы на 1 км i -го потока на участке Δb ; $\beta_i^{\varphi}(\Delta b)$ – нормативный расход материалов φ -й группы на 1 км i -го потока на участке Δb .

Показатели, характеризующие возможности дорожно-строительной организации: $Y_i(\Delta b)$, $Y_i^n(\Delta b)$ – нормативная сменная производительность i -го потока на участке Δb и в период достройки после зимнего строительства соответственно, км; $d_c(\Delta b)$ – сменная производительность i -го потока по строительству землеполотна, м³.

Ограничения на сроки ввода: L_1, L_2 – соответственно план ввода дороги T_1 и T_2 в году, км; $z = 1, 2, \dots, z$ – пусковые комплексы; $T^{дир}$ – директивный срок строительства (номер интервала планирования).

Неизвестные: I_i^h, I_i^k – соответственно начало и завершение работы i -го потока в плановый период; q_{ij}, Q_{ij} – объемы работ, выполненных i -м потоком в j -м интервале и на конце j -го интервала соответственно, км.

Целевая функция.

При $\tau = 1, 2, \dots, (T^{дир} - I_i^h)$; $i = 1, 2, \dots, n - 1$; $j = 1, 2, \dots, t$ имеет вид

$$F = \sum_i \sum_j q_{ij} p_i [T^{дир} - I_i^h - \tau].$$

Анализ целевой функции позволяет сделать вывод, что ее минимальное значение достигается при минимизации разности между директивным сроком строительства и сроками начала работ специализированных потоков, т. е. при $F = \sum_i (T^{дир} - I_i^h) \rightarrow \min$.

Система ограничений задачи. Ограничения задачи характеризуют взаимосвязь элементов задачи и выражаются в виде неравенств:

$$I_i^h \leq I_i^k; \tag{1}$$

$$I_n^k \leq T^{дир}; \tag{2}$$

$$t \leq I_n^h \leq 2t. \tag{3}$$

$$\sum_{j=I_i^h}^{j=2t} q_{nj} = L_1; \quad \sum_{j=2t+1}^{j=3t} q_{nj} = L_2; \tag{4}$$

$$L = L_1 + L_2; \quad \sum_{j=I_i^h}^{j=I_i^k} q_{nj} = L; \tag{5}$$

При $l = \max[I_i^h, \dots, t]$

$$\sum_{j=\max(I_i^h, h_1)}^{j=\min(l, h_2)} q_{ij} - \sum_{j=I_{i+1}^h}^{j=l} q_{(i+1)j} \geq E_{i,(i+1)}. \tag{6}$$

При $l = \max [I_i^h, (t + 1), \dots, 2t]$

$$\sum_{j=\max(I_i^h, h_1)}^{j=\min(l, h_2)} q_{ij} + \sum_{j=\max[I_i^h, (t+h_1)]}^{j=\min(l, (t+h_2))} q_{ij} - \sum_{j=I_{i+1}^h}^{j=l} q_{(i+1)j} \geq E_{i,(i+1)}.$$

$$\text{При } l = \max [I_i^n(2t+1), \dots, 3t]$$

$$\sum_{j=\max(I_i^n, h_1)}^{j=\min(l, h_2)} q_{ij} + \sum_{j=\max[I_i^n, (t+h_1)]}^{j=\min[l, (t+h_2)]} q_{ij} + \sum_{j=\max[I_i^n, (2t+h_1)]}^{j=\min[l, (2t+h_2)]} q_{ij} - \sum_{j=I_{i+1}^n}^{j=l} q_{(i+1)j} \geq E_{i, (i+1)}.$$

Ограничение (3) означает, что последний n -й поток по строительству должен начать работу не раньше 1-го года с плановым заданием по вводу. Ограничение (4) обеспечивает выполнение планового ввода по годам строительства. Условие (5) предусматривает выполнение каждым потоком полного объема работ планового периода. Ограничение (6) является интерпретацией основного принципа взаимодействия работ в моделях объемного типа. Объем работ, выполненных на конец каждого планового интервала в предшествующий период, должен быть больше (или равен) объема работ, выполненных на конец соответствующего интервала следующим потоком, на величину минимального организационно-технологического разрыва. Этим ограничением определяются также условия производства работ, связанные с их сезонным характером.

По технологии нижний слой конструкции, возводимый зимой, может быть окончательно подготовлен и перекрыт верхним слоем только в летний строительный сезон. Верхний слой может и зимой перекрывать нижний, построенный в летнее время. Эти особенности дорожной технологии учитываются в ограничении (6) при суммировании объемов предшествующего потока только по интервалам строительного сезона, а для последующего потока – по всем интервалам (рис. 1).

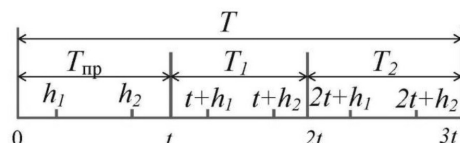


Рис. 1. Схема компоновки интервалов в плановый период

Fig. 1. Layout scheme of intervals in the planning period

Сформированная модель задачи. Она представляет собой динамическую систему, т. е. систему, находящуюся в каждый момент времени t (из множества T) в одном из возможных состояний W_i (из множества W), способную переходить (во времени) из одного состояния в другое под действием внешних и внутренних причин.

Исследования последних лет показали ограниченность применения методов линейного и целочисленного программирования для решения динамических задач календарного планирования [3, 4, 7, 10, 12, 14]. Эти методы наиболее эффективны при рассмотрении производства в статике. Использование методов динамического программирования при решении задач оперативно-календарного планирования также не дает приемлемых для практики результатов [2, 5, 6]: для большинства практических задач календарного планирования или отсутствует достаточно полное математическое описание, или сложность математической формулировки не позволяет легко найти эффективные аналитические методы решения. Это характерно и для настоящей задачи. Ее решение зависит от многих внешних и внутренних факторов, трудно поддается математическому описанию. В частности, математическое выражение процесса достройки после зимнего периода работ значительно снижает возможность аналитического решения.

Более перспективными для решения календарных задач, имеющих сложную «комбинаторную» структуру, оказываются разрабатываемые в нашей стране и за рубежом различные приближенные, так называемые эвристические методы, представляющие собой набор правил конструирования, сравнения, анализа и отбора вариантов возможных решений, берущие свое начало от вычислительных схем динамического программирования и восходящие до интеллектуальных информационных систем [1, 8, 9, 11, 13, 20].

Результаты исследования и их обсуждение

В разработанной эвристической программе, осуществляются направленный перебор вариантов по срокам начала каждого специализированного потока и пошаговая оптимизация процесса по заданному критерию. Перебор определяет минимизирующую целевую функцию вариант с наиболее поздним в соответствии со сроками началом работ.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

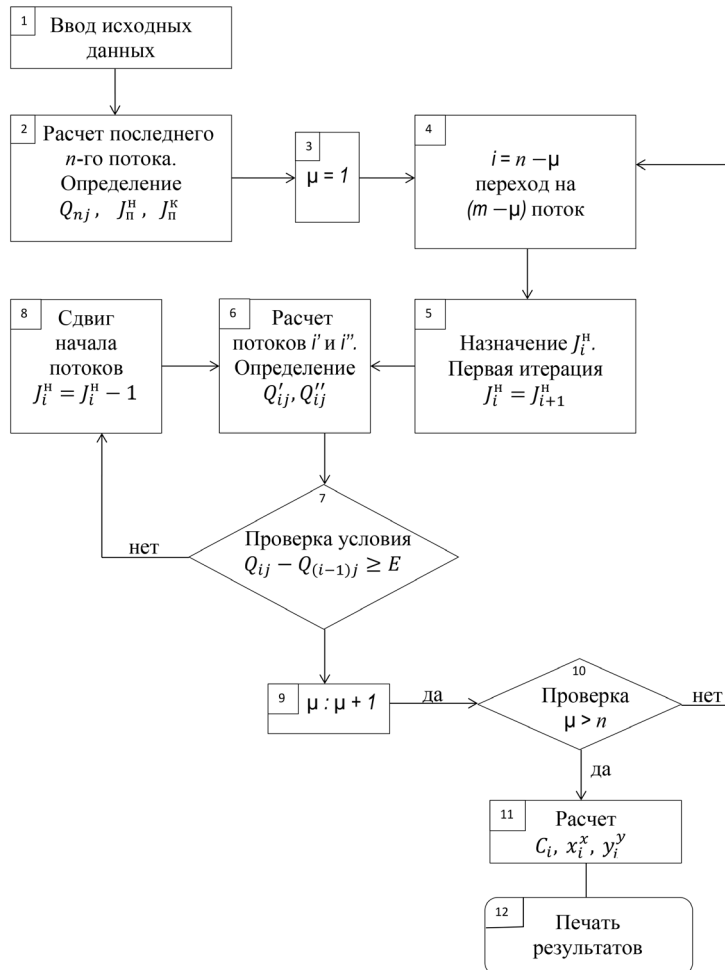


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета комплексного объектного потока

Fig. 2. Algorithm block diagram for calculating the complex object flow

Расчет модели начинаем с последнего n -го потока по формулам:

$$q_{ij} = Y_i (\Delta b) k_{1ij} k_{2ij} D_k k_{cmij};$$

$$Q_{ij} = Q_{i(j-1)} + q_{ij},$$

где D_k – количество календарных дней в интервале планирования.

Определяем I_n^H и I_n^K в соответствии с ограничениями (1)–(5).

Принимаем, что $\mu = 1$ и переходим к расчету предшествующего $(n - 1)$ -го потока. Назначаем декаду начала $(n - 1)$ -го потока из условия $I_{n-1}^H = I_n^H$ и производим расчет $(n - 1)$ -го потока. Расчет всех потоков, предшествующих n -му, при сезонном производстве работ осуществляется аналогично. Для учета особенностей круглогодичной организации работ и оптимизации сезонных заделов разработана схема расчета по 2 условным потокам (рис. 3).

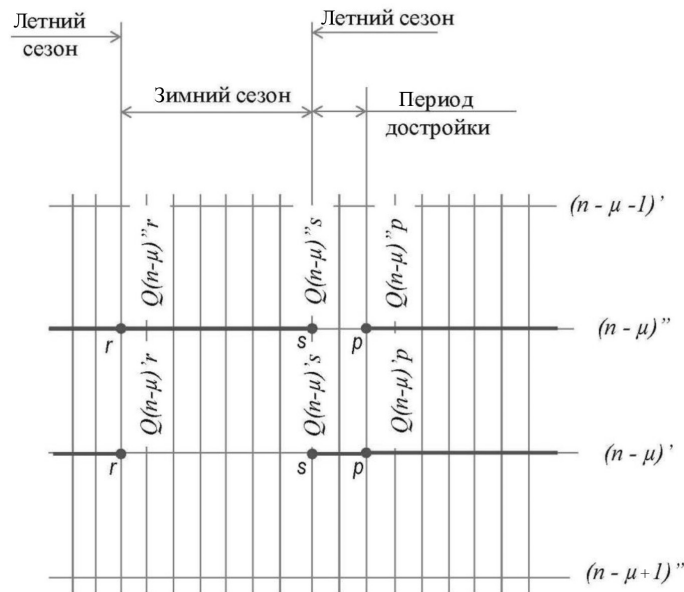


Рис. 3. Расчет потока при круглогодичной работе: поток $(n - \mu)'$ – круглогодичная работа; поток $(n - \mu)''$ – строительство и достройка в летний сезон

Fig. 3. Flow calculation for year-round operation: flow $(n - \mu)'$ – year-round operation; flow $(n - \mu)''$ – construction and completion in summer season

По потоку $(n - \mu)''$ определяется потребность в предшествующем $(n - \mu - 1)'$ слое, по потоку $(n - \mu)'$ – готовность $(n - \mu)$ -го слоя для строительства $(n - \mu + 1)''$.

Пусть r, s, p – фиксированные номера интервалов в порядке возрастания. При $r < j < s$ – зимний период, при $s < j < p$ – период достройки после зимнего периода, т. е.

$$K_{1(n-\mu)j} = \begin{cases} 0, & \text{если } r < j < s; \\ 0 < K_{1(n-\mu)j} \leq 1, & j < r; \\ j > s. & \end{cases}$$

Принят следующий порядок расчета:

$$Q_{(n-\mu)'' , r} = Q_{(n-\mu)' , r} ;$$

$$Q_{(n-\mu)' , r} = Q_{(n-\mu)' , s} ;$$

$$Q_{(n-\mu)'' , s} = Q_{(n-\mu)'' , r} + \sum_{j=r}^{j=s} q_{(n-\mu)'' , s} .$$

При $s < j < p$ – период достройки со сменной производительностью $Y_{n-\mu}^{\text{д}}$:

$$Q_{(n-\mu)' , p} = Q_{(n-\mu)'' , s} = Q_{(n-\mu)'' , p} .$$

При расчете потока по строительству землеполотна ($i = 1$) сменная производительность потока Y_1 (км) зависит от объема земельных работ (м^3) на каждом километре и рассчитывается по схеме, приведенной на рис. 4.

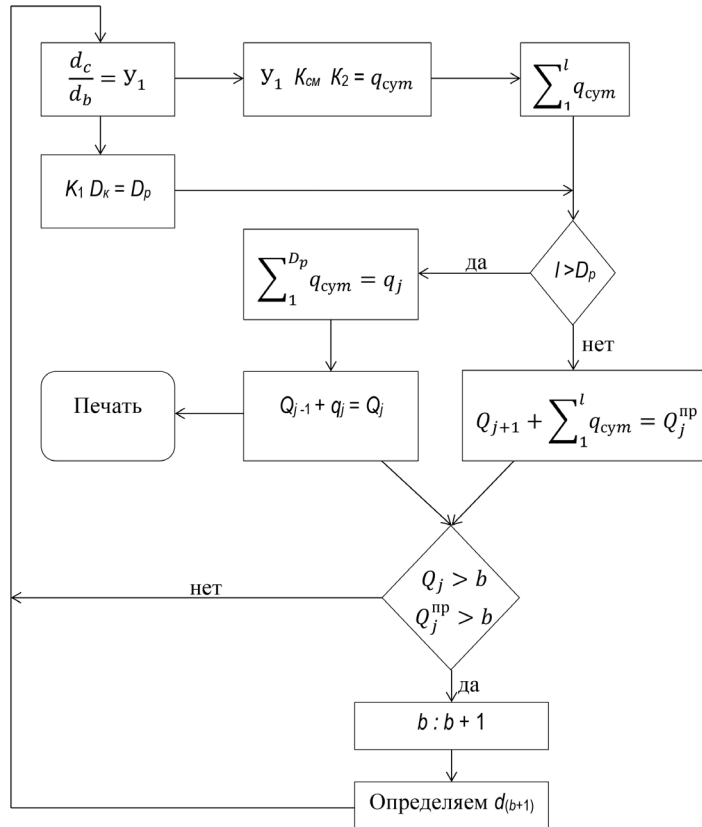


Рис. 4. Блок-схема расчета потока по строительству земляного полотна: Q_j^{np} – промежуточный объем внутри j -го интервала нарастающим потоком; $q_{\text{сут}}$ – объем работ, выполненных за сутки, км; l – рабочие сутки j -го интервала; D_p – количество рабочих дней

Fig. 4. Block diagram of flow calculation for the roadbed construction: Q_j^{np} – intermediate volume within the j -th interval by increasing flow; $q_{\text{сут}}$ – volume of works performed per day, km; l – working day of the j -th interval; D_p – number of working days

Начало работы $(n - \mu)$ -го потока определяется при условии выполнения ограничения (6):

$$I_{(n-\mu-1)}^H - I_{(n-\mu+1)}^H \rightarrow \min \text{ при } Q_{(n-\mu)j}' - Q_{(n-\mu+1)j}'' \geq E_{(n-\mu),(n-\mu+1)}.$$

Для $(n - \mu - 1)$ -го потока $I_{(n-\mu-1)}^H$ находится при условии, когда

$$I_{(n-\mu-1)}^H - I_{(n-\mu)}^H \rightarrow \min \text{ при } Q_{(n-\mu-1)j}' - Q_{(n-\mu)j}'' \geq E_{(n-\mu-1),(n-\mu)}.$$

Если ограничение (6) при расчете потока не выполняется, переходим к блоку 8. Начало потока уменьшается на 1 интервал – далее к блоку 6. Если ограничение (6) выполнено, переходим к блоку 9 и увеличиваем μ на 1, переходим на поток $(n - \mu - 1)$. Проверяем, все ли потоки рассчитаны. Если нет, обращаемся к блоку 4 и повторяем расчет. Если да, двигаемся к блоку 11 и по полученному оптимальному варианту производим расчет суммарного объема незавершенного строительного производства в плановый период C_j (тыс. р), количества машино-смен машин x -й группы в j -м интервале X_j^x и материалов ϕ -й группы в j -м интервале Y_j^ϕ :

$$C_j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} - C_z;$$

$$X_j^x = q_{ij} \alpha_i^x;$$

$$Y_j^\phi = q_{ij} \beta_i^\phi,$$

где c_{ij} – сметная стоимость работ, выполняемых i -м потоком в j -м интервале, тыс. р, c_{ij} принимает значения $c_{ij}^{\text{лет}}$, $c_{ij}^{\text{зим}}$, $c_{ij}^{\text{дост}}$ – сменные стоимости работ, выполняемые i -м потоком в j -м интервале соответственно летнего строительного сезона, зимнего и в период достройки конструкции. Эти величины находятся по формулам: $c_{ij}^{\text{лет}} = q_{ij} p_i (\Delta b)$; $c_{ij}^{\text{зим}} = q_{ij} p_i (\Delta b) \lambda$; $c_{ij}^{\text{дост}} = q_{ij} p_i (\Delta b) \cdot 1 - \lambda$.

Последнее, 12-е действие алгоритма, предполагает печать календарного плана производства работ, определение оптимальных сроков их начала для специализированных потоков. Разница объемов работ (км) между смежными потоками в каждом интервале позволяет судить о величине, структуре и динамике изменения заделов.

В матрице календарного графика значений Q_{ij} для каждого интервала приводятся минимальные допустимые объемы работ, выполняемых предшествующим потоком, чтобы не вызвать задержки последующего потока ($Q_{ij\min}$). Они определяются из условия минимальных организационно-технологических разрывов между смежными потоками на конец каждого интервала. На последнем n -м потоке $Q_{nj\min} = Q_{nj}$, на каждом последующем $Q_{ij\min} = Q_{(i+1)j} + E_{i,(i+1)}$.

В связи с сезонным характером работ производится корректировка минимальных объемов. Объем, равный $Q_{ij\min}$ на конец сезонного перерыва в работе потока, должен быть выполнен к началу этого перерыва. Соответственно корректируются и предшествующие объемы с учетом заданной скорости потока и определяются значения $Q_{ij\min}'$ в порядке, противоположном технологической последовательности производства работ. Пример расчета приведен в таблице.

Фрагмент из расчета календарного графика производства работ в матричной форме
A fragment from the schedule calculation of works in matrix form

Показатель	Номер интервала												
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
$i = n = 4$													
$K_{1, 4, j}$	0	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
$Q_{4, j}$	0	0,7	1,4	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1
$Q_{4, jmin}$	0	0,7	1,4	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1
$Q'_{4, jmin}$	0	0,7	1,4	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1
Резерв r	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 3$													
$R_{1, 3j}$	0	0	0	0	0	0	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
$Q_{3, j}$	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	6,8	8,5	10,2	11,9	13,6	15,3	17,0
$Q_{3, jmin}$	0	1,2	1,9	2,7	3,5	4,3	5,2	6,1	7,0	7,9	8,8	9,7	10,6
$Q'_{3, jmin}$	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	6,1	7,9	9,7	11,5	13,8	15,1	16,9
Резерв r	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Получаемый в результате расчета график предназначен не только для планирования работы потока, но и для оперативного управления им. Разница между Q_{ij} и Q_{ijmin} является объемным резервом. Уменьшение выполняемых объемов в потоке ($n - \mu$) в пределах этого резерва не вызовет задержки следующего потока, однако потребует либо увеличения темпов ($n - \mu$)-го потока, чтобы наверстать отставание к тому интервалу, в котором резерв объема равен нулю, либо увеличения времени работы предшествующего потока, чтобы не задерживать работу последующего. Эта задача решается в ходе оперативного управления ходом работ.

Наиболее вероятны 2 ситуации, связанные с изменением характера взаимного расположения смежных потоков.

1. В промежуток времени от I_{i+1}^n до момента К планируемое расстояние между потоками i и $(i + 1)$ сокращается и в момент К достигает минимального организационно-технологического разрыва (рис. 5, а). При этом величина планового резерва r снижается ($r \rightarrow 0$). При отклонении фактических объемов от плановых в сторону уменьшения в этот промежуток времени возникает угроза остановки последующего потока из-за отсутствия фронта работ.

Допустим, $Q_i^{пл}$ и $Q_i^ф$ – соответственно плановый и фактический объемы (км), выполняемые i -м потоком к контрольному моменту τ_1 , $Q_i^к$ – плановый объем i -го потока в момент К. Если в момент τ_1 $Q_i^ф < Q_i^{пл}$, необходимо принимать экстренные меры по увеличению суточного темпа R_i i -го потока за счет привлечения резервных мощностей или повышения коэффициента сменности ($R_i = Y_i k_{см}$). Необходимое увеличение темпа работ в процентах к плановому рассчитывается по формуле

$$\Delta R = \frac{Q_i^{пл} - Q_i^ф}{Q_i^к - Q_i^{пл}} \cdot 100 \%$$

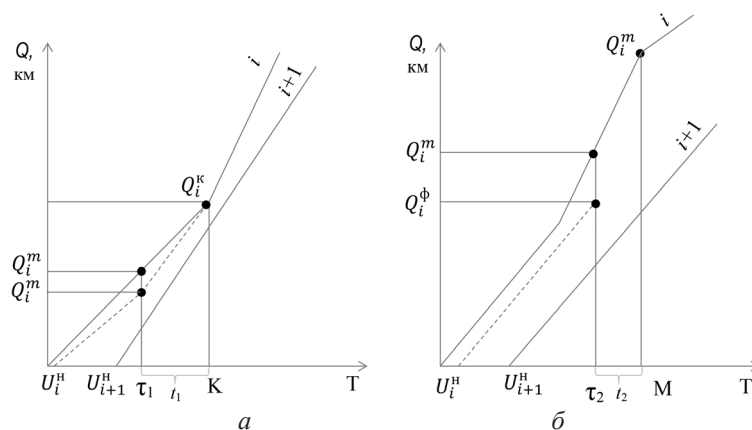


Рис. 5. Схематичные графики 2 смежных разноритмичных потоков: *a* – сокращение разрыва; *б* – увеличение разрыва (— – план; ---- – фактическое выполнение *i*-го потока)

Fig. 5. Schematic diagrams of 2 adjacent flows of different rhythm: *a* – gap reduction; *б* – gap extension (— – plan; ---- – actual performance of the *i*-th flow)

Требуемый суточный темп работ можно определить также следующим образом:

$$R = \frac{Q_i^k - Q_i^{\phi}}{\sum_1^{\eta} (K_{1ij} K_{2ij} D_k)},$$

где η – количество плановых интервалов в промежутке от τ_1 до K .

2. Величина планового резервного фронта работ между потоками увеличивается (промежуток времени от $I_{(i+1)}^H$ до точки M , рис. 5, *б*). В случае отставания фактических объемов *i*-го потока от плановых выполнение работ *i*-м потоком берется под контроль. Ликвидировать допущенное отставание можно без использования дополнительных ресурсов за счет устранения сдерживающих факторов.

Схема регулирования величины заделов в процессе строительства приведена на рис. 6.

Задача определения оптимальных заделов в дорожном строительстве, как и другие задачи календарного планирования, требует ввода большого количества исходных данных. В целях упорядочения подготовки исходной информации был исследован процесс формирования необходимых показателей и установлены взаимосвязи между ними. Используются формализованные методы изучения и описания информационных потоков, рекомендуемые авторами [12, 15–19] при рассмотрении информационных вопросов в управлении промышленными предприятиями и строительным производством. Основной инструмент, предлагаемый в этих работах, – матричная информационная модель, с помощью которой можно однозначно определить набор входных, промежуточных и результативных данных, проанализировать процесс преобразования входных данных в промежуточные и выходные, установить взаимосвязь и последовательность выполнения отдельных операций обработки данных, количественные и качественные характеристики потоков информации.



Рис. 6. Блок-схема регулирования величины заделов в ходе строительства

Fig. 6. Block diagram for groundwork control during construction

Для построения информационной модели был составлен список всех информационных элементов, используемых для решения поставленной задачи. Для идентификации элементов применен порядковый код.

Взаимосвязь информационных элементов задачи представлена в виде 2 структурных матриц. Матрица 1 указывает на использование показателей задачи для формирования каждого информационного элемента. В матрице 2 перечислены показатели, для получения которых берется каждый информационный элемент задачи. Разброс связей затрудняет восприятие цепочки формирования исходных данных для решения задачи. В целях упорядочения элементов по уровням формирования разработаны специальные алгоритмы триангуляции квадратных матриц. Применение этих методов осложняется с увеличением размерности матриц.

Заключение

В разработанном нами алгоритме расчета величины задела при строительстве автомобильных лесовозных дорог для упорядочения информационных элементов задачи по уровням формирования использована структурная матрица.

Изображение взаимосвязей показателей в виде информационного графика, вершины которого (информационные элементы задачи) распределены по

уровням формирования, делает представление данных наглядным и облегчает процесс подготовки информации для решения поставленной задачи в рамках календарного планирования. К нулевому уровню относятся не формируемые в данной системе показатели. Показатели каждого последующего уровня задаются на основе показателей предшествующих уровней, на последнем уровне расположены выходные данные решаемой задачи. Возможна дальнейшая детализация информационных элементов. Упорядочение их по предложенной схеме будет способствовать внедрению автоматизированных расчетов при разработке оптимальных календарных планов строительства лесовозных автомобильных дорог в составе проектов строительства и производства работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1993. 271 с.
Babkov V.F. *Road Conditions and Traffic Safety*. Moscow, Transport Publ., 1993. 271 p. (In Russ.).
2. Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
Birulya A.K. *Operation of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1966. 326 p. (In Russ.).
3. Гулевский В.А., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Экспериментальная оценка сцепных качеств и ровности покрытий при различных состояниях автомобильных дорог и погодных условиях // Вестн. ВГАУ. 2018. № 1(56). С. 112–118.
Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Experimental Evaluation of Traction Properties and Road Evenness in Various Road and Weather Conditions. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 2018, no. 1(56), pp. 112–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.112>
4. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 2012. 424 с.
Dryu D. *Theory of Traffic Flows and Their Management*. Moscow, Transport Publ., 2012. 424 p. (In Russ.).
5. Иванов В.Н., Ерохов В.Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.
Ivanov V.N., Erokhov V.N. Road Parameters Influence on Fuel Consumption. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2014, no. 8, pp. 10–13. (In Russ.).
6. Калужский Я.А., Бегма И.В., Кисляков В.М., Филиппов В.В. Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1969. 136 с.
Kaluzhskiy Ya.A., Begma I.V., Kislyakov V.M., Filippov V.V. *The Use of Queueing Theory in the Road Design*. Moscow, Transport Publ., 1969. 136 p. (In Russ.).
7. Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2017. 406 с.
Kozlov V.G. *Methods, Models and Algorithms for Designing Timber Roads Considering the Impact of Climate and Weather on Traffic Conditions*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arhangelsk, 2017. 406 p. (In Russ.).
8. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Микова Е.Ю., Могульников П.В., Чуриков Е.В. Формирование модели проектирования системы «дорожные условия – транспортные потоки» и пути ее реализации // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 100–111.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mikova E.Yu., Mogutnov R.V., Chirikov E.V. Formation of the Model of Designing the System “Road Conditions – Transport Flows” and Ways of Its Implementation. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 1(29), pp. 100–111. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbe6ece23.91630316

9. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Могутнов Р.В., Микова Е.Ю., Зеликова Ю.А. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 156–168.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mogutnov R.V., Mikova E.Yu., Zelikova Yu.A. Comprehensive Experimental Research of Changing Parameters and Characteristics of Road Conditions, Transport Flows and Motion Modes under Influence of Climate and Weather. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 156–168. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b240611858af4.37544962

10. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 117–127.

Kozlov G.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichiy S.A., Mogutnov R.V. Theoretical Foundations and Methods of Mathematical Modeling of Forestry Roads. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 6, pp. 117–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.117>

11. Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2(33). С. 272–275.

Kondrashova E.V., Skvortsova T.V. Improvement of Road Traffic Organization in the Forest Complex Transport Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii = Automation and Remote Control*, 2008, no. 3-2(33), pp. 272–275. (In Russ.).

12. Сильянов В.В., Ситников Ю.М. Расчет скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47–66.

Sil'yanov V.V., Sitnikov Yu.M. Calculation of Traffic Speeds in the Road Design. *Trudy MADI*, 1974, iss. 72, pp. 47–66. (In Russ.).

13. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесн. вестн. 2017. Т. 21, № 6. С. 43–49.

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Assessment of the Impact on the Speed of the Constant Parameters of the Plan and Profile in the Various States of the Road Surface. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-6-43-49>

14. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.

Khomyak Ya.V. *Designing Road Networks*. Moscow, Transport Publ., 1983. 207 p. (In Russ.).

15. Чернышова Е.В. Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности // Вестн. ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 2(72). С. 113–120.

Chernyshova E.V. Algorithm for Solving the Problem of Optimal Tracing of a Timber Road on a Non-Uniform Terrain. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologii = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, vol. 79, no. 2(72), pp. 113–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-113-120>

16. Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000*. Ed. by M. Ceccarelli. Dordrecht, Springer, 2000, pp. 325–332. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9554-4_37
17. Kozlov V.G., Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of Individual Forecasting of Technical State of Logging Machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 4, art. 042056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042056>
18. Mogutnov R.V., Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Zavrazhnov A.I., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Mikheyev N.V. Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the Main Parameter of the System. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” Dedicated to the 85th Anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.165>
19. Skrypnikov A., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511–515.
20. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical Background of Road Landscape Zoning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 659, art. 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012011>

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

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 543.544

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-173-184

**Использование наноразмерного ZnO
в составах для защитной обработки древесины***Е.В. Томина^{1,2}, д-р хим. наук, доц.; ResearcherID: [ABF-1895-2020](https://orcid.org/0000-0002-5222-0756),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>**А.И. Дмитренко¹✉, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAO-8606-2020](https://orcid.org/0000-0001-9296-1762),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>**К.В. Жужукин¹, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-2187-2021](https://orcid.org/0000-0002-7093-3274),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>*

¹Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; tomina-e-v@yandex.ru, dmitrenkov2109@mail.ru✉, kinkon18@yandex.ru

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., д. 1, г. Воронеж, Россия, 394018; tomina-e-v@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.05.21 / Одобрена после рецензирования 15.08.21 / Принята к печати 19.08.21

Аннотация. Естественная структура древесины может выступать как матрица для модифицирования наночастицами различной химической природы. Цель работы – получение нанокомпозита на основе древесины путем ее модифицирования составами из отработанного растительного масла и наночастиц оксида цинка и исследование свойств этого нанокомпозита. В качестве объектов изучения были выбраны образцы древесины березы повислой. Масляной основой разрабатываемых пропиточных составов служило оставшееся после приготовления пищи рафинированное подсолнечное масло, наполнителем и модификатором – наноразмерный порошок оксида цинка. Для синтеза наночастиц оксида цинка применяли золь-гель метод, дающий узкий интервал распределения частиц по размерам. Как исходное вещество для синтеза наночастиц ZnO использовали нитрат цинка $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, как осадитель – водный раствор аммиака. Синтезированные наночастицы оксида цинка не содержали примесей и имели форму близкую к сферической, а их размер не превышал 20 нм. Размер агломератов частиц оксида цинка составлял не более 100 нм, что позволяло им легко проникать в полости древесного материала. Для модифицирования древесины готовили устойчивую суспензию синтезированного нанопорошка оксида цинка в отработанном подсолнечном масле. Обработку образцов древесины осуществляли методом горяче-холодной пропитки. Установлено, что использование наноразмерного оксида цинка ускоряет процесс высыхания покрытия из растительного масла, повышает прочность такого покрытия и его устойчивость к внешним воздействиям. Применение разработанных составов улучшает гидрофобные свойства древесины, ее влаго- и водостойкость, а также уменьшает разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях. Выбрана оптимальная дозировка нано-

размерного оксида цинка в составах на основе отработанного растительного масла для защитной обработки древесины березы – 0,1 %. Пропиточные составы на основе отработанного растительного масла обладают низкой токсичностью и их использование позволяет утилизировать отходы пищевого производства.

Ключевые слова: наноразмерный оксид цинка, древесина, защитная обработка древесины, суспензия, краевой угол смачивания, водопоглощение, влагопоглощение, разбухание

Для цитирования: Томина Е.В., Дмитренко А.И., Жужукин К.В. Использование наноразмерного ZnO в составах для защитной обработки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 173–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-173-184>

Original article

The Use of Nanosized ZnO in Compositions for Wood Protective Treatment

Elena V. Tomina^{1,2}, Doctor of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABF-1895-2020](https://orcid.org/0000-0002-5222-0756),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

*Aleksandr I. Dmitrenkov*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAO-8606-2020](https://orcid.org/0000-0001-9296-1762), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>

*Konstantin V. Zhuzhukin*¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAB-2187-2021](https://orcid.org/0000-0002-7093-3274),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; tomina-e-v@yandex.ru, dmitrenkov2109@mail.ru, kinkon18@yandex.ru

²Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation; tomina-e-v@yandex.ru

Received on May 18, 2020 / Approved after reviewing on August 15, 2021 / Accepted on August 19, 2021

Abstract. Wood natural structure can be considered as a suitable matrix for modifying with nanoparticles of various chemical nature. The research aims at obtaining a wood-based nanocomposite by modifying wood with compositions of waste vegetable oil and zinc oxide nanoparticles and studying the properties of this nanocomposite. Silver birch (*Betula pendula*) wood samples were chosen as study objects. Refined sunflower oil left after cooking was the oil base of the developed impregnating compositions; nanosized zinc oxide powder was the filler and modifier. The sol-gel method providing a narrow range of particle size distribution was used for synthesis of zinc oxide nanoparticles from $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ as starting material. Aqueous ammonia solution was used as a precipitant. The synthesized zinc oxide nanoparticles contained no impurities, were mostly spherical and had the size less than 20 nm. The size of zinc oxide agglomerates was no more than 100 nm, allowing them to easily penetrate into the wood material cavities. A stable suspension of synthesized zinc oxide nanopowder in used sunflower oil was prepared and applied for wood modification by hot-and-cold bath treatment. It was found that the use of nanoscale zinc oxide accelerates the drying process of vegetable oil coating, increases the strength of such a coating and its resistance to external influences. The use of developed compositions improves the hydrophobic properties of wood, its moisture and water resistance, as well as reduces swelling in the tangential and radial directions. We have chosen the optimal dosage of nanosized zinc oxide (0.1 %) in compositions based on waste vegetable oil for protective



treatment of birch wood. Impregnating compositions on the base of waste vegetable oil are environmentally safe and their use allows recycling food industry wastes.

Keywords: nanosized zinc oxide, wood, wood protective treatment, suspension, contact angle, water absorption, moisture absorption, swelling

For citation: Tomina E.V., Dmitrenkov A.I., Zhuzhukin K.V. The Use of Nanosized ZnO in Compositions for Wood Protective Treatment. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 4, pp. 173–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-173-184>

Введение

Натуральная древесина является возобновляемым ресурсом и устойчивым материалом с хорошими механическими свойствами, но на нее воздействуют многочисленные вредные факторы: она легко поглощает воду, растрескивается, плесневеет, подвержена биологической и световой деградации. Все это сильно снижает сроки эксплуатации изделий из древесины. Разработка экономичных легкоуправляемых методов создания новых материалов на основе природного полимера древесины – актуальная задача [5]. Нанотехнологии способны предоставить перспективные альтернативы для разработки эффективных методов синтеза материалов. В нанометровом диапазоне измерений изменяются многие физические и химические свойства веществ в сравнении с объемными объектами. Пористая и иерархическая структура древесины может выступать как матрица для модифицирования наночастицами различной химической природы.

В ряде публикаций [11, 14, 20, 24] подтверждаются значительные повышение стойкости к разбуханию, уменьшение водопоглощения, увеличение прочности и антимикробных свойств нанокompозитов на основе древесины, придание древесине супергидрофобных свойств за счет внедрения наноматериалов в природный полимер.

Модификация натуральной древесины составами, содержащими наноразмерные частицы оксида цинка, оксида титана и оксидов других металлов, а также наноглин [14], позволяет не только улучшить водоотталкивающие свойства поверхности древесины, снизить ее водопоглощение, но и повысить устойчивость к воздействию грибов.

Натуральная древесина и материалы на ее основе являются ценным сырьем для различных областей производства и деятельности человека. Интерес к такой древесине постоянно возрастает еще и в связи с ужесточением экологических требований к продукции, находящейся в контакте с человеком.

Модифицирование – один из распространенных методов улучшения свойств малоценной древесины мягких лиственных пород [6, 7, 18]. С целью защиты натуральной древесины для ее модификации применяют разнообразные химические соединения и пропиточные составы, которые должны обладать хорошей проникающей способностью в полости древесного материала, иметь низкую стоимость, быть доступными и безопасными для человека и животных.

При приготовлении продуктов питания в пищевой промышленности образуются большие объемы отходов растительных масел, подвергшихся многократной термической обработке. В основном это рафинированное подсолнечное масло. Такое отработанное подсолнечное масло слабо утилизируется, и его

отходы загрязняют окружающую среду, осложняя работу очистных сооружений. Вместе с тем отработанные растительные масла являются ценным сырьем и могут быть применены в композиционных составах для защитной обработки натуральной древесины.

Пропитка древесины растительным маслом представляет собой древнейший прием ее защиты от неблагоприятных факторов и улучшения свойств природной древесины малоценных пород. В предыдущих работах [2, 3] показана перспективность использования отработанных растительных масел – отходов пищевой промышленности – для защитной обработки и модификации натуральной древесины. Определена [2] оптимальная температура пропитки древесины березы отработанным подсолнечным маслом – 120 °С.

В [13, 22, 23] приводятся результаты разработки пропиточных составов на основе льняного, подсолнечного и других растительных масел с целью получения композитных материалов из древесины, используемых в строительстве и быту. Авторы [19] для химической модификации и улучшения стойкости и стабильности размеров древесины различных пород применяли составы на основе растительных масел, парафина и пчелиного воска, с последующей термической обработкой изделий.

В работе [8] предложены пропиточные составы на основе различных растительных масел, улучшающие свойства древесины. Для создания древесных композитов с повышенными гидрофобными показателями и защиты древесных изделий от УФ-излучения использовались [10, 16] эмульсии растительных масел.

Экологически безопасными являются составы для обработки древесины на основе силиконов [12, 15, 17]. После нанесения на древесину и последующего нагревания происходит химическое взаимодействие компонентов состава с компонентами древесного вещества, и на поверхности древесины образуется водоотталкивающее покрытие, эффективно защищающее изделие от влаги и других неблагоприятных воздействий.

Целью работы стало получение нанокompозита на основе древесины березы путем ее модифицирования составами из отработанного растительного масла и наночастиц оксида цинка и исследование свойств этого нанокompозита.

Объекты и методы исследования

Для синтеза оксидных наночастиц среди наиболее простых в исполнении методов «мягкой химии» особое место занимает золь-гель метод, позволяющий при относительно низких температурах получать наноматериалы с узким распределением частиц по размерам, используя простое и недорогое оборудование. В качестве исходного вещества для синтеза наночастиц ZnO нами использован нитрат цинка $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (х.ч.). Применение в качестве осадителя водного раствора аммиака (25 мас. %, ч.д.а.) за счет образования буферной смеси (NH_4^+ и NH_4OH) позволяло поддерживать pH на уровне 9. Образовавшийся гелевидный осадок отделяли на вакуум-фильтре, многократно промывали дистиллированной водой, высушивали при комнатной температуре до постоянной массы, отжигали на воздухе при температуре 240 °С в течение 2 ч.

Фазовый состав синтезированных образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием рентгеновского дифрактометра

Empyrean V.V. с анодом Cu ($\lambda = 1,54060$ нм). Съемку проводили в интервале углов $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ с шагом 0,0200. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) по данным РФА для образцов оксида цинка рассчитывали по формуле Шеррера:

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl} \cos\theta},$$

где D_{hkl} – средний размер частиц, Å; k – поправочный коэффициент, $k = 0,9$ для сферических частиц; λ – длина волны рентгеновской трубки; β_{hkl} – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад; θ – положение максимума пика, град.

Размер и морфологию частиц синтезированного порошка определяли по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при помощи просвечивающего электронного микроскопа Carl Zeiss Libra 120.

В качестве объектов исследования взяты образцы древесины березы повислой (*Betula pendula*), заготовленные в опытном учебном лесничестве Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова. Эта порода выбрана потому, что она относится к самым распространенным листовым породам Российской Федерации. Для проведения экспериментов готовили образцы древесины размером 20×20 мм в радиальном и тангенциальном направлениях, высотой вдоль волокон 10 мм. Средняя плотность образцов составляла 635 кг/м³.

Все образцы древесины высушивали при температуре 103 °С до постоянной массы. Для модифицирования древесины применяли использованное в пищевой индустрии рафинированное подсолнечное масло, которое предварительно отстаивали и профильтровывали. Для усиления модифицирующего воздействия отработанного масла в состав композиций вводили добавки нанопорошка оксида цинка в дозировке от 0,1 до 1,0 %. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов (редакция от 18.11.2021), отходы фритюра на основе растительного масла имеют низкую токсичность и относятся к отходам 4-го класса опасности (код: 736 111 11 3 24).

Модифицирование осуществляли методом горяче-холодных ванн. Для приготовления устойчивой суспензии синтезированного нанопорошка оксида цинка в отработанном подсолнечном масле к заданному объему растительного масла постепенно добавляли определенное количество нанопорошка при перемешивании магнитной мешалкой. Суспензию нагревали до 120 °С, помещали в нее образцы древесины и выдерживали в течение 30 мин. Затем образцы переносили в суспензию, имеющую температуру окружающей среды, на такое же время. Содержание пропиточного состава в древесине (%) определяли гравиметрическим методом по разности масс до и после пропитки. Взвешивание пропитанных образцов проводили после стекания масла и образования на поверхности древесины твердой эластичной пленки.

Для определения влагопоглощения образцы высушивали в бюксах до абсолютно сухого состояния согласно требованиям ГОСТ 16483.7–71 и взвешивали с погрешностью не более 0,001 г. На дно эксикатора наливали насыщенный раствор соды. Образцы устанавливали боковой поверхностью на вставку эксикатора так, чтобы они не касались один другого и стенок эксикатора, закрывали крышкой и выдерживали при температуре 20±2 °С. Образцы периодически

взвешивали в бюксах с погрешностью не более 0,001 г. Первое взвешивание производили через сутки с момента помещения образцов в эксикатор, последующие – через 2, 3, 6, 9, 13, 20 и далее через каждые 10 сут. Минимальная продолжительность выдерживания образцов – 30 сут.

Количество поглощенной влаги в процентах вычисляли с точностью до 0,1 % по формуле

$$W = \frac{m_n - m_1}{m_1 - m} \cdot 100,$$

где m_n – масса бюкса с образцом, взвешенной через n суток с момента первоначального помещения образца в эксикатор, г; m_1 – масса бюкса с образцом в абсолютно сухом состоянии, г; m – масса бюкса, г.

При определении водопоглощения образцы высушивали при 103 °С в бюксах до абсолютно сухого состояния, после чего опускали их под эксикаторную вставку и наливали дистиллированную воду выше уровня вставки. Количество поглощенной воды вычисляли по приведенной формуле. Взвешивание образцов проводили через 1, 3, 10 и 30 сут.

Образцы, используемые для определения водопоглощения, через заданное время вынимали из эксикатора и измеряли в тангенциальном и радиальном направлениях с точностью до 0,01 мм. Затем устанавливали разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях:

$$a_t = \frac{L_{t\max} - L_{t\min}}{L_{t\min}} \cdot 100 \% ;$$
$$a_R = \frac{L_{R\max} - L_{R\min}}{L_{R\min}} \cdot 100 \% ,$$

где $L_{t\max}$, $L_{R\max}$ – размеры образца после выдерживания в воде 1, 3, 10, 30 сут в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно; $L_{t\min}$, $L_{R\min}$ – размеры образца в абсолютно сухом состоянии в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно.

Поверхностное натяжение древесины устанавливали по краевому углу смачивания. Краевой угол смачивания древесины дистиллированной водой измеряли методом лежащей капли на собранном в лаборатории гониометре с использованием программы NView 10. Жидкость на поверхность древесины наносили микрошприцом объемом 0,01 мл. Изображение регистрировали с помощью портативной камеры микроскопа Digital Microscope (Ruihoge, Китай) и фиксировали в течение 1, 30, 60 и 90 с.

Кинематическую вязкость исследуемых пропиточных составов на основе растительного масла определяли при помощи вискозиметра ВПЖ-3.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние pH среды в ходе золь-гель синтеза на морфологию наночастиц ZnO исследовано в работах [9, 21]. Порошки оксида цинка, синтезированные при pH, равном 6 или 7, аморфны, что может быть связано с подавлением гидролиза в данных условиях реакции. Проведение процесса при pH = 9, согласно [4], способствует формированию кристаллических образцов. Это под-

тверждают свидетельствующие о высокой степени кристалличности образцов узкие рефлексы высокой интенсивности, отвечающие оксиду цинка на дифрактограмме (рис. 1). Однако достаточно высокий уровень фона может быть результатом присутствия некоторой доли аморфной фазы оксида цинка. Согласно данным РФА, синтезированные образцы ZnO не содержат примесей (JCPDS, карточка 36-1451).

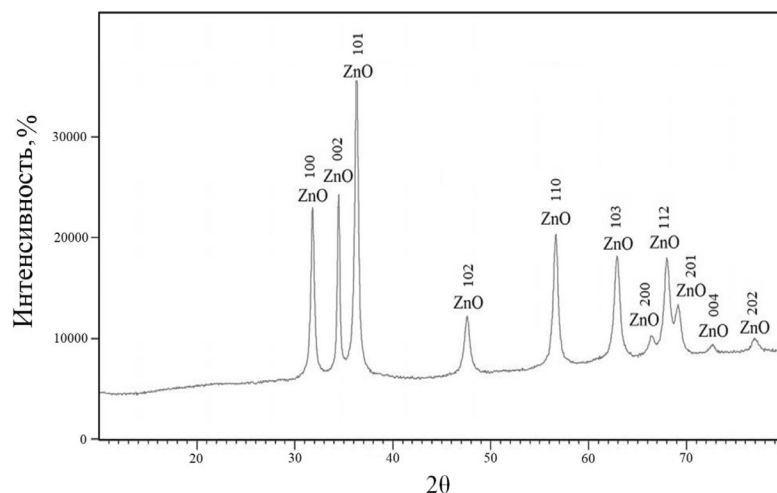


Рис. 1. Дифрактограмма образца ZnO, синтезированного золь-гель методом с осадителем $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Fig. 1. Diffraction pattern of a ZnO sample synthesized by the sol-gel method with a precipitant $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Среднее значение ОКР частиц оксида цинка, рассчитанное по формуле Шеррера, составляет 22 ± 2 нм (табл. 1).

Таблица 1

Среднее значение областей когерентного рассеяния частиц синтезированного образца ZnO
The average value of the coherent-scattering regions of the synthesized ZnO sample particles

Диаметр ОКР частиц ZnO	D_1	D_2	D_3	D_{cp}
Значение, нм	19 ± 3	20 ± 2	26 ± 1	22 ± 2

Результаты ПЭМ хорошо коррелируют с данными РФА (рис. 2). На ПЭМ-изображениях видно, что частицы ZnO, синтезированные золь-гель методом, имеют форму, близкую к сферической. Размер большинства частиц не превышает 20 нм, степень агломерации невелика, размер агломератов – менее 100 нм.

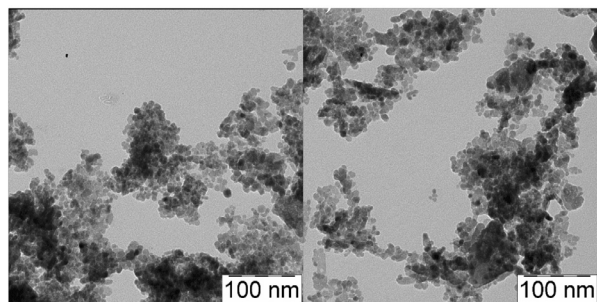


Рис. 2. Просвечивающая электронная микроскопия различных участков желатинового слоя с распределенным в нем нанопорошком ZnO

Fig. 2. Transmission electron microscopy images of various sections of the gelatin coating with ZnO nanopowder distributed in it

Такие характеристики наночастиц оксида цинка позволяют ожидать достаточно легкого допирования древесины березы через ее проводящие элементы – сосуды, диаметр которых обычно составляет от 0,02 до 0,50 мм.

В табл. 2 представлены результаты определения пропиточного состава и краевого угла смачивания воды для древесины березы.

Таблица 2

**Пропиточный состав и краевой угол смачивания
для древесины березы**
The impregnation composition content and the contact angle for birch wood

Модифицирующий состав	Содержание пропиточного состава в древесине, %	Краевой угол смачивания, ...°
Отсутствует	–	30
Отработанное растительное масло	74,1	49
Отработанное масло с 1,0 % наноразмерного ZnO	58,8	62
Отработанное масло с 0,5 % наноразмерного ZnO	68,2	67
Отработанное масло с 0,1 % наноразмерного ZnO	81,2	72

На рис. 3 представлены результаты определения влагопоглощения, водопоглощения, разбухания в радиальном и тангенциальном направлениях необработанной древесины березы и древесины березы, модифицированной различными составами на основе отработанного растительного масла.

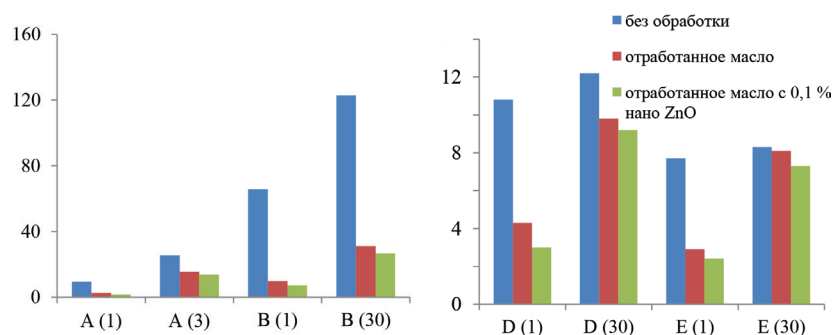


Рис. 3. Влагопоглощение (А), водопоглощение (В), разбухание в радиальном (D) и тангенциальном (E) направлениях древесины березы после 1 и 30 сут. испытаний, % (в скобках на горизонтальной оси – продолжительность испытания, сут.)

Fig. 3. Moisture absorption (A), water absorption (B), swelling in the radial (D) and tangential (E) directions of birch wood after 1 and 30 days of testing, % (on the horizontal axis in brackets – test duration, days)

На основании результатов эксперимента можно сделать вывод, что отработанное растительное масло легко и на достаточную глубину проникает в древесину. Многократная термическая обработка масла при повышенных температурах приводит к заметным изменениям в его структуре, усилению полимеризационных и окислительных процессов. Маркером эффективности

модифицирующей обработки служит количество масла, введенного в древесину. Сравнение этого показателя для отработанного растительного масла и подсолнечного масла, не подвергавшегося термической обработке, говорит о том, что эффективность пропитки отработанным растительным маслом несколько выше. Это, по-видимому, связано с увеличением содержания жирных кислот в результате окислительных превращений растительного масла при его многократной термической обработке. Образуются новые функциональные группы (карбонильные, карбоксильные, оксогруппы). Все это приводит к образованию новых связей растительного масла со структурой древесины и способствует его закреплению в полостях древесного материала.

Анализ краевого угла смачивания воды на поверхности обработанной и необработанной древесины березы показывает, что модификация маслом закрывает мельчайшие поры древесины за счет протекающих на поверхности образцов полимеризационных процессов. Масляное покрытие с наноразмерным оксидом цинка делает древесину гидрофобной. Так, обработка древесины отработанным растительным маслом без добавок позволяет более чем в 1,5 раза увеличить краевой угол смачивания модифицированной древесины по сравнению с необработанной. Использование наноразмерного оксида цинка в составах на основе отработанного растительного масла в оптимальной дозировке (0,1 %) повышает краевой угол смачивания модифицированной древесины почти в 2,5 раза, делая ее поверхность особенно гидрофобной.

Растительные масла при нанесении на древесину под действием кислорода воздуха и света полимеризуются, превращаясь в твердую, эластичную пленку. Это связано с наличием в них полиненасыщенных жирных кислот, таких как линолевая и линоленовая. Чем их больше, тем большей способностью высыхания обладает масло. Использование наноразмерного оксида цинка ускоряет процесс высыхания покрытия из растительного масла, повышает прочность такого покрытия и его устойчивость к внешним воздействиям. Кроме того, в отработанном масле вследствие его многократного нагревания разлагаются вещества, замедляющие отверждение покрытия на основе этого масла.

Использование в качестве наполнителя наноразмерного оксида цинка способствует закреплению растительного масла в полостях древесного материала, о чем говорит количество введенного модифицирующего состава при оптимальном содержании нанопорошка в нем. Возможно, этому способствует взаимодействие полярной реакционноспособной поверхности O–ZnO с функциональными группами компонентов древесины (например, OH-группами целлюлозы), приводящее к образованию водородных связей [1].

При таком содержании нанопорошка ZnO в масле кинематическая вязкость пропиточного состава при температуре 120 °C практически не отличается от вязкости чистого отработанного подсолнечного масла (27 с). Дальнейшее увеличение содержания оксида цинка приводит к снижению количества введенного пропиточного состава из-за роста его вязкости, что сказывается на свойствах модифицированной древесины. Так, кинематическая вязкость отработанного растительного масла с 1 % нанопорошка оксида цинка равнялась 36 с.

Заполнение полостей древесного материала отработанным растительным маслом позволяет существенно снизить влаго- и водопоглощение древесины березы. После суток испытаний водопоглощение пропитанной маслом дре-

веса снизилось в 3,5 раза, водопоглощение – более чем в 6 раз по сравнению с натуральной древесиной. Еще более эффективно защищает природную древесину от влаги и воды состав, содержащий 0,1 % наноразмерного оксида цинка. Влагопоглощение пропитанной таким составом древесины через 24 ч уменьшилось более чем в 4 раза, а водопоглощение – более чем в 7 раз. После 30 сут испытаний эффективность защиты несколько снижается, но все равно показатели влаго- и водопоглощения модифицированной древесины существенно ниже, чем у необработанной, – в 1,5 и в 4 раза соответственно.

Обработка древесины березы составами на основе отработанного подсолнечного масла позволяет уменьшить разбухание древесины как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. После суток нахождения в воде разбухание древесины, модифицированной чистым маслом, снизилось как в тангенциальном, так и в радиальном направлениях приблизительно в 2,5 раза по сравнению с необработанной древесиной. При модифицировании древесины отработанным растительным маслом с 0,1 % нанопорошка оксида цинка разбухание в тангенциальном направлении уменьшилось в 3,6 раза, в радиальном – в 3,2 раза в сравнении с натуральной древесиной. После 30 сут испытаний снижение разбухания древесины не так значительно и достигает в радиальном направлении 25 %.

Заключение

Разработаны и исследованы новые составы на основе отработанного подсолнечного масла с наноразмерным оксидом цинка для модификации натуральной древесины. Золь-гель методом синтезированы наночастицы оксида цинка, имеющие форму близкую к сферической и размеры до 20 нм, что позволяет им легко проникать в полости древесины. Предлагаемые модифицирующие составы существенно улучшают гидрофобные свойства поверхности древесины, понижают ее влаго- и водостойкость, а также разбухание в радиальном и тангенциальном направлениях. Оптимальное содержание нанопорошка оксида цинка в составах на основе отходов растительного масла – 0,1 %. Оно позволяет достигать минимальных влаго- и водопоглощения модифицированной древесины. Полученные пропиточные составы, основа для которых – отход пищевой промышленности, – являются малоопасными для человека и животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Врублевская В.И., Матусевич В.О., Кузнецова В.В. Обоснование механизма взаимодействия компонентов древесины с влагой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 152–163.

Vrublevskaya V.I., Matusevich V.O., Kuznetsova V.V. Substantiation of the Interaction Mechanism of Wood Components and Water. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 152–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.152>

2. Дмитренко А.И., Никулин С.С., Никулина Н.С., Боровской А.М., Недзельская Е.А. Исследование процесса пропитки древесины березы отработанным растительным маслом // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 2. С. 161–168.

Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Nikulina N.S., Borovskoy A.M., Nedzelskaya E.A. Research of the Process of Birch Wood Impregnation with the Used Vegetable Oil. *Forestry*

Engineering Journal, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 161–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/16>

3. Дмитренко А.И., Ходосова Н.А., Боровской А.М., Недзельская Е.А., Заяц В.В. Использование отработанного растительного масла для получения древесных композитов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21, № 1. С. 127–133.

Dmitrenkov A.I., Khodosova N.A., Borovskoy A.M., Nedzelskaya E.A., Zayats V.V. Use of Waste Vegetable Oil for the Production of Wood Composites. *Sorption and Chromatography Processes*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 127–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3228>

4. Карпова С.С., Мошников В.А., Мякин С.В., Коловангина Е.С. Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, вып. 3. С. 369–372.

Karpoval S.S., Moshnikov V.A., Mjakin S.V., Kolovangina E.S. Surface Functional Composition and Sensor Properties of ZnO, Fe₂O₃ and ZnFe₂O₄. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* = Semiconductors, 2013, vol. 47, iss. 3, pp. 369–372. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063782613030123>

5. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Хитров Е.Г., Минаев А.Н. Математическое моделирование процесса пропитки древесины в пьезопериодическом поле // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 168–180.

Kunitskaya O.A., Burmistrova S.S., Khitrov E.G., Minaev A.N. Mathematical Modeling of Impregnation of Wood in Piezo Periodic Field. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 5, pp. 168–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.168>

6. Шамаев В.А. Исследование модифицированной древесины методом электронной микроскопии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 190–199.

Shamaev V.A. Study of Modified Wood by Electron Microscopy. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 1, pp. 190–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-190-199>

7. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины: моногр. М.: Флинта, 2013. 448 с.

Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification*. Moscow, Flinta Publ., 2013. 448 p. (In Russ.).

8. Ahmed S.A., Morén T., Sehlstedt-Persson M., Blom Å. Effect of Oil Impregnation on Water Repellency, Dimensional Stability and Mold Susceptibility of Thermally Modified European Aspen and Downy Birch Wood. *Journal of Wood Science*, 2017, vol. 63, pp. 74–82. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1595-y>

9. Alias S.S., Ismail A.B., Mohamad A.A. Effect of pH on ZnO Nanoparticle Properties Synthesized by Sol–Gel Centrifugation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 499, iss. 2, pp. 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.174>

10. Berube M.-A., Schorr D., Ball R., Landry V., Blanchet P. Determination of *in situ* Esterification Parameters of Citric Acid-Glycerol Based Polymers for Wood Impregnation. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, vol. 26, iss. 3, pp. 970–979. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1011-8>

11. Cai T., Shen X., Huang E., Yan Y., Shen X., Wang F., Wang Z., Sun Q. Ag Nanoparticles Supported on MgAl-LDH Decorated Wood Veneer with Enhanced Flame Retardancy, Water Repellency and Antimicrobial Activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 598, art. 124878. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124878>

12. Cappelletto E., Maggini S., Girardi F., Boichicchio G., Tessadri B., Di Maggio R. Wood Surface Protection with Different Alkoxysilanes: A Hydrophobic Barrier. *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 3131–3141. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0038-9>

13. Croitoru C., Patachia S., Lunguleasa A. A Mild Method of Wood Impregnation with Biopolymers and Resins Using 1-Ethyl-3-Methylimidazolium Chloride as Carrier. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 93, pp. 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.031>
14. Holy S., Temiz A., Demirel G.K., Aslan M., Amini M.H.M. Physical Properties, Thermal and Fungal Resistance of Scots Pine Wood Treated with Nano-Clay and Several Metal-Oxides Nanoparticles. *Wood Material Science & Engineering*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 176–185. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1836023>
15. Kumar A., Ryparová P., Škapin A.S., Humar M., Pavlič M., Tywoniak J., Hajek P., Žigon J., Petrič M. Influence of Surface Modification of Wood with Octadecyltrichlorosilane on Its Dimensional Stability and Resistance against *Coniophora puteana* and Molds. *Cellulose*, 2016, vol. 23, pp. 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1009-8>
16. Lahtela V., Kärki T. Improving the UV and Water-Resistance Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) with Impregnation Modifiers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, vol. 72, pp. 445–452. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0804-x>
17. Lin W., Huang Y., Li J., Liu Z., Yang W., Li R., Chen H., Zhang X. Preparation of Highly Hydrophobic and Anti-Fouling Wood Using Poly(methylhydrogen)siloxane. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 7341–7353. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>
18. Medvedev I., Shamayev V., Parinov D. Resource-Saving Production Sleepers of Modified Wood. *Railway Track and Facilities*, 2018, no. 11, pp. 30–32.
19. Németh R., Bak M., Ábrahám J., Fodor F., Horváth N., Báder M. Wood Modification Research at the University of Sopron. *Siberian Journal of Forest Science*, 2019, no. 3, pp. 20–25. <https://doi.org/10.15372/SJFS20190303>
20. Qiu Z., Xiao Z., Gao L., Li J., Wang H., Wang Y., Xie Y. Transparent Wood Bearing a Shielding Effect to Infrared Heat and Ultraviolet via Incorporation of Modified Antimony-Doped Tin Oxide Nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 172, pp. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>
21. Rani S., Suri P., Shishodia P.K., Mehra R.M. Synthesis of Nanocrystalline ZnO Powder via Sol-Gel Route for Dye-Sensitized Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, vol. 92, no. 12, pp. 1639–1645. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.015>
22. Rousset P., Perré P., Girard P. Modification of Mass Transfer Properties in Poplar Wood (*P. robusta*) by a Thermal Treatment at High Temperature. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2004, vol. 62, pp. 113–119. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0459-5>
23. Schwarzkopf M., Burnard M., Tverezovskiy V., Treu A., Humar M., Kutnar A. Utilisation of Chemically Modified Lampante Oil for Wood Protection. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, pp. 1471–1482. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1336-6>
24. Xu L., Xiong Y., Dang B., Ye Z., Jin C., Sun Q., Yu X. *In-situ* Anchoring of Fe₃O₄/ZIF-67 Dodecahedrons in Highly Compressible Wood Aerogel with Excellent Microwave Absorption Properties. *Materials & Design*, 2019, vol. 182, art. 108006. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108006>

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

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

Original article

УДК 691+677

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-185-197

Processing Factors and Properties of Thermal Insulation Boards Made of Plant Fillers

*Irina V. Susoeva*¹✉, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*; *ResearcherID: R-1053-2018*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

*Tatiana N. Vakhnina*¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*;
ResearcherID: ABH-2006-2021, *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>*

*Andrey A. Titunin*¹, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.*; *ResearcherID: W-5121-2017*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

*Varvara E. Rumyantseva*², *Doctor of Engineering, Prof.*; *ResearcherID: W-4421-2017*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>

¹Kostroma State University, ul. Dzerzhinskogo, 17, Kostroma, 156007, Russian Federation;
i.susoeva@yandex.ru✉, t_vachnina@mail.ru, titunin62@mail.ru

²Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevskiy prosp., 21, Ivanovo, 155334, Russian Federation; varrym@gmail.com

Received on August 6, 2021 / Approved after reviewing on November 5, 2021 / Accepted on November 8, 2021

Abstract. Wood processing soft waste is mainly used in the production of fuel briquettes, irrecoverable (non-recyclable) waste from spinning flax and cotton are incinerated or sent to dump. The development of methods for recycling non-recyclable cellulosic waste through the product manufacturing is relevant, both from the resource conservation perspective, as well as the environmental point of view. The issues of plant waste recycling through the manufacturing of various types of products are widely developed in the Russian and foreign scientific research practice. Researchers deal with the processing of wheat, rice straw, bamboo stalks, and other cellulosic materials. There is a plenty of published information on methods of soft wood waste recycling. However, no research on recycling irrecoverable waste of spinning flax and cotton fibers had been carried out before this paper. We propose to produce thermal insulation boards based on phenol-formaldehyde resol binder using flax and cotton spinning waste and soft wood processing waste. The wet production method used here involves mixing the filler with water, a precipitant solution and a binder. After spinning the material is dried. The paper presents the results of determining the physical and mechanical properties and thermal conductivity coefficient of boards made of plant waste. The research was carried out according to the B-plan of the second order. Adequate regression mathematical models of the dependences of physical and mechanical parameters of the boards on the varying factors of the production process were developed according to the experimental data processing results. Using the developed regression models we built the response surfaces of the composite parameters: the bending strength of the boards, the thickness swelling of the boards after 24 h of exposure in water and the thermal conductivity coefficient. Nomograms of the dependencies of board parameters on the values of varying factors have been developed based on the mathematical models analysis. The nomograms are the basis for the development of practical recommendations for determining the rational values of the parameters of insulation board materials production from irrecoverable waste of spinning flax and cotton and soft wood processing waste.



Keywords: plant waste, flax, cotton, wood, composite boards, regression model, ultimate strength, static bending, thickness swelling, thermal conductivity coefficient

For citation: Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Titunin A.A., Rummyantseva V.E. Processing Factors and Properties of Thermal Insulation Boards Made of Plant Fillers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 185–197. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-185-197>

Научная статья

Технологические факторы и свойства теплоизоляционных плит из растительных наполнителей

И.В. Сусоева¹✉, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Т.Н. Вахнина¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [ABH-2006-2021](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

А.А. Титунин¹, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

В.Е. Румянцева², д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [W-4421-2017](https://orcid.org/0000-0001-7226-4580),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>

¹Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, д. 17, г. Кострома, Россия, 156007; i.susoeva@yandex.ru✉, t_vakhnina@mail.ru, titunin62@mail.ru

²Ивановский государственный политехнический университет, Шереметевский просп., д. 21, г. Иваново, Россия, 155334; varyym@gmail.com

Поступила в редакцию 06.08.21 / Одобрена после рецензирования 05.11.21 / Принята к печати 08.11.21

Аннотация. Мягкие отходы переработки древесины в основном используют для производства топливных брикетов, невозвратные (неиспользуемые) отходы прядения льна и хлопка сжигают или отправляют на свалку. Поиск способов утилизации невозвратных целлюлозосодержащих отходов путем производства продукции актуален и с позиций ресурсосбережения, и с экологической точки зрения. В практике российских и зарубежных научных исследований широко разрабатывается такое направление, как утилизация растительных отходов путем производства продукции. Изучаются вопросы переработки пшеничной, рисовой соломы, стеблей бамбука и других целлюлозосодержащих материалов. Существует много публикаций о способах утилизации мягких древесных отходов. Однако исследований в области переработки невозвратных отходов прядения льняных и хлопковых волокон до работы авторов статьи не проводилось. Нами предлагается изготавливать из отходов прядения льна и хлопка и мягких отходов переработки древесины теплоизоляционные плиты на фенолоформальдегидном резольном связующем. Используется мокрый способ производства, при котором наполнитель смешивается с водой, раствором осадителя и связующего, после отжима материал сушится. Представлены результаты определения физико-механических показателей и коэффициента теплопроводности плит, изготовленных из растительных отходов. Исследование проводилось по В-плану второго порядка. Обработка экспериментальных данных позволила разработать адекватные регрессионные математические модели зависимости физико-механических показателей плит от варьируемых факторов процесса

производства. По этим регрессионным моделям построены поверхности отклика показателей композита: предела прочности плит при статическом изгибе, их разбухания по толщине за 24 ч пребывания в воде и коэффициента теплопроводности. На основе анализа моделей получены номограммы зависимости показателей плит от варьируемых факторов. Номограммы являются основой для разработки практических рекомендаций по определению рациональных параметров производства теплоизоляционных плитных материалов из неиспользуемых (невозвратных) отходов прядения льна и хлопка и мягких отходов переработки древесины.

Ключевые слова: растительные отходы, лен, хлопок, древесина, композиционные плиты, регрессионная модель, предел прочности, статический изгиб, разбухание по толщине, коэффициент теплопроводности

Для цитирования: Сусоева И.В., Вахнина Т.Н., Титунин А.А., Румянцева В.Е. Технологические факторы и свойства теплоизоляционных плит из растительных наполнителей // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 185–197. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-185-197>

Introduction

Processing of plant materials, such as wood and annuals (flax, cotton, etc.) inevitably generates waste, some of which is irrecoverable, i.e. is sent to the dump or incinerated. Both ways of plant waste disposal negatively affect the biosphere. The problem of recycling waste by using it in product manufacturing is relevant worldwide. Russia generates about 4.5 million tons of wood waste per year, and despite there has been a decline in wood waste over the past three years its amount exceeds the data from 2012 according to the Federal Service for Supervision of Natural Resources (Rosprirodnadzor) [24]. Approximately 1 million tons of wood waste in Russia remains unrecycled annually [39]. However, not only Russia rich with wood resources generates a significant amount of irrecoverable wood waste. According to the Statistical Office of the European Union (Eurostat) such countries as Germany, France, Great Britain, etc., generate a vast amount of wood waste annually [6]. Germany leads here with about 400 thousand tons per year [5].

This is the reason for the high relevance of works on waste recycling. Conventionally, plant waste is used in hydrolysis production [16, 30]; since the 20th century it has been used for fuel needs [8]. Further increase in the use of wood waste as a fuel is predicted both abroad [27] and in Russia [35], which is positive from an energy point of view [15, 28]. However, this trend does not reduce the environmental impact caused by the burning of plant materials [17]. More preferable methods of plant waste recycling are bioconversion [1, 3, 4, 19, 29] and hydrolysis [18, 23, 27, 30]; plant waste recycling for the purpose of producing phenolic compounds, oligosaccharides, and polysaccharides with a low degree of polymerization is also promising [14].

Engineering progress in the field of chemical and chemical-mechanical processing of plant raw materials allows almost all biomass to be used, but different types of processing have different efficiency. The share of the final product output in the wood chemical industry (pulp and paper production, hydrolysis production, including ethanol production) is 62–68 %, while the output in the board production reaches 90 % [19]. Technologies for the production of board materials from fine plant

particles enable the use of various types of lignocellulosic waste for the production of construction materials. However, the extensive damage of plant cells in waste [36] hinders its use for the production of structural building materials, excluding materials on mineral binders. There are solutions for the return of industrial waste of wood fiberboard production to the main process, but usually this is wood fiber lost with circulating water [2] or during board size trimming [20].

A promising direction for recycling plant waste is the production of thermal insulation board materials, such as soft fiberboard. T. Tabarsa remarks that the production of thermal insulation boards is important in terms of resource-saving technologies, but problematic for European countries due to the limited reserves of forest resources near industrially developed areas. So it requires the use of alternative plant materials [12, 21, 34]. Urea-formaldehyde (UFC), polyisocyanate (PMDI), and phenol-formaldehyde (PFC) resins are used as binders [21, 22].

There is a great deal of research in the field of producing composite materials from non-wood plant fibers and waste, including those based on a combined wood waste filler with the addition of plant fibers. G. Han et al. [11] and S. Halvarsson et al. [9, 10] studied the performance of wood fiberboards with wheat and reed grass added based on UFC and melamine-formaldehyde (MFS) binders. J.E.G. van Dam et al. used coconut fiber as a composite filler [7, 40]. Composites made of bamboo and rice straw have been developed [25]. J. Kanagaraj et al. [13] studied composite materials of cotton fibers and corn stalks. Work [26] presents the results of studying the physical and mechanical properties of composite materials made of kenaf fibers carried out by M.J. Saad and I. Kamal. The research results on the use of flax fiber processing waste in the production of composites are also known [31, 34].

A wide range of research on recycling plant waste into composite materials shows the relevance of this direction – development of thermal insulation boards made of plant waste and based on thermosetting binder. However, there are no developments in Russian and foreign research practice on usage of soft wood processing waste and irrecoverable waste of flax and cotton spinning as a filler of thermal insulation board composite materials. The research aims at substantiation of rational values of production factors of thermal insulation composites made of soft wood waste and irrecoverable cellulosic fiber spinning waste with the necessary physical-mechanical and operational properties.

Research objects and methods

The laboratory of the Department of Logging and Wood Processing Industries (Kostroma State University, Kostroma, Russia) develops thermal insulation board materials with a filler made of wood waste and irrecoverable waste of the flax and cotton fibers production [38].

The analogue material is wet-processed thermal insulation soft fiberboard (grade M3 according to the Russian state standard GOST 4598–2018). The material being developed is not a complete analogue of soft fiberboard, therefore, it is not possible to speak of the compliance of its parameters with the fiberboard parameters. The materials are united by the method of wet formation and drying of boards. It is impossible to obtain a low-density material with the desired complex of performance properties by the wet method only from soft wood waste. This is due to the insufficient amount of active hydroxyls in pulp microfibrils without wood grinding. Grinding

of this wood material will be ineffective due to significant damage of the original wood fine material and a high yield of fiber fragments. Finely-dispersed waste from the spinning of plant annuals is formed after chemical treatment of raw materials at the stage preceding fiber spinning and subsequent repeated mechanical exposures. At the same time, the cellulose polymerization degree of materials decreases [32, 36], the mobility of cellulose macromolecules increases and hydroxyls are activated on the microfibril surface, which leads to an increase in the material intermolecular hydrogen bonds [33].

The fractional composition of the filler made of plant waste was determined by sieving in a sieve analyzer and weighing the fraction share. The results of determining the fractional composition of the filler are presented in table 1.

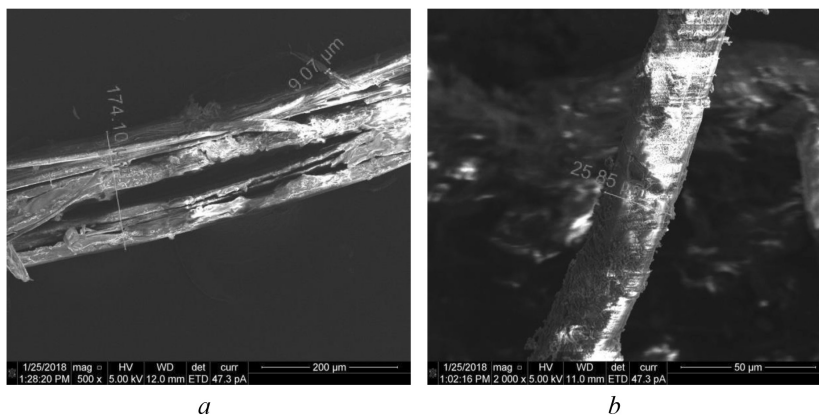
Table 1

Results of determining the filler fractional composition

Fraction	Fraction share i_{fr} , %		
	cotton waste	flax waste	soft wood waste (coniferous)
–/10	1.14	6.01	1.34
10/7	1.82	0.60	20.16
7/5	2.94	0.90	14.0
5/2	19.64	7.46	29.72
2/0.5	36.36	33.82	28.29
Tray	38.10	51.21	6.49

Irrevocable waste of flax and cotton spinning has an average length: 4.76 mm for cotton; 4.12 mm for flax.

Photographs of flax fiber spinning waste and flax waste composite made by the authors using a FEI QUANTA 3D FEG scanning electron microscope are shown in fig. 1.

Fig. 1. Photographs: *a* – flax fiber spinning waste; *b* – plant waste composite

The particles of the plant waste filler have significant damage and a large specific surface area, therefore, the binder covers only part of the filler surface (fig. 1*b*). Table 2 shows the results of the physicochemical analysis of the plant waste.

Table 2

Composition of plant materials, %

Filler		Cellulose	Lignin	Ash content	Water-soluble substances *
Irrevocable spinning waste:	cotton	44.0	22.7	17.0	0.01
	flax	54.0	24.9	5.0	0.02
Soft wood waste:	pine	42.0	25.7	0.3	1.85
	spruce	53.8	28.0	0.2	1.70

*Soluble in hot water.

A synthetic phenol-formaldehyde binder (PFB) was used as a matrix for the composite. The binder consumption varied from 0 to 40 % of the filler weight.

The filler was mixed with water; the binder and the precipitant (aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3$) were added in an amount of 1 % of the resin weight. The material was placed in a mold with a grid, squeezed out at a specific pressure of 0.95 MPa, removed from the mold and placed in a drying oven. Board samples were dried for 2 h at a temperature of 100–170 °C, then conditioned for 24 h at a temperature of 20 °C. The average density of composite boards was 275 kg/m³.

Studies at the previous stage showed a significant scatter in values of parameters of the composites being developed [37]. The B-plan of the second order was used as a method of experimental research in order to substantiate the rational values of the production process factors of plant waste material. Table 3 presents the matrix of the B₃ plan. This plan is close to D-optimal, i.e., the generalized variance of the estimates of the regression coefficients is close to the minimum. This is a significant advantage of the B-plan.

Table 3

B₃ plan matrix in coded levels of factors

No.	X_1	X_2	X_3
1	+	+	+
2	–	+	+
3	+	–	+
4	–	–	+
5	+	+	–
6	–	+	–
7	+	–	–
8	–	–	–
9	+	0	0
10	–	0	0
11	0	+	0
12	0	–	0
13	0	0	+
14	0	0	–

The assessment of the physical and mechanical properties of the boards was carried out in accordance with the Russian state standard GOST 10633–2018 “Wood-Shaving and Wood-Fiber Plates. General Regulations in Testing Physical and Mechanical Properties”.

Results and discussion

The factors varied in the experiment and their levels are presented in table 4. Output values: Y_1 – static bending strength (σ_t), MPa; Y_2 – thickness swelling of boards for 24 h (P_h), %; Y_3 – thermal conductivity coefficient (λ), W/mK.

Table 4

Variable factors and their natural and coded levels

Factor	Factor level		Variation levels			Variation interval, Δ_i
	natural	coded	-1	0	+1	
Mass fraction of binder additive, %	F_m	X_1	0	20	40	20
Drying temperature, °C	T_{dry}	X_2	100	135	170	35
Share of wood waste additive, % by weight of a plant filler	S_w	X_3	0	25	50	25

Mathematical models of parameters of flax fiber spinning waste composites with the addition of soft wood wastes (in coded levels of factors) were obtained based on the results of experimental data processing. Equations show them:

$$Y_1 = 0.334 + 0.071X_1 + 0.039X_2 - 0.057X_3 + 0.026X_1^2 + 0.026X_2^2 + 0.026X_3^2 + 0.011X_1X_2 - 0.011X_1X_3 - 0.011X_2X_3;$$

$$Y_2 = 12.51 - 3.85X_1 - 1.43X_2 + 0.81X_3 - 0.561X_1^2 + 0.539X_2^2 - 0.561X_3^2 + 0.300X_1X_2 + 0.275X_1X_3 - 0.250X_2X_3;$$

$$Y_3 = 0.067 + 0.003X_1 - 0.001X_2 + 0.002X_3 - 0.002X_1^2 - 0.001X_3^2 - 0.001X_1X_3.$$

Figure 2 shows the response surfaces of the dependences of the output values on the variable factors. Namely, the dependences of the strength of the boards at static bending and thickness swelling for 24 h on the share of binder additive (X_1) and drying temperature (X_2).

The increase in the share of binder additive and the drying temperature of the boards in the entire range of factors variation increases their static bending strength. The increase of the soft wood waste share in the composite filler up to 50 % (by the filler weight) results in the reduction of the board static bending strength by 0.1 MPa, i.e., the strength is reduced by 17–30 % (depending on the combination of levels of the varying processing factors in the experiment). It is recommended to use the maximum values of the binder additive share and the composite drying temperature for the maximum share of wood waste additive in order to ensure the minimum strength of the analogue material – soft thermal insulation wood fiber boards – 0.4 MPa. Sufficient operating strength without a binder will be provided only by the combination of factors “maximum drying temperature + filler without wood waste”. It is possible to use the drying temperature of boards of 100–170 °C at any share of wood waste additive when the share of the binder additive is 20 %.

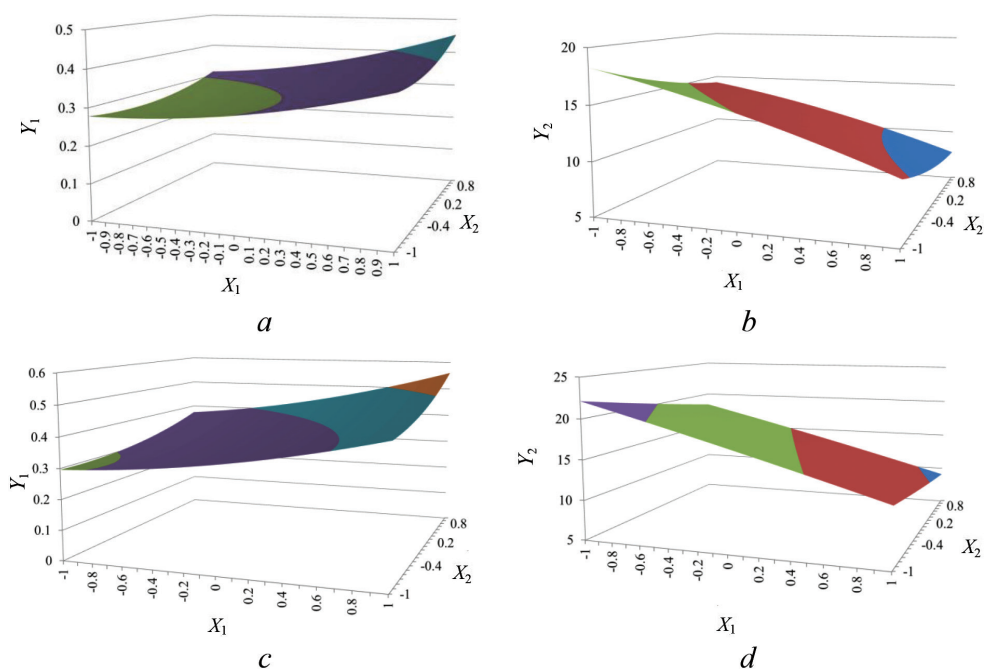


Fig. 2. Response surfaces for the composites: *a, b* – with the maximum share of soft wood waste in the filler ($X_3 = +1$); *c, d* – with maximum share of flax and cotton spinning waste in the filler ($X_3 = -1$)

An increase in the share of the soft wood waste additive to the filler results in a 10–30 % increase in thickness swelling of the boards after 24 h of exposure in water (depending on the combination of the levels of factors). A significant decrease in the thickness swelling of the boards provides an increase in the binder share. An increase in the drying temperature of the boards reduces their thickness swelling less significantly.

At any share of soft wood waste additive and any combinations of processing factors levels the thermal conductivity coefficient of the composite boards is in the range of 0.058–0.070 W/mK, i.e. the material is characterized by good thermal insulating properties. The share of the binder additive causes an increase and then stabilization of the material thermal conductivity coefficient due to the higher value of the parameter for the cured binder in comparison with the thermal conductivity coefficient of the cellulosic filler. An increase in the drying temperature of the boards, in addition to the improvement of the physical and mechanical properties of the material, also causes a 2.5–3.0 % decrease in the composite thermal conductivity coefficient.

Based on the research results a set of nomograms was developed for practical purposes. They enable to rapidly select the structure-forming components of the composite with the given properties. As an example, figure 3 shows the dependence of physical and mechanical properties on the share of binder additive for composites made of flax waste and cotton waste with the addition of various soft wood waste.

The following symbols are used in the figure: FW – flax waste; BC – bark of conifers; BH – bark of hardwood; SS – shavings of softwood; SH – shavings of hardwood; numbers indicate the shares of the filler additive.

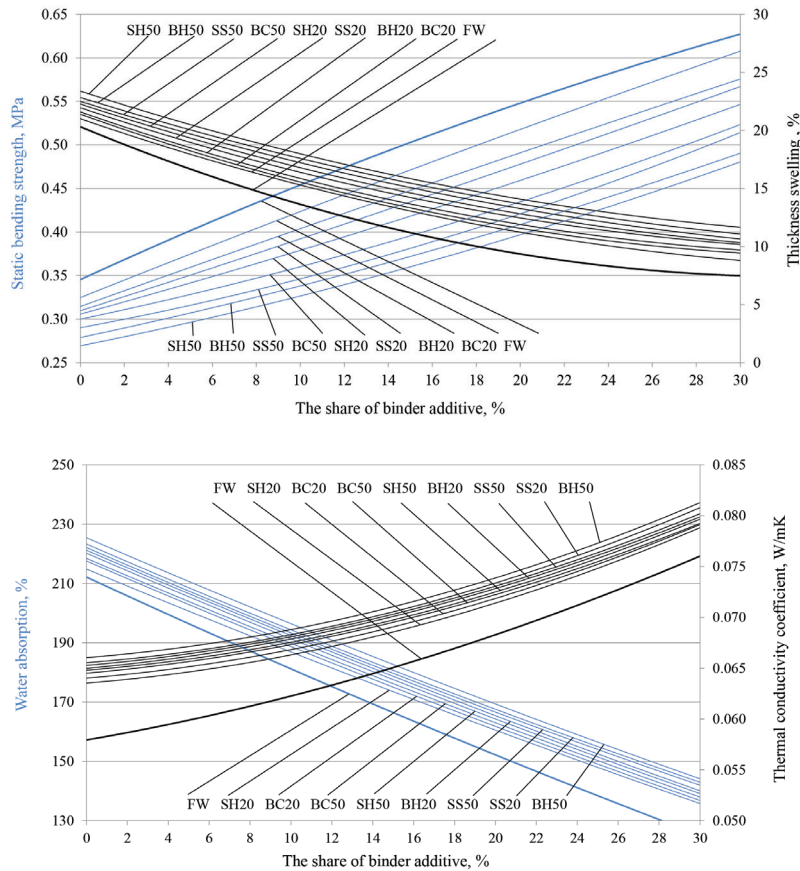


Fig. 3. Dependences of physical and mechanical properties on the share of the binder additive (PFB) for the flax waste composite with the addition of soft wood waste

Conclusion

Cellulosic waste, such as soft wood, namely wood shavings and bark of deciduous and coniferous species, and irrecoverable waste of flax and cotton spinning were used as fillers of thermal insulation boards. The lignin content in irrecoverable plant waste of flax and cotton is comparable to that in wood raw material. This is due to the presence of a significant amount of bolls, stalks (cotton waste) and shover (flax waste) in the spinning waste. The cellulose content in cotton waste is the same as in wood. The cellulose content in flax production waste is significantly higher than in wood raw materials. Flax and cotton wastes contain less water-soluble substances compared to wood raw materials. Flax and cotton plant waste has significant ash content, which is the reason for the waste contamination. The experiment showed that despite the high ash content, flax and cotton irrecoverable waste can be used for the thermal insulation board production. The high content of cellulose in the plant waste enables to create a composite structure via hydrogen bonds between the particles and covalent bonds with the binder.

The required operational parameters of the thermal insulation composite made of industrial production cellulosic waste (soft wood waste and irrecoverable

fine-dispersed waste of flax and cotton spinning) are provided without the energy-consuming operation of wood material grinding necessary for the analogue material (soft fiberboard). Chemical and mechanical effects on flax and cotton plant fibers in technological processes of raw material preparation and fiber spinning provide activation of hydroxyls on the surfaces of pulp fibrils, which creates conditions for the formation of hydrogen bonds front and covalent bonds between pulp and binder.

Different levels of the production process factors depending on the composition of the filler are recommended to ensure the required physical and mechanical properties of the composite thermal insulation material with the filler based on the cellulosic waste and polycondensation phenol-formaldehyde binder.

The recommended drying temperature is 100–170 °C, when using only irrecoverable flax waste as a filler, according to the schedules the share of the PFB additive should be not less than 20 %. It is necessary to increase the PFB mass fraction up to 40 % when using the combined filler of 50 % of soft wood waste and 50 % of flax fiber spinning waste.

The thermal conductivity coefficient of the material is 0.062–0.070 W/mK at the PFB additive of 20 % and more, at any drying temperature and at the maximum share of soft wood waste additive, which indicates strong thermal insulation properties of the material.

Thus, this combination of processing factors can be recommended for the production of thermal insulation boards on phenol-formaldehyde binder with a combined filler of soft wood waste and irrecoverable waste of flax spinning.

REFERENCES

1. Bari M.N., Shashi F.S., Habib M.H. Potential Agricultural Lignocellulosic Waste Materials for Bioconversion. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Civil Engineering*. Chittagong, Bangladesh, 2016, pp. 630–634.
2. Chistova N.G., Petrusheva N.A., Chistov R.S. Some Issues of Improving the Use of Additional Wood Raw Materials at Timber Processing Enterprises of the Angara-Yenisey Region. *Fundamental research*, 2004, no. 3, pp. 121–123. (In Russ.).
3. Darmov I.V., Gorshunova E.I., Tarasova T.S. The Study of Natural Isolates of *Fusarium* spp. Micromycetes – Ligninolytic Enzymes Producers. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 2017, vol. 159, no. 1, pp. 72–84. (In Russ.).
4. Dulermo T., Coze F., Virolle M., Méchin V., Baumberger S., Froissard M. Bioconversion of Agricultural Lignocellulosic Residues into Branched-Chain Fatty Acids Using *Streptomyces lividans*. *OCL*, 2016, vol. 23, no. 2, art. A202. <https://doi.org/10.1051/occl/2015052>
5. *FAO Yearbook of Forest Products*. Rome, FAO, 2012. 358 p.
6. Garcia C.A., Hora G. State-of-the-Art of Waste Wood Supply Chain in Germany and Selected European Countries. *Waste Management*, 2017, vol. 70, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.025>
7. Glowacki R., Barbu M.C., van Wijck J., Chaowana P. The Use of Coconut Husk in High Pressure Laminate Production. *Journal of Tropical Forest Science*, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 27–36.
8. Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 224 p. (In Russ.).

9. Halvarsson S., Edlund H., Norgren M. Properties of Medium-Density Fibreboard (MDF) Based on Wheat Straw and Melamine Modified Urea Formaldehyde (UMF) Resin. *Industrial Crops and Products*, 2008, vol. 28, iss. 1, pp. 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.005>
10. Halvarsson S., Edlund H., Norgren M. Manufacture of Non-Resin Wheat Straw Fibreboards. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 29, iss. 2-3, pp. 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.08.007>
11. Han G., Kawai Sh., Umemura K., Zhang M., Honda T. Development of High-Performance UF-Bonded Reed and Wheat Straw Medium-Density Fiberboard. *Journal of Wood Science*, 2001, vol. 47, no. 5, pp. 350–355. <https://doi.org/10.1007/BF00766784>
12. Imken A.A.P., Plinke B., Mai C. Characterisation of Hardwood Fibres Used for Wood Fibre Insulation Boards (WFIB). *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021, vol. 79, pp. 915–924. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01698-y>
13. Kanagaraj J., Velappan K.C., Chandra Babu N.K., Sadulla S. Solid Wastes Generation in the Leather Industry and Its Utilization for Cleaner Environment – A Review. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2006, vol. 65, pp. 541–548.
14. Khuwijitjaru P. Utilization of Plant-Based Agricultural Waste by Subcritical Water Treatment. *Japan Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 17, iss. 2, pp. 33–39. <https://doi.org/10.11301/jsfe.17.33>
15. Kostyleva S.V. Prospective Directions of Development of Timber Industry Complex in the Sphere of Processing of Wood Waste in Irkutsk Region. *Woodworking: Technologies, Equipment and Management of the 21st Century: Collection of Academic Papers of the 12th International Eurasian Symposium*. Yekaterinburg, USFEU, 2017, pp. 10–15. (In Russ.).
16. Kulagin E.P. *Utilization of By-Products and Wastes of Chemical Wood Processing*. Nizhny Novgorod, NNGASU Publ., 2000. 300 p. (In Russ.).
17. Lachos-Perez D., Brown A.B., Mudhoo A., Martinez J., Timko M.T., Rostagno M.A., Forster-Carneiro T. Applications of Subcritical and Supercritical Water Conditions for Extraction, Hydrolysis, Gasification, and Carbonization of Biomass: A Critical Review. *Biofuel Research Journal*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 611–626. <https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.2.6>
18. Medvedev S.O., Bezrukikh Yu.A., Mokhiev A.P. Prospects of Development of Hydrolytic Production in the Timber Industry Centers of Siberia. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1(13-1), pp. 400–403. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/10185>
19. Mokhiev A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Inzenernyy vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2015, iss. 2, part 2. (In Russ.). Available at: <http://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (accessed 14.06.21).
20. Morozov I.M., Yakimov V.A., Chistova N.G., Alashkevich Yu.D., Zyrjanov M.A. Getting Dry Fiberboards Production, Manufacture Fiber Using Wood Waste from Machines. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of plant raw material*, 2015, no. 4, pp. 119–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201504852>
21. Özlüsoyly I., Istek A. The Effect of Hybrid Resin Usage on Thermal Conductivity in Ecological Insulation Panel Production. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*. Kiev, 2019, pp. 292–296.
22. Özlüsoyly I., Istek A. The Effect of Fiber Usage on Thermal Conductivity in Bark Insulation Board Production. *Proceedings of the 3rd International Mediterranean Forest and Environment Symposium*. Kahramanmaraş, 2020, pp. 482–487. (In Turk.). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/341709007> (accessed 14.06.21).

23. Pelaez-Samaniego M.R., Englund K.R. Production of Sugars from Wood Waste Materials via Enzymatic Hydrolysis. *Waste Biomass Valorization*, 2017, vol. 8, pp. 883–892. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9652-8>
24. Production and Consumption Waste Generation by Type of Economic Activity. *Federal State Statistics Service Site*. (In Russ.). Available at: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tab1/oxr_otxod1.htm (accessed 14.06.21).
25. Quintana G., Velásquez J., Betancourt S., Gañán P. Binderless Fiberboard from Steam Exploded Banana Bunch. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 29, iss. 1, pp. 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.007>
26. Saad M.J., Kamal I. Mechanical and Physical Properties of Low Density Kenaf Core Particleboards Bonded with Different Resins. *Journal of Science and Technology*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 17–32.
27. Senila L., Varaticeanu C., Roman M., Miclean M., Roman C. Bioethanol Production from Wood Waste. *STUDIA UBB AMBIENTUM, LIX*, 2014, vol. 1-2, pp. 149–154.
28. Shegelman I.R., Shchukin P.O., Morozov M.A. Place of Bioenergetics in Energy Balance of Forestry Region. *Science and Business: Ways of Development*, 2011, no. 6, pp. 151–154. (In Russ.).
29. Shitu A., Izhar S., Tahir T.M. Sub-Critical Water as a Green Solvent for Production of Valuable Materials from Agricultural Waste Biomass: A Review of Recent Work. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2015, vol. 1, iss. 3, pp. 255–264.
30. Singh Y.D., Satapathy K.B. Conversion of Lignocellulosic Biomass to Bioethanol: An Overview with a Focus on Pretreatment. *International Journal of Engineering and Technologies*, 2018, vol. 15, pp. 17–43. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/IJET.15.17>
31. Stuart T., Liu Q., Hughes M., McCall R.D., Sharma H.S.S., Norton A. Structural Biocomposites from Flax – Part I: Effect of Bio-Technical Fibre Modification on Composite Properties. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, iss. 3, pp. 393–404. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.06.002>
32. Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Sviridov A.V. The Chemical Composition and Method Utilization of Production Waste Cotton and Linen Fibers. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of plant raw material*, 2017, no. 3, pp. 211–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031492>
33. Susoeva I., Vakhnina T., Titunin A., Grunin Y. Water Resistance of Thermal Insulation Composites with Cellulose-Containing Filler. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 263, art. 01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301002>
34. Tabarsa T., Jahanshahi S., Ashori A. Mechanical and Physical Properties of Wheat Straw Boards Bonded with a Tannin Modified Phenol-Formaldehyde Adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 2011, vol. 42, iss. 2, pp. 176–180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.09.012>
35. Termination of Wood Pellets Supply to Europe Will Cause Waste Disposal Problems at Russian Sawmills. *Materials of the Lesprom Site*. (In Russ.). Available at: <http://www.lesprom.com/ru/news> (accessed 14.06.21).
36. Titunin A.A., Susoeva I.V., Vakhnina T.N. Influence of Cyclic Temperature and Humidity on Properties of Composites from Vegetable Raw Materials. *Wood Structure, Properties and Quality – 2018: In Honor of B.N. Ugolev. Proceedings of the 6th RCCWS International Symposium Dedicated to the 50th Anniversary of the Regional Coordinating Council of Wood Science*. Krasnoyarsk, SB RAS Publ., 2018, pp. 196–200. (In Russ.).
37. Titunin A.A., Vakhnina T.N., Susoeva I.V. Analysis the Durability and Water Resistance of Heat Insulating Composite Plates from Waste of Flax Fiber. *Izvestiya*

Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti = Textile Industry Technology (Series "Proceedings of Higher Educational Institutions"), 2017, no. 5, pp. 49–52. (In Russ.).

38. Titunin A.A., Vaxnina T.N., Susoeva I.V. Study of the Properties of Thermal Insulation Materials Waste from the Production of Cotton and Flax Fiber. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury* = Russian Journal of Building Construction and Architecture, 2017, no. 2(46), pp. 37–45. (In Russ.).

39. Use and Disposal of Production and Consumption Waste by Type of Economic Activity. *Federal State Statistics Service Site*. (In Russ.). Available at: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tab1/oxr_otxod2.htm (accessed 14.06.21).

40. Van Dam J.E.G., van den Oever M.J.A., Keijsers E.R.P. Production Process for High Density High Performance Binderless Boards from Whole Coconut Husk. *Industrial Crops and Products*, 2004, vol. 20, iss. 1, pp. 97–101. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.12.017>

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 582.29:550.47

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-198-213

**Содержание фенольных соединений в лишайниках
в зонах тектонических разломов**

И.А. Паламарчук, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAF-5454-2019](https://orcid.org/0000-0002-2947-1370),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2947-1370>

М.Е. Белоусова[✉], мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAL-7068-2020](https://orcid.org/0000-0002-6099-1358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6099-1358>

О.С. Бровко, канд. хим. наук, вед. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [AAF-5387-2019](https://orcid.org/0000-0002-1961-7831),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-7831>

В.В. Старицын, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [J-3588-2018](https://orcid.org/0000-0001-6891-1247),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6891-1247>

А.Д. Ивахнов, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

А.А. Слобода, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAL-3955-2021](https://orcid.org/0000-0002-1415-9050),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1415-9050>

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; irpalamarchuk@mail.ru, marinabelousovae@yandex.ru[✉], brovko-olga@rambler.ru, Corwin87@mail.ru, ivahnov-tema@yandex.ru, sloboda.iepn@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.05.21 / Одобрена после рецензирования 09.08.21 / Принята к печати 11.08.21

Аннотация. Изучено влияние геоэкологических факторов на территории 2 тектонических узлов: Вельско-Устьянского и Холмогорского – на содержание фенольных соединений в лишайниках рода *Cladonia*. Отбор лишайников произведен на пробных площадях, заложенных в центре узлов и за их пределами (контроль). Геохимическая обстановка, почвенно-климатические и экологические условия в зоне тектонических узлов оказывают влияние на химический состав лишайников. Установлено, что зольность лишайников, произрастающих в центре тектонического узла, в 1,8...2,3 раза выше, чем в контроле. Это свидетельствует о значительном накоплении литогенных элементов в талломах лишайников в зоне тектонических разломов. На территории тектонических узлов лишайники подвергаются многофакторным негативным воздействиям (повышенные радиационный фон и тепловой поток, электромагнитное излучение, электрическое и магнитное поля и др.), что провоцирует избыточное генерирование активных кислородных радикалов и способствует перестройке метаболизма лишайников, изменяя динамику накопления фенольных соединений и их биосинтез. Обнаружено, содержание водонерастворимой фракции фенольных соединений в лишайниках увеличивается от контрольной точки к центру тектонического узла. При этом относительная доля водорастворимой фракции в составе общих фенольных соединений снижается.

© Паламарчук И.А., Белоусова М.Е., Бровко О.С., Старицын В.В., Ивахнов А.Д., Слобода А.А., 2022

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

Вероятно, это связано с усилением окислительных и уменьшением восстановительных процессов в лишайниках под влиянием негативных условий. Показано, что биосинтез фенольных соединений в лишайниках наиболее активен в весенне-летний (апрель, июль) период вегетации. Воздействие геоэкологических факторов усиливает биосинтез вторичных метаболитов фенольной природы в лишайниках в условиях тектонических узлов: усниновой кислоты и атранорина. Содержание усниновой кислоты в составе водонерастворимой фракции ФС в лишайниках, произрастающих в центре тектонического узла, в 1,5...1,7 раза выше в весенне-летний период вегетации, чем в лишайниках, произрастающих за пределами тектонического узла. Количественное распределение водонерастворимой фракции фенольных соединений зависит от зоны таллома лишайника и носит градиентный характер: содержание водонерастворимых фенольных соединений в верхних растущих частях лишайников, произрастающих в центре тектонического узла и в контроле, соответственно в 2 и 1,7 раза выше, чем в старых зонах. Таким образом, фенольные соединения в лишайниках являются активными метаболитами, и их содержание в талломах может служить биомаркером состояния окружающей среды.

Ключевые слова: лишайники, *Cladonia*, тектонический узел, фенольные соединения, лишайниковые кислоты, водонерастворимые фенольные соединения, водорастворимые фенольные соединения, усниновая кислота, атранорин, Вельско-Устьянский тектонический узел, Холмогорский тектонический узел

Благодарности: Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН ФНИ 2018–2021 г. «Физико-химические, генетические и морфологические основы адаптации растительных объектов в условиях изменяющегося климата высоких широт» (№ государственной регистрации АААА-А18-118012390231-9) с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ) и ЦКП НО «КТ РФ в области экологической безопасности Арктики» (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН).

Для цитирования: Паламарчук И.А., Белоусова М.Е., Бровко О.С., Старицын В.В., Ивахнов А.Д., Слобода А.А. Содержание фенольных соединений в лишайниках в зонах тектонических разломов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 198–213. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-198-213>

Original article

The Content of Phenolic Compounds in Lichens in the Tectonic Fault Zones

Irina A. Palamarchuk, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-5454-2019](https://orcid.org/0000-0002-2947-1370), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2947-1370>

Marina E. Belousova[✉], Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAL-7068-2020](https://orcid.org/0000-0002-6099-1358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6099-1358>

Olga S. Brovko, Candidate of Chemistry, Leading Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAF-5387-2019](https://orcid.org/0000-0002-1961-7831), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-7831>

Vadim V. Staritsyn, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [J-3588-2018](https://orcid.org/0000-0001-6891-1247), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6891-1247>

Artem D. Ivakhnov, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

Anatoliy A. Sloboda, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAL-3955-2021](https://orcid.org/0000-0002-1415-9050),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1415-9050>



N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; irpalamarchuk@mail.ru, marinabelousovae@yandex.ru[✉], brovko-olga@rambler.ru, Corwin87@mail.ru, ivahnov-tema@yandex.ru, sloboda.iepn@yandex.ru

Received on May 5, 2021 / Approved after reviewing on August 9, 2021 / Accepted on August 11, 2021

Abstract. The paper studies the influence of geocological factors on the content of phenolic compounds (PCs) in lichens of the genus *Cladonia* in the Velsko-Ustyansky and Kholmogorsky tectonic knots (TKs). Lichens were sampled from the test plots (TPs) laid out in the center of the knots and outside the knots (control). The geochemical situation, soil-climatic and environmental conditions in the zone of TKs influence the lichens chemical composition. It is found that the ash content of lichens growing in the center of the TK is 1.8–2.3 times higher than in the control, which indicates a significant accumulation of lithogenic elements in the lichen thallus in the tectonic fault zone. Lichens are exposed to multifactorial adverse effects (increased radiation background and heat flux, electromagnetic radiation, electric and magnetic fields, etc.) in the territory of TKs. This provokes excessive generation of active oxygen radicals and contributes to the rearrangement of lichen metabolism, changing the dynamics of accumulation of PCs and their biosynthesis. The content of the water-insoluble fraction of PCs in lichens was found to increase from the control point to the center of the TK, while the relative share of the water-soluble fraction of PCs in the total composition decreases. This is probably due to an increase in oxidative processes and a decrease in reductive processes in lichens under adverse conditions. The paper shows that the biosynthesis of PCs in lichens is most active in the spring-summer (April and July) vegetation period. The impact of geocological factors enhances the biosynthesis of secondary metabolites of phenolic nature in lichens in the conditions of the TKs: usnic acid (UA) and atranorin. The content of UA in the composition of the water-insoluble fraction of PCs in lichens growing in the center of the TK is 1.5–1.7 times higher during the spring-summer vegetation period than in lichens growing outside the TK. The quantitative distribution of the water-insoluble fraction of PCs depends on the lichen thallus part and has a gradient character. Their content in the upper growing parts of lichens growing in the center of the TK and in the control is 2 and 1.7 times higher than in the old zones, respectively. Thus, PCs in lichens are active metabolites and their content in thallus can serve as a biomarker of the state of the environment.

Keywords: lichens, *Cladonia*, tectonic knot, phenolic compounds, lichen acids, water-insoluble phenolic compounds, water-soluble phenolic compounds, usnic acid, atranorin, Velsko-Ustyansky tectonic knot, Kholmogorsky tectonic knot

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment “Physico-Chemical, Genetic and Morphological Bases of the Plant Objects Adaptation in the Conditions of the High Latitudes Changing Climate” of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy (FECIAR UrB RAS) of Sciences in 2018–2021 (state registration No. AAAA-A18-118012390231-9) using the equipment of the Core facility center “Arktika” (NArFU) and the Core Facility Centre “Critical Technologies of the Russian Federation in the Field of Environmental Safety in the Arctic” (FECIAR UrB RAS).

For citation: Palamarchuk I.A., Belousova M.E., Brovko O.S., Staritsyn V.V., Ivahnov A.D., Sloboda A.A. The Content of Phenolic Compounds in Lichens in the Tectonic Fault Zones. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 198–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-198-213>

Введение

Фенольные соединения (ФС) – один из важных классов вторичных метаболитов, широко представленных в растениях. Основной структурный элемент всех ФС – бензольное кольцо (базовая единица, из которой путем разных дополнительных превращений образуются почти все ФС растений), связанное с одной или несколькими гидроксогруппами [1, 19]. Фенольные соединения широко распространены в растительном мире, их содержание составляет до 2...3 % от массы органического вещества растения, а в некоторых случаях достигает 10 % и более. ФС разнообразны по своей структуре и функциональным значениям. Они активно участвуют в физиологических процессах растений, формировании клеточных стенок, играют важную роль в обмене веществ, являются регуляторами роста, развития и репродукции, оказывая стимулирующее и ингибирующее воздействие, повышают устойчивость растительных организмов к заболеваниям и неблагоприятным факторам окружающей среды [1, 19]. Разнообразие функций ФС в растительной клетке свидетельствует об их важной роли в механизме адаптации растений к изменениям природных условий и воздействию антропогенных стресс-факторов.

Наиболее изученными ФС лишайников являются «лишайниковые кислоты», их защитные функции и биологическая активность [9]. Лишайниковые кислоты характеризуются высоким уровнем видоспецифичности и не встречаются в организмах из других систематических групп. В слоевище лишайников лишайниковые кислоты располагаются на стенках грибных гиф в виде малорастворимых кристаллов (частично могут переходить в водный раствор) и являются результатом взаимодействия фото- и микобионта [5]. В литературе описано более 1000 лишайниковых кислот, относящихся к различным классам: депсиды, депсидоны, хиноны, ксантоны, дибензофураны, производные пульвиновой кислоты [29, 32, 34]. Наиболее характерна для лишайников и хорошо изучена усниновая кислота (УК), обладающая широким спектром биологической активности [14, 22, 31, 38].

Все лишайниковые кислоты являются специфическими метаболитами лишайников и традиционно используются при таксономических исследованиях. Содержание лишайниковых кислот указывают в дополнение к морфологическим, экологическим и географическим характеристикам изучаемых таксонов [9, 14].

Для лишайников характерно образование не только лишайниковых кислот, но и широко распространенных в растительном царстве производных фенолкарбоновых кислот, формирующихся на ранних стадиях биогенеза ФС и участвующих во многих физиологических процессах [8].

Доказано, что ФС лишайников участвуют в инициации симбиотических взаимодействий [26], регулируют обмен метаболитов между симбионтами [5], обеспечивают адаптацию лишайников к биотическим и абиотическим факторам среды обитания [27, 33]. Изучено [4, 8, 9, 32] изменение биохимических показателей лишайников и содержания низкомолекулярных компонентов, в том числе и ФС, под воздействием различных стрессовых факторов. Однако данных по накоплению, качественному составу и соотношению основных фракций ФС у лишайников, произрастающих в условиях негативного воздействия окружающей среды естественных биоценозов, крайне мало.

Высокая чувствительность к загрязнениям у лишайников, являющихся симбиотическими организмами, вызвана легкой нарушаемостью метаболического равновесия между фотобионтом и микобионтом. В воздухе соединения металлов входят в состав аэрозольных частиц. Например, соли металлов могут быть растворены в мельчайших капельках воды. Не имея корней, воду и сопутствующие поллютанты лишайники впитывают всей поверхностью таллома из атмосферного воздуха и дождевых вод, не обладая при этом механизмами освобождения от них [18, 35, 36]. В результате большой кумулятивной способности лишайники накапливают в своем талломе различные загрязняющие вещества, включая тяжелые металлы [25, 36, 37], поэтому их содержание в нем может служить индикатором состояния окружающей среды [10, 35].

В зонах тектонических разломов геохимические, геофизические и геодинамические поля оказывают совместное воздействие на растительность [2, 12]. Основными отличиями тектонического узла (ТУ) являются повышенные радиационный фон и тепловой поток, электромагнитное излучение, электрическое и магнитное поля. Для таких территорий характерны особые закономерности накопления, интенсивной миграции и физико-химической трансформации загрязняющих веществ. Геохимические аномалии, возникающие в зоне тектонических разломов, могут изменять химический состав почв, подземных и грунтовых вод и являются источником эмиссии в атмосферу фтора, иода, фосфора, кальция, ртути, мышьяка, стронция, естественных радионуклидов, а также газов (радон, метан, углекислый газ и др.) [3, 12]. В результате ТУ становятся источниками поступления металлов в растительные объекты. Вследствие повторяющихся длительное время актов воздействия геоэкологических факторов у растений формируются защитные биологические реакции [3].

Цель исследований – изучение влияния геоэкологических факторов на территории Вельско-Устьянского и Холмогорского ТУ на содержание ФС в лишайниках.

Объекты и методы исследования

Образцы лишайников отобраны на территории 2 ТУ Архангельской области: Вельско-Устьянского и Холмогорского. Подробное описание ТУ севера Русской плиты и сформировавшихся здесь геоэкологических условий приведено в статьях [11, 13]. Исследования выполнены на постоянных пробных площадях (ПП), заложенных в 2015 г. в сосняках брусничных на территории Вельско-Устьянского ТУ в Архангельской области (рис. 1, б) и в 2018–2019 гг. в северо-таежном районе Архангельской области на территории Холмогорского ТУ (рис. 1, а) на вырубке. Пробные площади (30×30 м) заложены в центре ТУ и за их пределами (контроль, 50 км от центра). Всего на 4 ПП (2 в Вельско-Устьянском ТУ и 2 в Холмогорском ТУ) отобрано 20 образцов (массой по 100...150 г каждый) лишайников семейства *Cladoniaceae*: кладония лесная (*Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot.) и кладония оленья (*C. rangiferina* (L.) F. H. Wigg.), – доминирующих на изучаемых территориях. *C. arbuscula* является продуцентом УК, а *C. rangiferina* – атранорина.

Образцы взяты на 5 равноудаленных точках каждой из ПП – метод «конверта». ПП подбирались максимально схожие по лесорастительным и таксационным характеристикам. Состав подростка в центре Холмогорского ТУ и в контроле: ель, сосна, осина, береза повислая; подлеска – рябина; мохово-ли-

шайниковый покров имеет общее покрытие 30 %. Состав древостоя в центре Вельско-Устьянского ТУ и в контроле: сосна, ель, береза повислая; общее проективное покрытие мохово-лишайникового покрова – 50 %.

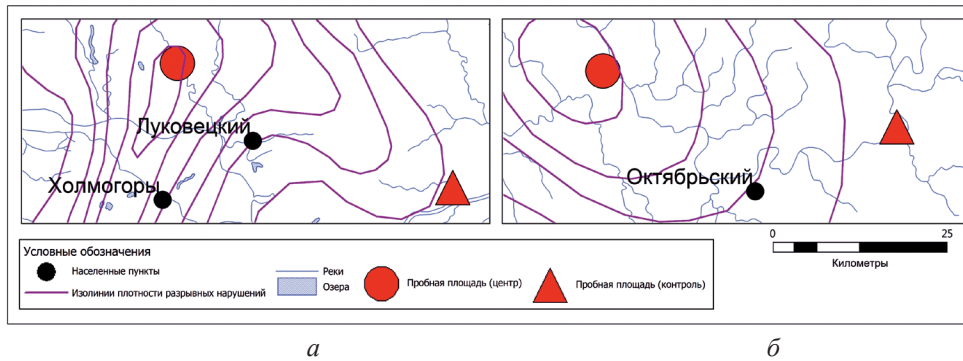


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей в Холмогорском (а) и Вельско-Устьянском (б) ТУ

Fig. 1. Topological map of TPs in the Kholmogorsky (a) and Velsko-Ustyansky (b) TKs

Слоевидные лишайники рода *Cladonia*, считающихся радиально-кустистыми, является переходной формой между листоватыми и кустистыми лишайниками. Представители семейства чаще всего селятся на песчаной почве в хвойных лесах, образуя сплошные покрытия.

Идентификацию лишайников проводили по стандартным методикам с использованием определителей [23, 28]. В лаборатории образцы лишайников очищали с помощью пинцета от посторонних загрязнителей (мхов, хвои, сухой листвы, земли и пр.), обмывали деионизированной водой для удаления с поверхности пылевидных частиц и высушивали до воздушно-сухого состояния.

Содержание ФС в лишайниках устанавливали как в целых талломах, так и в различных зонах талломов, коррелирующих с морфоструктурной организацией лишайников в процессе онтогенеза.

Таллом лишайника разделяли согласно [16] на зоны (рис. 2): живая – верхняя растущая часть таллома (1...1,5 см); молодая – средняя часть лишайника (2...3 см); старая – нижняя (закончившая свой рост) часть таллома лишайника (примерно 4...5 см).

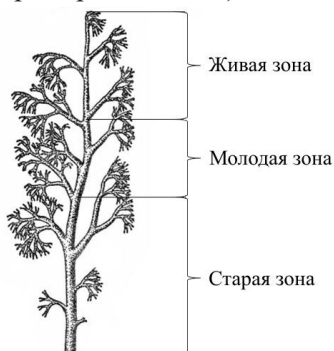


Рис. 2. Морфологическая дифференциация таллома
Fig. 2. Thallus morphological differentiation

ФС извлекали из лишайников, используя в качестве экстрагентов дистиллированную воду и ацетон. Экстракцию водорастворимой фракции ФС проводили дистиллированной водой при 30 °С в течение 1 ч при постоянном пере-

мешивании на шейкере (LOIP LS – 110), а общих ФС – ацетоном на аппарате Сокслета при температуре 50 °С. Количественное содержание ФС в экстрактах определяли спектральным методом Свейна–Хиллиса с реактивом Фолина–Чокальтеу [39] на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония). Калибровочную зависимость строили по галловой кислоте.

Установление количественного содержания и идентификацию лишайниковых кислот в составе ацетонового экстракта проводили с применением стандартов (антранорин и УК фирмы Sigma-Aldrich) методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Хроматографическое разделение – прибором LC-30 Nexera (Shimadzu, Япония) в изократическом режиме. В качестве подвижной фазы использовали 0,5 %-й водный раствор муравьиной кислоты и ацетонитрил в соотношении 20:80. Детектирование проводили диодно-матричным спектрофотометрическим детектором при длине волны 280 нм. Для разделения использовали колонку Zorbax Eclipse Plus C18 (Agilent, США): размеры колонки – 3,0×100 мм, частиц – 3,5 мкм. Колонку термостатировали при 40 °С, скорость потока подвижной фазы – 0,5 мл/мин, объем вводимой пробы – 10 мкл. Образцы растворяли в ацетоне, фильтровали и вводили в хроматографическую систему.

Содержание минеральных веществ (зольность) определяли согласно [7] при 500 °С. Элементный анализ золы лишайников проводили на элементном анализаторе EuroEA 3000 конфигурации CNHS (EuroVector, Италия). Содержание ряда тяжелых металлов и биогенных элементов выявляли на последовательном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Предварительно золу прессовали в таблетки диаметром 13 мм на прессе Retsch PP 25 (давление – 516,8 МПа).

Показатели для каждой серии измерений устанавливали в 3–5-кратной биологической и 3-кратной аналитической повторностях. Результаты экспериментов представлены в виде среднего арифметического и его стандартной ошибки. Для установления статистической взаимосвязи между параметрами использовали t-критерий Стьюдента при доверительном уровне $P_i = 95 \%$.

Результаты исследования и их обсуждение

Геохимическая обстановка, почвенно-климатические и экологические условия в зоне ТУ могут изменять химический состав лишайников, в том числе влиять на качественный и количественный состав ФС [18, 30].

Лишайники отличаются незначительным накоплением минеральных веществ. Согласно данным [24], средняя зольность лишайников колеблется в пределах от 0,7 до 2...4 % и различается в зависимости от видовой принадлежности лишайников, их возраста, субстрата произрастания и условий обитания. Установлено, что зольность образцов лишайников *Cladonia*, произрастающих в центре ТУ, значительно выше, чем в контрольной точке: в Холмогорском ТУ в 1,8 раза (в центре ТУ и в контроле – соответственно 1,03 и 0,58 %), а в Вельско-Устьянском ТУ в 2,3 раза (в 1,24 и 0,54 % соответственно).

Минеральный состав лишайников, в золе которых наблюдается повышенное (в сравнении с контролем) содержание макро- и микроэлементов, отражает специфику ландшафтно-геохимических особенностей территории произрастания. Уменьшение зольности лишайников от центра узла к фоновой точке, вероятно, обусловлено литохимическими особенностями осадочных пород,

слагающих верхнюю часть разреза ТУ, и аэрогенным переносом веществ из нее в составе пылевых частиц на поверхность талломоов.

Элементный анализ показывает (рис. 3), что лишайники, отобранные в центре ТУ, в отличие от лишайников фоновых территорий обогащены такими литогенными элементами, как Si, Ca, Na, Fe, Al, Mg, Mn. В образцах лишайников, взятых в фоновой точке, количественное содержание ряда литогенных макроэлементов значительно снижено. Так, в лишайниках Вельско-Устьянского ТУ содержание Si в 4,5; Al, Ca, Fe более чем в 3; Mg и Na в 2 раза ниже в контрольной точке в сравнении с центром ТУ. В лишайниках Холмогорского ТУ содержание Si, Ca, Mg в 2; Fe, Al, Na и Mn в 1,4...1,2 раза ниже в фоновой точке, чем в центре узла. Ti, Cr, Sr, Ni, Co, Rb, Ba присутствуют в количестве меньше 1 %.

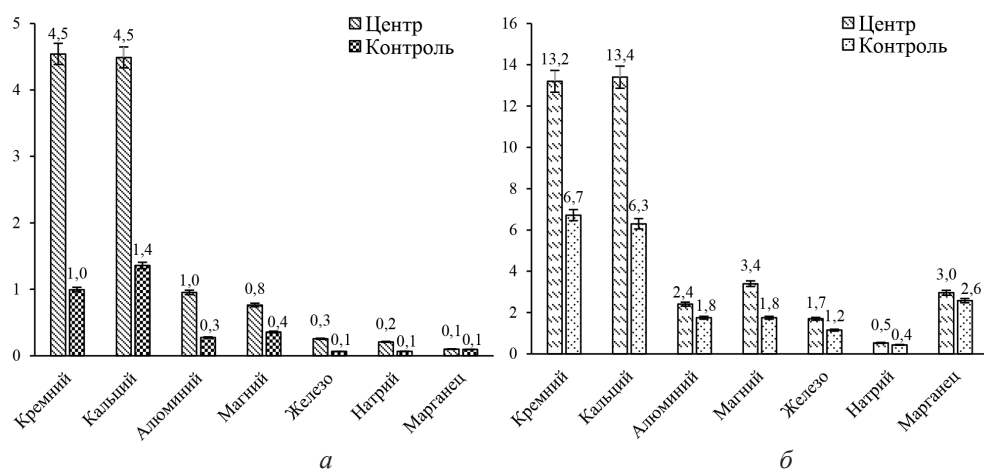


Рис. 3. Содержание литогенных макроэлементов в лишайниках *Cladonia* на территории Вельско-Устьянского (а) и Холмогорского (б) ТУ, %

Fig. 3. The content of lithogenic macroelements in *Cladonia* lichens of the Velsko-Ustyansky (a) and Kholmogorsky (b) TKs, %

Геохимические аномалии отрицательно влияют на баланс в почвах, подземных и грунтовых водах фтора, иода, фосфора, кальция, железа, алюминия, ртути, мышьяка, стронция, естественных радионуклидов. На территории ТУ лишайники подвергаются многофакторным воздействиям, что изменяет естественную динамику накопления ФС и способствует перестройке метаболизма лишайников, произрастающих в центре ТУ. Установлено, что содержание водонерастворимой фракции ФС в лишайниках, отобранных на ПП Холмогорского и Вельско-Устьянского ТУ, увеличивается от контрольной точки к центру в 1,8...1,9 раза, при этом относительная доля водорастворимой фракции ФС в составе общих ФС (%) снижается практически в 2 раза (рис. 4).

Вероятно, выявленная закономерность связана с усилением окислительных и уменьшением восстановительных процессов в талломах лишайников и является показателем их адаптивной перестройки под действием условий произрастания. Постепенная замена легкоокисляемых ФС на более устойчивые структуры ФС создает условия для торможения свободнорадикальных окислительных процессов.

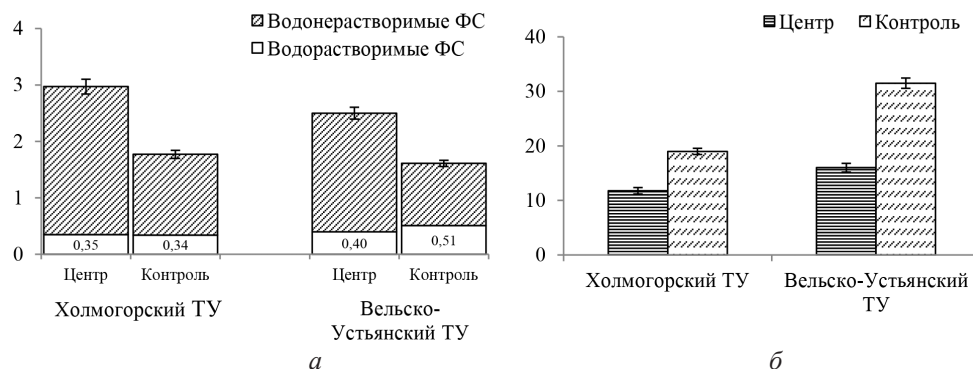


Рис. 4. Содержание общих, водорастворимых и водонерастворимых ФС, мг/г (а), доля водорастворимых ФС, % (б) в лишайниках на территориях ТУ

Fig. 4. The content of total, water-soluble and water-insoluble PCs, mg/g (a) and the fraction of water-soluble PCs, % (b) in lichens of the TKs

Биосинтез ФС на изученных территориях наиболее активен в весенне-летний период (рис. 5, а), в то время как в других регионах (на примере *Cladonia mitis*, *C. stellaris*, *Flavocetraria nivalis*) – весной и осенью, т. к. в эти периоды вегетации складываются наиболее благоприятные условия водообеспеченности лишайников [20, 40]. Расхождения в выводах разных исследователей об особенностях сезонной динамики содержания ФС в лишайниках можно объяснить тем, что на территории изученных нами ТУ складываются специфические климатические условия: снежный покров в центре ТУ удерживается дольше, чем в фоновой точке [15], в летний период увеличивается продолжительность светового дня (белые ночи).

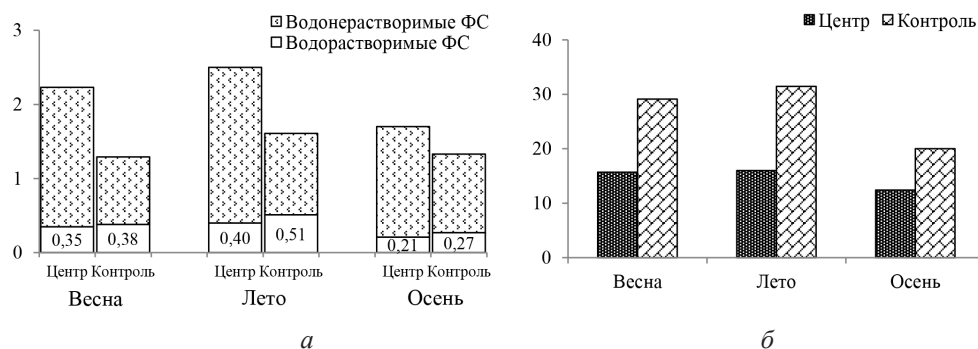


Рис. 5. Содержание общих, водорастворимых и водонерастворимых ФС, мг/г (а), и доля водорастворимых ФС, % (б), в лишайниках (отбор образцов: весна – апрель, лето – июль, осень – сентябрь 2019 г.) на территории Вельско-Устьянского ТУ

Fig. 5. The content of total, water-soluble and water-insoluble PCs, mg/g (a) and the fraction of water-soluble PCs, % (b) in *Cladonia* lichens (sampling of 2019: April, July, September) of the Velsko-Ustyansky TK

Экологические условия в зоне ТУ также оказывают влияние на биосинтез ФС в лишайниках. Доля водорастворимой фракции ФС в составе общих ФС в центре узла снижается практически в 2 раза (весенне-летний период) в сравнении с долей в лишайниках, произрастающих за пределами ТУ (рис. 5, б).

Это является достоверным показателем изменения физиологического состояния лишайников в центре ТУ. Содержание водонерастворимой фракции ФС в лишайниках, отобранных на пробных площадях Холмогорского и Вельско-Устьянского ТУ, увеличивается от контрольной точки к центру в весенне-летний период вегетации в 1,9...2,1 раза, в осенний – в 1,4 раза.

Подтверждением активного участия ФС в обмене веществ в лишайниках служит и тот факт, что наибольшее количество ФС обнаружено в верхней растущей части слоевища, а наименьшее – в нижних (старая зона) частях таллома (рис. 6). При этом следует отметить, что количественное распределение водонерастворимой фракции ФС по зонам таллома носит градиентный характер. В верхних растущих частях слоевища содержание водонерастворимой фракции ФС выше, чем в нижних: в центре узла – в 2, в фоновой точке – в 1,7 раза. Относительное содержание водорастворимой фракции ФС в составе общих ФС изменяется незначительно – в пределах 11,3...12,6 %.

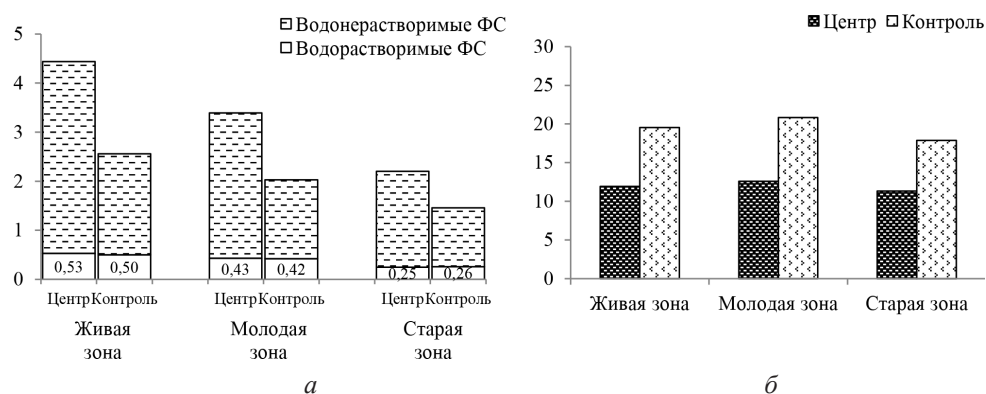


Рис. 6. Содержание общих, водорастворимых и водонерастворимых ФС, мг/г (а), доля водорастворимых ФС, % (б), в различных зонах таллома лишайников Холмогорского ТУ
Fig. 6. The content of total, water-soluble and water-insoluble PCs, mg/g (a) and the fraction of water-soluble PCs, % (b) in various thallus parts of lichens of the Kholmogorsky TK

Такая существенная разница между распределением водорастворимой и водонерастворимой фракций ФС может быть обусловлена тем, что водозэкстрагируемые ФС в большей степени вовлечены в метаболизм, в то время как водонерастворимые ФС реже используются растительным организмом и имеют тенденцию к накоплению. Биосинтез ФС в лишайниках зависит от сезонных изменений условий окружающей среды. Содержание данных соединений коррелирует с особенностями морфоструктурной организации лишайников: наибольшее количество ФС обнаружено в молодой растущей части слоевища. При этом наблюдаются качественно сходные ответные реакции биосинтеза ФС в лишайниках как на воздействие геоэкологических факторов в зонах тектонических узлов, так и возникающие в ходе онтогенеза. Таким образом, ФС являются активными метаболитами, а не конечными продуктами обмена веществ.

Воздействие физико-химических факторов внешней среды влияет на усиление биосинтеза УК и атранорина в лишайниках *Cladonia* в условиях ТУ. Известно, что УК и атранорин вызывают стимуляцию фотосинтеза лишайниковой водоросли *Trebouxia* (фотобионт лишайника *Cladonia*) и являются активными хелаторами. Эти вещества могут облегчать доставку углеводов и азотистых со-

единений из водорослевой клетки, увеличивая проницаемость ее оболочки [6]. В связи с этим представляют интерес исследования изменения содержания УК и атранорина (в составе водонерастворимой фракции ФС) под действием геоэкологических факторов в условиях тектоники (рис. 7).

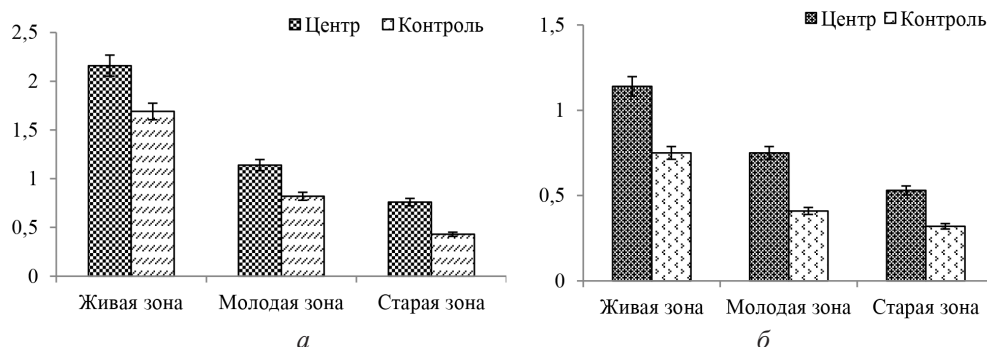


Рис. 7. Содержание вторичных метаболитов: УК (а) и атранорина (б) – в различных зонах таллома лишайника, % а.с.н.

Fig. 7. The content of secondary metabolites in various thallus parts of lichens, % of a.d.w.: UA (a) and atranorin (б)

Как видно из рис. 7, у лишайников рода *Cladonia* распределение УК и атранорина между растущими (верхними) и нижними частями таллома носит градиентный характер. Амплитуда колебаний составляет от 10 до 30 % для УК и от 6 до 23 % для атранорина. Достоверное снижение содержания УК по направлению к нижней части у лишайников рода *Cladonia* отмечалось ранее в работах [17, 21]. Схожие результаты, демонстрирующие изменение содержания УК (в составе водонерастворимой фракции ФС) под действием геоэкологических факторов в условиях тектоники, были получены в ходе исследований [18, 30].

Заключение

Влияние геоэкологических факторов в зонах тектонических узлов вызывает изменение в распределении водорастворимой и водонерастворимой фракций фенольных соединений. Содержание водонерастворимой фракции фенольных соединений в лишайниках, отобранных на пробных площадях Вельско-Устьянского и Холмогорского тектонических узлов, увеличивается от периферии к центру узла. При этом относительная доля водорастворимой фракции фенольных соединений в составе общих фенольных соединений снижается, что, вероятно, связано с усилением окислительных и уменьшением восстановительных процессов в талломах лишайников. Постепенная замена легкоокисляемых фенольных соединений на их более устойчивые структуры создает условия для торможения свободнорадикальных окислительных процессов.

Отмечается улучшение биосинтеза усниновой кислоты и атранорина в составе водонерастворимой фракции фенольных соединений в условиях стрессовой нагрузки. Это является защитной реакцией лишайников, позволяющей им выжить и приспособиться к изменяющимся условиям, подтверждает активное участие фенольных соединений в обмене веществ в лишайниках.

Установлено, что интенсивность метаболических процессов и накопление биологически активных веществ фенольной природы в лишайниках зависят от геохимических особенностей региона произрастания, сезонных и климатических циклов развития растений. Содержание фенольных соединений в талломах коррелирует с особенностями их морфоструктурной организации: наибольшее количество данных соединений обнаружено в молодой растущей части слоевища лишайников. Таким образом, фенольные соединения являются активными метаболитами, а не конечными продуктами обмена веществ.

Результаты исследований доказывают, что лишайники в Холмогорском тектоническом узле имеют сходные с лишайниками Вельско-Устьянского тектонического узла ответные реакции на воздействие тектоники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абдрахимова *Й.Р.*, Валиева *А.И.* Вторичные метаболиты растений: физиологические и биохимические аспекты. Ч. 3. Фенольные соединения. Казань: Казан. ун-т, 2012. 40 с.

Abdrakhimova Y.R., Valiyeva A.I. *Secondary Plant Metabolites: Physiological and Biochemical Aspects*. Part 3. Phenolic Compounds. Kazan, Kazan University Publ., 2012. 40 p. (In Russ.).

2. Беляев *В.В.*, Неверов *Н.А.*, Старицын *В.В.*, Бойцова *Т.А.* Свойства некоторых компонентов фитоценозов, произрастающих на территориях тектонических узлов (Архангельская область) // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 4. С. 197–204.

Belyaev V.V., Neverov N.A., Staritsyn V.V., Boytsova T.A. Properties of Some Components of Phytocenoses Growing on the Territory of Tectonic Knots (Arkhangelsk Region). *The Bulletin of KrasGAU*, 2018, no. 4, pp. 197–204. (In Russ.).

3. Боярских *И.Г.*, Куликова *А.И.* Изменчивость цитогенетических характеристик в популяции *Lonicera caerulea* (жимолости синей) в зоне активных разломов // Экол. генетика. 2017. Т. 15, № 2. С. 62–70.

Boyarskikh I.G., Kulikova A.I. Variability of Cytogenetic Disturbances in *Lonicera caerulea* (Blue Honeysuckle) Population in an Active Fault Zone. *Ecological Genetics*, 2017, vol. 15, no. 2, pp. 62–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/ecogen15262-70>

4. Бровко *О.С.*, Паламарчук *И.А.*, Слобода *А.А.*, Бойцова *Т.А.*, Гагушкина *А.А.*, Вальчук *Н.А.* Влияние стрессовых воздействий на компонентный состав лишайников рода *Cladonia* Евроарктического региона // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 20–24.

Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Sloboda A.A., Boytsova T.A., Gagushkina A.A., Valchuk N.A. The Influence of Stress Factors on the Chemical Composition of Lichens Genus *Cladonia* of Euro-Arctic Region. *Advances in Current Natural Sciences*, 2016, no. 8, pp. 20–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.36072>

5. Вайнштейн *Е.А.* Лишайниковый симбиоз и физиолого-биохимическая регуляция взаимоотношений грибного и водорослевого компонентов: дис. ... д-ра биол. наук. Л., 1987. 234 с.

Weinstein E.A. *Lichen Symbiosis and Physiological and Biochemical Regulation of the Relationship between Fungal and Algal Components*: Dr. Biol. Sci. Diss. Leningrad, 1987. 234 p. (In Russ.).

6. Вайнштейн *Е.А.*, Тахтаджян *Е.А.* Физиологические изменения у лишайниковой водоросли *Trebuxia* при культивировании // Физиология растений. 1981. Т. 28, № 5. С. 1037–1044.

Weinstein E.A., Takhtadzhyan E.A. Physiological Changes in the Lichen Alga *Trebouxia* during Cultivation. *Fiziologiya rastenij* = Soviet Plant Physiology, 1981, vol. 28, no. 5, pp. 1037–1044. (In Russ.).

7. Воскресенская О.Л., Алябышева Е.А., Половникова М.Г. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1. Йошкар-Ола: МарГУ, 2006. 107 с.

Voskresenskaya O.L., Alyabysheva E.A., Polovnikova M.G. *Great Workshop on Bioecology*. Part 1. Yoshkar-Ola, MarSU Publ., 2006. 107 p. (In Russ.).

8. Загоскина Н.В., Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Заварзин А.А., Заварзина А.Г. Водорастворимые фенольные соединения у лишайников // Микробиология. 2013. Т. 82, № 4. С. 434–441.

Zagoskina N.V., Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Zavarzin A.A., Zavarzina A.G. Water-Soluble Phenolic Compounds in Lichens. *Mikrobiologiya* = Microbiology, 2013, vol. 82, no. 4, pp. 434–441. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0026365613030166>

9. Загоскина Н.В., Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Заварзина А.Г., Заварзин А.А. О содержании фенольных соединений в различных видах лишайников Кольского полуострова // Химия растит. сырья. 2011. № 4. С. 245–249.

Zagoskina N.V., Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Zavarzina A.G., Zavarzin A.A. On the Content of Phenolic Compounds in Various Lichen Species of the Kola Peninsula. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2011, no. 4, pp. 245–249. (In Russ.).

10. Каплин В.Г. Биоиндикация состояния экосистем. Самара: Самар. ГСХА, 2001. 143 с.

Kaplin V.G. *Bioindication of the Ecosystems State*. Samara, Samarskaya GSKhA Publ., 2001. 143 p. (In Russ.).

11. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геологогеофизических материалах. Архангельск: Правда Севера, 2004. 233 с.

Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. *Hierarchical Series of Manifestations of Alkaline-Ultrabasic Magmatism of the Arkhangelsk Diamond-Bearing Province. Their Representation in Geological and Geophysical Data*. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2004. 233 p. (In Russ.).

12. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Булаков П.С. Влияние тектонических нарушений (дегазация, наведенные токи, вариации) севера Русской плиты на окружающую среду (на примере Архангельской области) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Т. 2, № 14. С. 77–89.

Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Belyaev V.V., Burlakov P.S. The Northern Part of the Russian Plate: Effects of the Tectonic Structures on the Environment (Case Study for Arkhangelsk Region). *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr"*. *Seriya: Nauki o Zemle* = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences, 2009, vol. 2, no. 14, pp. 77–89. (In Russ.).

13. Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы / отв. ред. Ф.Н. Юдахин. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 407 с.

Lithosphere and Hydrosphere of the European North of Russia. Geoecological Problems. Ed. by F.N. Yudahin. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2001. 407 p. (In Russ.).

14. Лыскова Н.С., Базарнова Ю.Г., Кручина-Богданов И.В. Изучение состава и свойств вторичных метаболитов лишайника *Usnea barbata* // Химия растит. сырья. 2018. № 1. С. 121–127.

Lyskova N.S., Bazarnova Iu.G., Kruchina-Bogdanov I.V. Study of the Composition and Properties of Secondary Metabolites of Lichen *Usnea barbata*. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2018, no. 1, pp. 121–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018011966>

15. Малов А.И., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Гофаров М.Ю., Полякова Е.В., Старицын В.В., Дурьнин С.Н., Минеев А.Л., Антоновская Г.Н.,

Капустян Н.К., Ваганова Н.В., Морозов А.Н., Конечная Я.В. Фундаментальные основы экологически безопасных технологий освоения природных ресурсов Западно-Арктического сектора Российской Федерации. Ч. 2 // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2014. № 1(9). Режим доступа: http://oilgasjournal.ru/vol_9/malov2.html (дата обращения: 20.04.20).

Malov A.I., Kutinov Y.G., Chistova Z.B., Beljaev V.V., Gofarov M.Y., Polyakova E.V., Staritsyn V.V., Durnin S.N., Mineev A.L., Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Vaganova N.V., Morozov A.N., Konechnaya Ya.V. Fundamentals of Environmentally-Sound Mastering Technologies for Natural Resources of the Western Arctic Sector of the Russian Federation. Part 2. *Georesources, Geoenergetics, Geopolitics*, 2014, no. 1(9). (In Russ.).

16. Мейчик Н.Р., Любимова Е.Г. Ионообменные свойства клеточной стенки кустистого лишайника *Cladonia rangiferina* // Физиология растений. 2010. Т. 57, № 2. С. 273–279.

Meychik N.R., Lyubimova E.G. Ion-Exchange Properties of the Cell Wall of the Reindeer Lichen *Cladonia rangiferina*. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2010, vol. 57, no. 2, pp. 273–279. (In Russ.).

17. Моисеева Е.Н. К вопросу о локализации ферментов и лишайниковых кислот в слоевище лишайников // Ботан. журн. 1959. Т. 44, № 8. С. 1128–1134.

Moiseeva E.N. On the Localization of Enzymes and Lichen Acids in Thallus of Lichens. *Botanicheskii Zhurnal*, 1959, vol. 44, no. 8, pp. 1128–1134. (In Russ.).

18. Паламарчук И.А., Бровко О.С., Беляев В.В., Боголицын К.Г., Бойцова Т.А., Жильцов Д.В., Слобода А.А., Вальчук Н.А. Влияние геоэкологических факторов среды на биохимические показатели лишайников на территории Вельско-Устьянского тектонического узла (Архангельская область) // Химия растит. сырья. 2018. № 4. С. 215–224.

Palamarchuk I.A., Brovko O.S., Belyaev V.V., Bogolitsyn K.G., Boitsova T.A., Zhiltsov D.V., Sloboda A.A., Valchuk N.A. Influence of the Environmental Geoeological Factors on the Biochemical Indicators of Lichens in the Territory of the Velsk-Ustyansk Tectonic Node (Arkhangelsk Region). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2018, no. 4, pp. 215–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018043803>

19. Прусакова Л.Д., Кефели В.И., Белопухов С.Л., Вакуленко В.В., Кузнецова С.А. Роль фенольных соединений в растениях // Агрохимия. 2008. № 7. С. 86–96.

Prusakova L.D., Kefeli V.I., Belopukhov S.L., Vakulenko V.V., Kuznetsova S.A. Role of Phenolic Compounds in Plants. *Agrokhimia* = Eurasian Soil Science, 2008, no. 7, pp. 86–96. (In Russ.).

20. Равинская А.П., Вайнштейн Е.А. Влияние некоторых экологических факторов на содержание лишайниковых веществ // Экология. 1975. № 3. С. 82–85.

Ravinskaya A.P., Weinstein E.A. Influence of Some Environmental Factors on the Content of Lichen Substances. *Ekologia* = Russian Journal of Ecology, 1975, no. 3, pp. 82–85. (In Russ.).

21. Равинская А.П., Вайнштейн Е.А. Хемотаксономическое значение изменений содержания лишайниковых кислот // Новости систематики низших растений. 1975. Т. 12. С. 266–273.

Ravinskaja A.P., Vainshtein E.A. Chemotaxonomic Significance of Changes in the Content of Lichen Acids. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 1975, vol. 12, pp. 266–273. (In Russ.).

22. Соколов Д.Н., Лузина О.А., Салахутдинов Н.Ф. Усниковая кислота: получение, строение, свойства и химические превращения // Успехи химии. 2012. Т. 81, № 8. С. 747–768.

Sokolov D.N., Luzina O.A., Salahutdinov N.F. Usnic Acid: Preparation, Structure, Properties and Chemical Transformations. *Uspekhi Khimii* = Russian Chemical Reviews, 2012, vol. 81, no. 8, pp. 747–768. (In Russ.).

23. Толпышева Т.Ю., Шишконокова Е.А. Лишайники природного парка «Нумто». Краткий определитель. Екатеринбург: Ассорти, 2018. 187 с.
Tolpysheva T.Yu., Shishkonakova E.A. *Lichens of the Natural Park "Numto". A Short Determinant*. Yekaterinburg, Assorti Publ., 2018. 187 p. (In Russ.).
24. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Кутенков С.А., Виноградова А.А., Гордеев В.В., Демина Л.Л., Иванова Ю.А., Филиппов А.С. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 3. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4692> (дата обращения: 19.04.20).
Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Kutenkov S.A., Vinogradova A.A., Gordeev V.V., Demina L.L., Ivanova Yu.A., Filippov A.S. Contents of Heavy Metals in Fruticose Epiphytic Lichens of Karelia as Indicator of Atmospheric Transport of Pollutants. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya* = Modern problems of science and education, 2011, no. 3. (In Russ.).
25. Щербаклова А.И. Лишайники с высокой антиоксидантной активностью // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2018. № 4(40). С. 75–84.
Shcherbakova A.I. Lichens with High Antioxidant Activity. *Vestnik of Volga State University of Technology Series "Forest: Ecology. Nature Management"*, 2018, no. 4(40), pp. 75–84. (In Russ.).
26. Ahmadjian V. Studies on the Isolation and Synthesis of Bionts of the Cyanolichen *Peltigera canina* (Peltigeraceae). *Plant Systematics and Evolution*, 1989, vol. 165, pp. 29–38. <https://doi.org/10.1007/BF00936032>
27. Ahmadjian V., Paracer P. *Symbiosis: An Introduction in Biological Association*. LA, Clark University Press, 1986. 212 p.
28. Ahti T., Stenroos S., Moberg R. *Nordic Lichen Flora*. Vol. 5. Cladoniaceae. Uppsala, Museum of Evolution, 2013. 117 p.
29. Aoussar N., Rhallabi N., Mhand R.A, Manzali R., Bouksaim M., Douira A., Mellouki F. Seasonal Variation of Antioxidant Activity and Phenolic Content of *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* and *Ramalina farinacea* from Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2020, vol. 19, iss. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jsas.2018.03.004>
30. Belyaev V., Bogolitsyn K., Brovko O., Kutinov Yu., Neverov N., Palamarchuk I., Boytsova T., Chukhchin D., Zhiltsov D., Gorshkova N. Influence of Tectonic Faults on the Conditions and Properties of Some Components of a Biogeocenosis in a Subarctic Area. *European Journal of Environmental Sciences*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 5–11. <https://doi.org/10.14712/23361964.2019.1>
31. Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A. Supercritical Fluid Extraction of Usnic Acid from Lichen of *Cladonia* Genus. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2017, vol. 11, iss. 8, pp. 1306–1311. <https://doi.org/10.1134/S1990793117080024>
32. Kosanić M., Ranković B., Stanojković T., Rančić A., Manojlović N. *Cladonia* Lichens and Their Major Metabolites as Possible Natural Antioxidant, Antimicrobial and Anticancer Agents. *LWT – Food Science and Technology*, 2014, vol. 59, iss. 1, pp. 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.047>
33. Manojlovic N.T., Solujic S., Sukdolak S. Antimicrobial Activity of an Extract and Antraquinones from *Caloplaca shaeveri*. *The Lichenologist*, 2002, vol. 34, iss. 1, pp. 83–85. <https://doi.org/10.1006/lich.2001.0365>
34. Molnár K., Farkas E. Current Results on Biological Activities of Lichen Secondary Metabolites: A Review. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 2010, vol. 65, iss. 3-4, pp. 157–173. <https://doi.org/10.1515/znc-2010-3-401>

35. Purvis O.W., Williamson B.J., Spiro B., Udachin V., Mikhailova I.N., Dolgopolova A. Lichen Monitoring as a Potential Tool in Environmental Forensics: Case Study of the Cu Smelter and Former Mining Town of Karabash, Russia. *Geological Society, London, Special Publication*, 2013, vol. 384, no. 1, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1144/SP384.6>
36. Rola K., Latkowska E., Myśliwa-Kurdziel B., Osyczka P. Heavy-Metal Tolerance of Photobiont in Pioneer Lichens Inhabiting Heavily Polluted Sites. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 679, pp. 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.002>
37. Rola K., Osyczka P. Temporal Changes in Accumulation of Trace Metals in Vegetative and Generative Parts of *Xanthoria parietina* Lichen Thalli and Their Implications for Biomonitoring Studies. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 96, part 1, pp. 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.004>
38. Smeds A.I., Kytöviita M.-M. Determination of Usnic and Perlatolic Acids and Identification of Olivetoric Acids in Northern Reindeer Lichen (*Cladonia stellaris*) Extracts. *The Lichenologist*, 2010, vol. 42 (6), pp. 739–749. <https://doi.org/10.1017/S002428291000037X>
39. Swain T., Hillis W.E. The Phenolic Constituents of *Prunus domestica* L. – The Quantitative Analysis of Phenolic Constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1959, vol. 10, iss. 1, pp. 63–68. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740100110>
40. Taguchi H., Sankawa U., Shibata S. Biosynthesis of Natural Products. VII. Biosynthesis of Usnic Acid in Lichens. Seasonal Variation Observed in Usnic Acid Biosynthesis. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 1969, vol. 17, iss. 10, pp. 2061–2064. <https://doi.org/10.1248/cpb.17.2061>

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