

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

2/374

2020

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
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)
Моисеев Н.А., д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Морозов В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
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)
Тельшева Г.М., д-р хим. наук, проф. (Латвия, Рига)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимов 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)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельмани Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

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

2/374

2020

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова, Н.П. Братилова, Ю.Е. Щерба, В.В. Комарницкий.* Показатели роста кедра сибирского разного географического происхождения на подвое сосны обыкновенной..... 9
- М.В. Сурсо, Д.Г. Чухчин.* Рост и развитие пыльцевой трубки можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis*): роль ядра клетки трубки..... 20
- Н.В. Геникова, В.А. Харитонов, А.М. Крышень.* Влияние длительного периодического внесения удобрений на структуру древостоя и напочвенного покрова в условиях среднетаежных сосняков брусничных (Республика Карелия)..... 35
- Н.Ж. Бакиров, А.Х. Хамзаев, З.Б. Новицкий.* Лесные насаждения на осушенном дне Аральского моря..... 51
- Г.А. Одноралов, Е.Н. Тихонова, И.В. Голядкина, Т.А. Малинина.* Оценка биологической продуктивности лесной среды в условиях урбанизации (на примере Воронежской нагорной дубравы)..... 60
- О.Н. Тюкавина.* Плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых..... 73

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- А.В. Абузов, П.Б. Рябухин.* Методика определения размеров внешнего контура лесосек при их разработке аэростатно-канатными системами..... 81
- С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая, О.И. Григорьева.* Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы..... 101

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- М.А. Blokhin, D.A. Podlesny, O.A. Rodionov.* Solving the Problem of Reducing the Influence of Lateral Force on the Saw Blade Stability..... 118
- И.К. Говядин, А.Н. Чубинский.* Исследование свойств древесно-полимерного композита на основе PLA..... 129

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Л.А. Мингазова, А.В. Канарский, Е.В. Крякунова, З.А. Канарская.* Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae* F-1030 на питательных средах из сульфитных щелоков..... 146

- Д.А. Прохоров, А.С. Смолин.* Оценка эффективности сушильной части машин для
выработки санитарно-гигиенических видов бумаги..... 159

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- М. Tungalag, S. Gerelbaatar, A.I. Lobanov.* Organic Carbon Stocks in the Forest Soils of
Northern Mongolia..... 169



CONTENTS

FORESTRY

<i>R.N. Matveeva, O.F. Butorova, N.P. Bratilova, I.E. Shcherba, V.V. Komarnitsky.</i> Growth Indices of Siberian Pine of Different Geographical Origin Grafted on a Scots Pine Rootstock.....	9
<i>M.V. Surso, D.G. Chukhchin.</i> Growth and Development of Pollen Tubes in Common Juniper (<i>Juniperus communis</i>): The Role of the Tube Cell Nucleus.....	20
<i>N. V. Genikova, V.A. Kharitonov, A. M. Kryshen'.</i> The Effect of Long-Term Periodic Fertilization on the Structure of the Stand and the Ground Cover in the Cowberry Pine Forests of Middle Taiga (Republic of Karelia).....	35
<i>N.J. Bakirov, A.Kh. Khamzaev, Z.B. Novitskiy.</i> Forest Plantations on the Drained Bottom of the Aral Sea.....	51
<i>G.A. Odnoralov, E.N. Tikhonova, I.V. Golyadkina, T.A. Malinina.</i> Assessment of Urban Forest Biological Productivity (Case Study of the Voronezh Upland Oak Forest).....	60
<i>O.N. Tyukavina.</i> The Density of Pine Wood in Drained Shrub-Sphagnum Pine Forests.....	73

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>A.V. Abuzov, P.B. Ryabukhin.</i> Methodology for Sizing the External Borders of Cutting Areas when Their Development by Balloon Cable Systems.....	81
<i>S.E. Rudov, V.Ya. Shapiro, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya, O.I. Grigoreva.</i> The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System.....	101

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>M.A. Blokhin, D.A. Podlesny, O.A. Rodionov.</i> Solving the Problem of Reducing the Influence of Lateral Force on the Saw Blade Stability.....	118
<i>I.K. Govyadin, A.N. Chubinsky.</i> The Study of PLA-Based Wood-Polymer Composite Properties.....	129

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

<i>L.A. Mingazova, A.V. Kanarsky, E.V. Kryakunova, Z.A. Kanarskaya.</i> Lactic Acid Synthesis by Fungus <i>Rhizopus oryzae</i> F-1030 on Growth Media Based on Sulphite Liquors.....	146
--	-----

- D.A. Prokhorov, A.S. Smolin.* Performance Assessment of the Drying Section of Machines for the Production of Tissue Paper Grades..... 159

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- M. Tungalag, S. Gerelbaatar, A.I. Lobanov.* Organic Carbon Stocks in the Forest Soils of Northern Mongolia..... 169



УДК 630*232.311.3:631.53

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-9-19

ПОКАЗАТЕЛИ РОСТА КЕДРА СИБИРСКОГО РАЗНОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ПОДВОЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

Р.Н. Матвеева, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-9622>

О.Ф. Буторова, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8575-7464>

Н.П. Братилова, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAF-3074-2019](https://orcid.org/0000-0002-2918-9690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2918-9690>

Ю.Е. Щерба, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8437-4274>

В.В. Комарницкий, аспирант

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e-mail: matveevrn@yandex.ru, butorova.olga@mail.ru, nbratilova@yandex.ru, shcherba_@mail.ru, komarnitskiy.vitaliy@mail.ru

Леса с преобладанием кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) занимают в России около 40 млн га. Они выполняют почвозащитную и водоохранную роль, являются источником кислорода, используются для получения ценных орехов, древесины и др. Объектом исследования выступили 36-летние привитые деревья кедра сибирского, произрастающие на гибридно-семенной плантации, расположенной в пригородной зоне Красноярска. Цель работы – сопоставление показателей роста 36-летних рамет кедра сибирского разного географического происхождения. Прививки были сделаны на подрост сосны обыкновенной в 1982 г. Черенки для прививок нарезаны с растений, выращенных из семян, заготовленных в 1960 г. в популяциях разного географического происхождения. Местоположение исходных популяций по широте отличается на 12°, долготе – на 64°, высоте над уровнем моря – на 900 м. Установлено, что средняя высота 36-летних привитых деревьев в зависимости от географического происхождения привоя варьирует от 12,4 до 15,0 м, диаметр ствола подвоя – от 29,7 до 40,9 см, диаметр кроны – от 6,4 до 7,6 м. Лучшим ростом отличаются клоны томского происхождения. Наименьшей высотой характеризуются клоны северных популяций (республик Коми и Саха). Средний диаметр привоя превышает диаметр подвоя на 6,4...39,7 %. Хорошее срастание прививок (диаметр привоя равен диаметру подвоя) наблюдается у 10...27 % деревьев алтайского, свердловского, тюменского, ханты-мансийского и читинского происхождений. Выявлено наличие связи между показателями привитых деревьев: тесная – между диаметром ствола подвоя и кроны ($r = 0,855$), диаметром ствола и объемом кроны (0,827); значительная – между диаметром ствола и протяженностью кроны (0,520). Установлено, что на интенсивность роста привитых деревьев и срастание прививаемых компонентов оказывают влияние географическое происхождение и клоновая принадлежность привоя. Полученные результаты могут быть использованы при создании клоновых плантаций второго поколения.

Для цитирования: Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Братилова Н.П., Щерба Ю.Е., Комарницкий В.В. Показатели роста кедра сибирского разного географического происхождения на подвое сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 9–19. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-9-19

Ключевые слова: кедр сибирский, плантация, географическое происхождение, популяция, прививка, подвой, привой, клон, рамета, изменчивость.

Введение

Леса с преобладанием кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) занимают в России около 40 млн га, произрастая на северо-востоке европейской части России, в Западной и Восточной Сибири, Забайкалье. Экологический оптимум кедра находится в низкогорье и нижней части среднегорья Северо-Восточного Алтая, где обнаружены деревья в возрасте 850 лет высотой до 45 м и диаметром ствола до 2,4 м. Кедровые леса выполняют почвозащитную и водоохранную роль, являются источником кислорода, насыщенного ионами и фитонцидами, и используются для получения ценных орехов, древесины и др. [3, 5, 19].

Прививкой кедровых сосен начали заниматься еще с конца XIX в. в Прибалтике и на Украине [13, 19 и др.]. В России подобные работы проводили А.В. Хохрин [20], Е.П. Проказин [16], Е.В. Титов [18], Н.Ф. Колегова [4], Р.Н. Матвеева и др. [9–12 и др.], Г.В. Кузнецова [6, 7], И.И. Дроздов, Ю.И. Дроздов [2] и др. За рубежом выполняются исследования по размножению прививкой псевдотсуги Мензиса, сосны Эллиота, сосны замечательной и других хвойных [26–28, 30, 31 и др.]. Согласно литературным данным, полностью наследуется генотип маточных деревьев, изменчивость проявляется по фенотипу в зависимости от условий произрастания, подвоя и других факторов. Отмечается, что применение прививки расширяет границы разведения ценных видов, в частности кедра сибирского, сокращает период до семеношения и сохраняет в потомстве селекционно-важные признаки [2, 5 и др.]. Кедр сибирский размножают при использовании гетеропластических прививок (подвой – сосна обыкновенная) и гомопластических (подвой – кедр сибирский). Установлено, что при прививке на сосну обыкновенную происходит более интенсивный рост привоя, но через 30–40 лет образуются наплывы в местах срастания прививаемых компонентов, что приводит к их гибели. Однако интенсивность роста привоя и успешное срастание привоя с подвоем происходят не одинаково. Проблема выделения маточных растений для успешного размножения ценных экземпляров остается нерешенной.

Отбор растений с последующим размножением прививкой проводится в географических культурах, на плантациях целевого назначения и других объектах постоянной лесосеменной базы [6, 11, 21, 22, 24, 25, 34 и др.]. Изучение изменчивости хвойных видов в географических культурах подтвердило, что происхождение семян оказывает значительное влияние на сохранность, рост, фенологию и репродуктивные показатели древесных растений [1, 17, 29, 33 и др.].

Географическая изменчивость показателей в 14-летних культурах разного происхождения отмечена в работе I. Blada, F. Popescu [23], которые установили достоверное взаимодействие между генотипом и условиями произрастания. N. Sofletea, M. Budeanu, G. Parnuta [32] на основании исследований 30-летних культур ели обыкновенной считают, что географическое происхождение семян сказывается в большей степени, чем лесорастительные условия. По данным W. You и др. [35], прирост культур сосны Банкса по высоте и диаметру ствола отрицательно коррелирует с географической широтой места произрастания.

Отмечено, что с кедра сибирского, привитого на сосну обыкновенную, даже несмотря на плохое срастание прививаемых компонентов, можно в течение 3-4 десятков лет собирать семена и в массовом количестве нарезать черенки для выращивания ценного потомства [8, 13 и др.].

Проблема заключается в том, что неизвестно, с каких маточных деревьев кедра сибирского необходимо заготавливать черенки, характеризующиеся интенсивным и более продолжительным периодом роста, для создания клоновых плантаций в пригородной зоне Красноярска, что зависит от качества срастания прививаемых компонентов.

Цель исследования – сопоставление показателей роста 36-летних рамет кедра сибирского, отличающихся географической и клоновой принадлежностью привоя, с использованием в качестве подвоя подроста сосны обыкновенной. Это позволит сократить расходы на выращивание подвоя, обследование и заготовку черенков в отдаленных популяциях, проведение многолетних наблюдений за ростом клонового потомства в конкретных условиях и отбором. Работа направлена на сохранение генетического потенциала кедра сибирского, сформировавшегося в разных лесорастительных условиях произрастания, путем создания плантаций вегетативного происхождения для ускоренной заготовки черенков.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования явились привитые деревья кедра сибирского с использованием привоя разного географического происхождения, произрастающие на гибридно-семенной плантации (ГСП), расположенной на территории Караульного лесничества учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного университета науки и технологий (с.ш. – 56°01'; в.д. – 92°52'; высота над уровнем моря – 300 м).

Черенки для прививок были нарезаны с 22-летних экземпляров кедра сибирского, выращенных в дендрарии СибГУ из семян, заготовленных в популяциях Кемеровской, Свердловской, Томской, Тюменской областей, Забайкальского края (бывшая Читинская область), республик Алтай, Бурятия, Коми, Тыва [9].

Прививки проведены в 1982 г. на подрост сосны обыкновенной «сердцевинной на камбий» по Е.П. Проказину [16]. Расстояние между привитыми растениями – 4×4 м, густота – 625 шт./га.

В программу исследований входило: измерение биометрических показателей привитых деревьев (высота, диаметры ствола подвоя и привоя, кроны, протяженность живой кроны, длина хвои); определение объема кроны; установление зависимости между показателями привитых деревьев. Объем кроны (V , м³) рассчитывали по формуле А.В. Тюрина:

$$V = \frac{\pi D_{кр}^2 L_{кр}}{8},$$

где $D_{кр}$ – диаметр кроны, м; $L_{кр}$ – протяженность кроны, м.

Уровень изменчивости показателей устанавливали по шкале С.А. Мамаева [8].

Длину хвои определяли на 1-летних побегах нижней живой мутовки с учетом расположения в кроне (север, юг, восток, запад), рассчитывали среднее значение.

Географический дифференциал определяли как разницу между средней величиной показателя в отбираемой группе и общей средней.

Достоверность различий показателей между вариантами устанавливали по t_{ϕ} (фактический критерий), сравнивая его с табличным t_{05} .

На период обследования возраст деревьев составил 36 лет. Для сопоставления данных были взяты раметы, имеющие привои с различным местоположением материнских популяций, по широте отличающихся на 12° , долготы – на 64° , высоте над уровнем моря – на 900 м, с которых в 1960 г. были заготовлены семена и выращено потомство в дендрарии СибГУ с последующей нарезкой черенков. Географические координаты и высота над уровнем моря данных популяций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Места произрастания материнских популяций кедров сибирского

Географическое происхождение	Лесничество	Лесорастительный район*	Координаты		Высота над уровнем моря, м
			с.ш.	в.д.	
Алтайское (Алтай)	Каракоткинское	Алтае-Саянский горно-таежный	$50^{\circ}50'$	$86^{\circ}54'$	1000
Читинское (Забайкальский край)	Красно-Чикойское	Байкальский горный лесной	$50^{\circ}22'$	$108^{\circ}43'$	700
Кемеровское (Кемеровская обл.)	Мариинское	Западно-Сибирский южно-таежный равнинный	$56^{\circ}00'$	$87^{\circ}54'$	500
Коми (коми)	Троицко-Печорское	Западно-Уральский таежный	$62^{\circ}50'$	$56^{\circ}30'$	500
Якутское (Саха (Якутия))	Олекминское	Восточно-Сибирский таежный мерзлотный	$61^{\circ}00'$	$120^{\circ}24'$	500
Свердловское (Свердловская обл.)	Верхотурское	Средне-Уральский таежный	$59^{\circ}00'$	$61^{\circ}00'$	800
Томское (Томская обл.)	Томское	Западно-Сибирский южно-таежный равнинный	$56^{\circ}30'$	$84^{\circ}48'$	100
Тюменское (Тюменская обл.)	Кондинское	Западно-Сибирский средне-таежный равнинный	$59^{\circ}40'$	$68^{\circ}37'$	100
Ханты-мансийское (Ханты-Мансийский авт. округ)	Ханты-Мансийское	Западно-Сибирский средне-таежный равнинный	$60^{\circ}30'$	$71^{\circ}12'$	200

*В соответствии с [15].

Данные были обработаны статистически с использованием программы Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе проведенных исследований установлено, что показатели привитых с использованием привоя разного географического происхождения деревь-

ев в 36-летнем возрасте имели уровень изменчивости от среднего до высокого (табл. 2).

Таблица 2

Изменчивость показателей привитых деревьев кедров сибирского на плантации

Показатель	$X_{\text{ср}}$	$\pm m$	V, %	Уровень варьирования	P, %
Высота, м	13,7	0,52	31,3	Высокий	3,8
Диаметр ствола, см:					
подвоя	36,0	0,93	21,5	Высокий	2,6
привоя	42,8	1,15	22,3	Высокий	2,7
Диаметр кроны, м	6,9	0,12	15,2	Средний	1,7
Протяженность кроны, м	12,2	0,57	38,0	Высокий	4,7
Объем кроны, м ³	231,67	12,35	16,0	Средний	5,3

Примечание: $X_{\text{ср}}$ – среднее значение показателя; m – ошибка среднего арифметического значения; V – коэффициент варьирования; P – показатель точности.

Высокий уровень изменчивости отмечен по всем показателям, кроме диаметра и объема кроны.

Средняя высота привитых деревьев в зависимости от географического происхождения привоя и индивидуальной изменчивости варьировала от 12,4 (коми) до 15,0 м (томское). Высота деревьев в томском варианте превышала данный показатель у потомства северных популяций (якутское и коми) на 21,0 и 14,5 % соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Высота кедров сибирского

Географическое происхождение	Средняя высота		Географический дифференциал, м	Номер отселектированных		Максимальная высота	
	м	% к $X_{\text{ср}}$		клона	раметы	м	% к $X_{\text{ср}}$
Алтайское	13,9	101,4	+0,2	18-2	15-8	16,6	121,2
Кемеровское	13,8	100,7	+0,1	15-3	9-3	16,4	119,7
Коми	12,4	90,5	-1,3	7-47	8-7	13,6	99,3
Свердловское	14,0	102,2	+0,3	21-1	11-3	15,7	114,6
Томское	15,0	109,5	+1,3	11-6	15-5	16,6	121,2
Тюменское	13,8	100,7	+0,1	11-3	1-12	15,8	115,3
Ханты-мансийское	14,0	102,2	+0,3	34-5	1-9	15,0	109,5
Читинское	13,6	99,3	-0,1	9-4	8-8	14,0	102,2
Якутское	13,1	95,6	-0,6	2-2	4-8	14,9	108,8

Географический дифференциал по высоте, являющийся одним из показателей успешности роста потомства при выращивании в новых условиях, изменялся от -1,3 до +1,3.

В каждом варианте отселектированы раметы, имеющие наибольшую высоту от 13,6 до 16,6 м. Из них выделяются раметы в вариантах томского и алтайского происхождений, превосходящие среднее значение на 21,2 %.

Диаметр ствола подвоя в среднем составляет 36,0 см, варьируя от 29,7 (коми) до 40,9 см (читинское), привоя – от 34,7 до 51,9 см. Различие между

диаметром ствола подвоя потомств разного географического происхождения достигает 37,7 %. Превышение диаметра ствола привоя над диаметром подвоя колеблется от 2,1 (ханты-мансийское) до 11,6 см (томское) (табл. 4).

Таблица 4

**Диаметр ствола подвоя и привоя (см) в местах срастания
прививаемых компонентов**

Географическое происхождение	Подвой				Привой				Превышение привоя над подвоем	
	X_{cp}	$\pm m$	V, %	t_{ϕ}	X_{cp}	$\pm m$	V, %	$t_{\phi} (t_{05} = 2,14)$	см	% к X_{cp}
Алтайское	34,2	2,67	27,1	1,44	40,9	2,84	24,1	1,77	6,7	98,5
Кемеровское	39,0	1,89	15,3	0,45	44,0	2,02	14,5	1,34	5,0	73,5
Коми	29,7	2,23	16,8	2,54	37,6	2,93	17,4	2,28	7,9	116,2
Свердловское	36,3	1,28	9,9	1,14	40,3	2,33	16,4	1,93	4,0	58,8
Томское	39,0	3,40	19,5	0,37	50,6	4,86	21,5	0,18	11,6	170,6
Тюменское	36,0	3,22	21,9	0,98	40,7	3,75	22,6	1,68	4,7	6,91
Ханты-мансийское	32,6	4,47	33,6	1,41	34,7	4,26	30,1	2,46	2,1	30,9
Читинское	40,9	3,81	20,9	—	51,9	5,53	23,8	—	11,0	161,8
Якутское	36,5	3,95	28,7	0,80	44,3	4,68	27,9	1,05	7,8	114,7

Уровень варьирования диаметра привоя – средний и высокий. У 10...27 % деревьев наблюдается хорошее срастание прививаемых компонентов, при котором диаметр привоя равен диаметру подвоя, например у рамет алтайского (7-11 клона 9-5), свердловского (14-9 клона 21-1 и 16-8 клона 21-1), ханты-мансийского (16-9 клона 34-2), читинского (1-17 клона 9-5) происхождений. Географическая изменчивость диаметра ствола привоя имеет средний уровень (13,2 %).

Показатели развития кроны особо значимы в экологическом плане. Диаметр кроны обычно пропорционален высоте и определяется взаимодействием генотип–среда [14]. Диаметр и протяженность кроны кедров сибирского разного географического происхождения приведены в табл. 5.

Таблица 5

Размеры кроны привитых деревьев кедров сибирского на плантации

Географическое происхождение	Диаметр, м				Протяженность, м			
	X_{cp}	$\pm m$	V, %	t_{ϕ}	X_{cp}	$\pm m$	V, %	t_{ϕ}
Алтайское	6,9	0,39	19,5	1,21	12,3	0,52	14,5	1,25
Кемеровское	6,9	0,25	11,4	1,41	12,5	0,35	8,8	1,14
Коми	6,2	0,37	13,4	2,47	10,7	0,47	9,9	3,38
Свердловское	6,8	0,27	11,3	1,58	12,5	0,60	13,5	0,93
Томское	7,6	0,43	12,7	—	13,3	0,61	10,3	—
Тюменское	7,0	0,21	7,4	1,25	12,1	0,77	15,6	1,22
Ханты-мансийское	6,4	0,52	19,9	1,78	12,8	0,64	12,3	0,57
Читинское	7,3	0,75	23,0	0,35	12,1	0,41	7,6	1,63
Якутское	7,2	0,51	18,8	0,60	11,6	0,79	16,7	1,70

Крона большего диаметра сформировалась у клонов томского происхождения. Достоверно отстают по развитию кроны деревья в варианте коми

($t_{\phi} > t_{05}$). Кроны деревьев алтайского, кемеровского, читинского, свердловского, тюменского, ханты-мансийского, якутского происхождений не имеют существенных различий при 5 %-м уровне значимости ($t_{\phi} < t_{05}$). Коэффициент географической изменчивости равен 18,8 %. По диаметру кроны (8,6...9,6 м) выделены раметы алтайского (4-5 клона 29-4), томского (1-12 клона 11-3), читинского (15-12 клона 9-9), якутского (17-9 клона 2-9) происхождений. Учитывая, что деревья размещены по схеме 4×4 м, видно, что в данном возрасте произошло смыкание крон.

Отмечается, что протяженность кроны – более стабильный показатель, который в меньшей степени реагирует на факторы среды и является адаптивным при лимитировании климатических факторов [14]. Из приведенных данных видно, что протяженность живой кроны больше у томских, читинских, ханты-мансийских, кемеровских, алтайских, свердловских экземпляров, что подтверждается статистически. Встречаемость деревьев с протяженностью кроны в долях 0,7–0,8 составила 2 %; 0,8–0,9 – 51 %; 0,9–0,95 – 47 %. Большая протяженность кроны прослеживается в потомстве томской и ханты-мансийской популяций.

Объем кроны варьирует в больших пределах – от 161,44 (коми) до 301,52 м³ (томский). Превышение над средним значением в томском варианте составляет 30,4 %.

Установлена тесная связь между диаметром ствола привоя и кроны ($r = 0,855$), а также диаметром ствола и объемом кроны (0,827), значительная – между диаметром ствола и протяженностью кроны (0,520). Уравнения связи имеют следующий вид:

между диаметром ствола (x) и кроны (y)

$$y = -0,0051x^2 + 0,468x - 3,240 \quad (R^2 = 0,752);$$

между диаметром ствола (x) и протяженностью кроны (y)

$$y = -0,023x^2 + 1,768x - 20,803 \quad (R^2 = 0,428);$$

между диаметром ствола (x) и объемом кроны (y):

$$y = -0,622x^2 + 52,770x - 856,580 \quad (R^2 = 0,731).$$

Средняя длина хвои у деревьев разного географического происхождения колеблется от 9,1 до 10,7 см. Хвоей меньших размеров отличались деревья бурятского и тюменского происхождений. Длинную хвою (12,2...14,5 см) имеют единичные экземпляры томского, читинского, алтайского и кемеровского вариантов.

Заключение

Наблюдения за ростом кедра сибирского на подвое сосны обыкновенной подтвердили проявление географической и индивидуальной изменчивости показателей в зависимости от заготовки черенков с маточных деревьев, произрастающих в популяциях, отличающихся местом произрастания (по широте – на 12°, долготе – на 64°, высоте над уровнем моря – на 900 м). Наибольшие высоту, диаметр, объем кроны в 36-летнем возрасте имели раметы томского происхождения. Наименьшие показатели были у деревьев из республик Коми и Саха. С учетом того, что гибель привитых деревьев при гетеропластических прививках происходит из-за неодинаковой интенсивности роста привоя и подвоя по диаметру ствола, отобраны деревья без образования наплывов в местах срастания прививаемых компонентов. Наибольшее количество таких

деревьев (10...27 %) было в вариантах алтайского, свердловского, тюменского, ханты-мансийского и читинского происхождений.

Установлено, что между показателями привитых деревьев существует тесная (диаметр ствола привоя и кроны, диаметр ствола и объем кроны) и значительная (диаметр ствола и протяженность кроны) связь. Это можно использовать при оценке и отборе рамет для последующего размножения.

Проведенные многолетние исследования позволили установить перспективность создания клоновых плантаций кедра сибирского на подросте сосны обыкновенной для ускоренной заготовки черенков с отселектированных экземпляров и создания плантаций следующих поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Братилова Н.П., Калинин А.В., Крот Т.Л. Сравнительный анализ ростовых и адаптационных способностей кедровых сосен в условиях юга Средней Сибири // Материалы междунар. конф. «Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений» (23–24 октября 2003 г.). Красноярск: СибГТУ, 2003. № 6. С. 13–15. [Bratilova N.P., Kalinin A.V., Krot T.L. Comparative Analysis of Growth and Adaptation Abilities of Cedar Pines in the South of Central Siberia. *Proceedings of the International Conference "Gardening, Seed Growing, Introduction of Woody Plants" (October 23–24, 2003)*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2003, no. 6, pp. 13–15].
2. Дроздов И.И., Дроздов Ю.И. Лесная интродукция. М.: МГУЛ, 2000. 135 с. [Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Forest Introduction*. Moscow, MGUL Publ., 2000. 135 p.].
3. Ирошников А.И. Географические культуры хвойных в Южной Сибири // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. С. 4–110. [Iroshnikov A.I. Provenance Trials of Conifers in Southern Siberia. *Provenance Trials and Plantations of Conifers in Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, pp. 4–110].
4. Колегова Н.Ф. Семенные прививочные плантации // Лесн. хоз-во. 1974. № 11. С. 50–52. [Kolegova N.F. Grafting Seed Plantations. *Lesnoye khozyaystvo*, 1974, no. 11, pp. 50–52].
5. Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 216 с. [Krylov G.V., Talantsev N.K., Kozakova N.F. *Cedar*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 216 p.].
6. Кузнецова Г.В. Опыт создания клоновой плантации кедровых сосен в Красноярской лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2007. XXIV. № 2-3. С. 217–224. [Kuznetsova G.V. The Experience of Creating Clonal Seed Orchards of Cedar Pines in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2007, vol. XXIV, no. 2-3, pp. 217–224].
7. Кузнецова Г.В., Дарикова Ю.А., Савва Ю.В., Ваганов Е.А., Грачев А.М. Прививки кедровых сосен как объект исследований // Хвойные бореальной зоны. 2010. XXVII. № 3-4. С. 312–316. [Kuznetsova G.V., Darikova Yu.A., Savva Yu.V., Vaganov E.A., Grachev A.M. Graft of Cedar Pines as an Object of Research. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2010, vol. XXVII, no. 3-4, pp. 312–316].
8. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 282 с. [Mamayev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (On the Example of Pinaceae in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 282 p.].
9. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Коллекция клонов, полусибов, разных морфологических форм кедр сибирского на плантации СибГТУ (юг Средней Сибири). Красноярск: СибГТУ, 2012. 47 с. [Matveeva R.N., Butorova O.F. *A Collection of Clones, Halfsibs and Different Morphological Forms of Siberian Pine on the Plantation of SibSTU (The South of Central Siberia)*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2012. 47 p.].

10. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Ревин А.В. Рост клонов кедров сибирского в условиях юга Средней Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2011. 128 с. [Matveeva R.N., Butorova O.F., Revin A.V. *Growth of Siberian Pine Clones in the South of Central Siberia*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2011. 128 p.].

11. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Щерба Ю.Е. Семенное и вегетативное размножение отобраных деревьев сосны кедровой сибирской. Красноярск: СибГТУ, 2016. 206 с. [Matveeva R.N., Butorova O.F., Shcherba I.E. *Seed and Vegetative Propagation of Selected Siberian Pine Trees*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2016. 206 p.].

12. Матвеева Р.Н., Милютин Л.И., Буторова О.Ф., Братилова Н.П. Отбор деревьев кедров сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 9–17. [Matveeva R.N., Milyutin L.I., Butorova O.F., Bratilova N.P. Selection of High Reproductive Siberian Cedar Trees in the Geographic Seed Plantation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 9–17]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.2.9](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.9), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e32/matveeva.pdf>

13. Митрофанов С.В. Влияние способа прививки кедров сибирского на рост и приживаемость привоя // Лесн. хоз-во. 2013. № 2. С. 120–122. [Mitrofanov S.V. The Influence of Siberian Pine Grafting Method on Growth and Survival of Scion. *Lesnoye khozyaystvo*, 2013, no. 2, pp. 120–122].

14. Новикова Т.Н. Изменчивость показателей развития кроны у потомств сибирских климатипов сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 4. С. 22–29. [Novikova T.N. Feature Variability of Crown Development in Progenies of Siberian Scots Pine Climatypes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 4, pp. 22–29]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/cdf/lkh3.pdf>

15. Перечень лесорастительных зон Российской Федерации. М.: М-во природных ресурсов и экологии РФ, 2018. 20 с. [*The List of Forest Areas of the Russian Federation*. Moscow, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2018. 20 p.].

16. Проказин Е.П. Новый метод прививки хвойных для создания семенных участков // Лесн. хоз-во. 1960. № 5. С. 22–28. [Prokazin E.P. A New Method of Grafting Conifers to Create Seed Plots. *Lesnoye khozyaystvo*, 1960, no. 5, pp. 22–28].

17. Путенихина К.В. Изменчивость генеративных органов кедров сибирского при интродукции в Башкирском Предуралье: селекционные возможности // Материалы 4-го Междунар. совещ. по сохранению лесных генетических ресурсов Сибири, Барнаул, Россия, 24–29 августа 2015 г. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2015. С. 146–148. [Putenikhina K.V. Variability of Generative Organs in Siberian Stone Pine under the Conditions of Introduction in Bashkir Cis-Urals: Possibilities for Selection. *Proceedings of the 4th International Conference on Conservation of Forest Genetic Resources in Siberia, Barnaul, Russia, August 24–29, 2015*. Krasnoyarsk, IL SB RAS Publ., 2015, pp. 146–148].

18. Тумов Е.В. Генетико-селекционные основы подбора клонов кедров сибирского при плантационном ореховодстве // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГТУ, 1998. Т. 1. С. 21–23. [Titov E.V. Genetic and Selective Basics for Clones Selection in Cultivation of Siberian Pine Nuts. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy*, 1998, vol. 1, pp. 21–23].

19. Тумов Е.В. Плантационное выращивание кедровых сосен. Воронеж: ВГЛТА, 2004. 165 с. [Titov E.V. *Cultivation of Cedar Pine Plantations*. Voronezh, VGLTA Publ., 2004. 165 p.].

20. Хохрин А.В. Опыт прививки кедров на Урале // Лесн. хоз-во. 1957. № 3. С. 70–71. [Khokhrin A.V. The Experience of Cedar Grafting in the Urals. *Lesnoye khozyaystvo*, 1957, no. 3, pp. 70–71].

21. Царев А.П., Лаур Н.В. Перспективные направления селекции и репродукции лесных древесных растений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 36–44. [Tsarev A.P., Laur N.V. Promising Trends of Breeding and Reproduction of Woody Plants. *Lesnoy Zhurnal*

[Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 36–44]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/11f/lh3.pdf>

22. Щерба Ю.Е., Гришлова М.В. Показатели однолетних гомопластических и гетеропластических прививок кедровых сосен // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. XXXIII, № 5-6. С. 248–252. [Shcherba I.E., Grishlova M.V. Indicators of Annual Homoplastic and Heteroplastic Grafting of Cedar Pines. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2015, vol. XXXIII, no. 5-6, pp. 248–252].

23. Blada I., Popescu F. Swiss Stone Pine Provenance Experiment in Romania: II Variation in Growth and Branching Traits to Age 14. *Silvae Genetica*, 2007, vol. 56, iss. 1-6, pp. 148–158. DOI: [10.1515/sg-2007-0023](https://doi.org/10.1515/sg-2007-0023)

24. Hertel H., Schneck V. Genetic and Phenotypical Variation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Populations Due to Seed Origin and Environmental Conditions at Experimental Sites. *Forest Genetics*, 1999, vol. 6, iss. 2, pp. 65–72.

25. Jansons Ā., Baumanis I. Growth Dynamics of Scots Pine Geographical Provenances in Latvia. *Baltic Forestry*, 2005, vol. 11, no. 2(21), pp. 29–37.

26. Jayawickrama K.J.S., Jett J.B., McKeand S.E. Rootstock Effects in Grafted Conifers: A Review. *New Forests*, 1991, vol. 5, iss. 2, pp. 157–173. DOI: [10.1007/bf00029306](https://doi.org/10.1007/bf00029306)

27. Kuss M. Die-Back of Grafts in the Clonal Seed Orchards of Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziensis* [Mirb.] Franco) in Poland and Attempts at Producing Seedlings of this Species by Autovegetative Propagation. *Dendrobiology*, 2002, vol. 47 Supplement, pp. 93–100.

28. Medina Perez A.M., White T.L., Huber D.A., Martin T.A. Graft Survival and Promotion of Female and Male Strobili by Topgrafting in a Third-Cycle Slash Pine (*Pinus elliotii* var. *elliottii*) Breeding Program. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, vol. 37, iss. 7, pp. 1244–1252. DOI: [10.1139/X07-004](https://doi.org/10.1139/X07-004)

29. Sato T., Touhei T. Geographic Variation of Pine Needles Features in *Pinus parvifolia* in the Kanto Region. *Toyama-shi Kagaku Bunka Sentā kenkyū hōkoku*. [Bulletin of the Toyama Science Museum], 2005, vol. 28, pp. 81–89. (In Japanese)

30. Schmidting R.C., Ronald C. Rootstock Influences Flowering, Growth, and Survival of Loblolly Pine Grafts. *Forest Science*, 1983, vol. 29, iss. 1, pp. 117–124.

31. Sharma R.K., Mason E.G., Sorensson C.T. Productivity of Radiata Pine (*Pinus radiata* D. Don.) Clones in Monoclonal and Clonal Mixture Plots at Age 12 Years. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, iss. 1, pp. 140–148. DOI: [10.1016/j.foreco.2007.08.033](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.033)

32. Șofletea N., Budeanu M., Pârnuță G. Provenance Variation in Radial Increment and Wood Characteristics Revealed by 30 Years Old Norway Spruce Comparative Trials. *Silvae Genetica*, 2012, vol. 61, iss. 1-6, pp. 170–178. DOI: [10.1515/sg-2012-0022](https://doi.org/10.1515/sg-2012-0022)

33. Thomson A.M., Parker W.H. Boreal Forest Provenance Tests Used to Predict Optimal Growth and Response to Climate Change. 1. Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, vol. 38, iss. 1, pp. 157–170. DOI: [10.1139/X07-122](https://doi.org/10.1139/X07-122)

34. Wright S. Variability within and among Natural Populations. Vol. 4. *Evolution and Genetics of Populations*. Chicago, University of Chicago Press, 1978. 580 p.

35. You W., Dong J., Lu A., Yun L., Huang G. Selection of Provenance Trials of *Pinus banksiana* Introduced from North America to Liaoning Province. *Dongbei linye daxue xuebao* [Journal of North-East Forestry University], 2006, vol. 34, iss. 1, pp. 9–11. (In Japanese)

GROWTH INDICES OF SIBERIAN PINE OF DIFFERENT GEOGRAPHICAL ORIGIN GRAFTED ON A SCOTS PINE ROOTSTOCK

R.N. Matveeva, Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-9622>

O.F. Butorova, Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8575-7464>

N.P. Bratilova, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAF-3074-2019](https://orcid.org/0000-0002-2918-9690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2918-9690>

I.E. Shcherba, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8437-4274>

V.V. Komarnitsky, Postgraduate Student

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety
“Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation;

e-mail: matveevrn@yandex.ru, butorova.olga@mail.ru, nbratilova@yandex.ru,

shcherba_@mail.ru, komarnitskiy.vitaliy@mail.ru

Forests dominated by Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) occupy about 40 mln ha in Russia. They fulfill soil- and water-protective roles, produce oxygen, and are the source of valuable nuts, wood, and other materials. The 36-year-old grafted trees of Siberian pine growing on a hybrid seed plantation in the suburban area of Krasnoyarsk region were the study object. A comparison of growth indices of 36-year-old ramets of Siberian pine of different geographical origin was the research purpose. Graftings were made on the Scots pine young growth in 1982. Grafting stocks were cut from plants grown from seeds harvested in 1960 in populations of different geographical origin. The location of the initial populations differs in latitude by 12°, longitude by 64° and altitude by 900 m above sea level. It has been found that the average height of 36-year-old grafted trees depending on geographical origin varies between 12.4 and 15.0 m; the trunk diameter – 29.7 and 40.9 cm; and the crown diameter – 6.4 and 7.6 m. Clones of Tomsk origin are characterized by the best growth. Clones of the northern populations (Komi and Sakha Republics) are characterized by the lowest height. The average diameter of scion exceeds the diameter of rootstock by 6.4–39.7 % depending on the graft geographical origin. Good graft intergrowth (the scion diameter is equal to the rootstock diameter) is observed in 10–27 % of trees. A relationship was found between the grafted trees: close, between trunk and crown diameter ($r = 0.855$); trunk diameter and crown volume (0.827); significant, between trunk diameter and crown length (0.520). It has been established that both the geographical origin and the clone belonging of scion influence on the growth intensity of the grafted trees and intergrowth of the grafted components. The obtained results can be used in creation of clonal plantations of the second generation.

For citation: Matveeva R.N., Butorova O.F., Bratilova N.P., Shcherba I.E., Komarnitsky V.V. Growth Indices of Siberian Pine of Different Geographical Origin Grafted on a Scots Pine Rootstock. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 9–19. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-9-19

Keywords: Siberian pine, plantation, geographical origin, graft, population, rootstock, scion, clone, ramet, variability.

Поступила 05.03.19 / Received on March 5, 2019

УДК 582.47:58.085:581.162.41

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-20-34

РОСТ И РАЗВИТИЕ ПЫЛЬЦЕВОЙ ТРУБКИ МОЖЖЕВЕЛЬНИКА ОБЫКНОВЕННОГО (*Juniperus communis*): РОЛЬ ЯДРА КЛЕТКИ ТРУБКИ

М.В. Сурсо¹, д-р с.-х. наук; ResearcherID: J-2197-2018,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

Д.Г. Чухчин², канд. техн. наук, проф.; ResearcherID: O-9487-2015,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: surso@fciarctic.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: dimatsch@mail.ru

Предпринята попытка на примере можжевельника обыкновенного выяснить функциональное значение ядра клетки трубки и его связь со структурами пыльцевой трубки у голосеменных растений. Пыльцевые трубки можжевельника в культуре *in vitro* изучались методами световой микроскопии (проходящий свет, флуоресценция) и инфракрасной Фурье-спектроскопии. Дано краткое описание процесса роста и развития пыльцевых трубок можжевельника. Опыты по ферментативному разрушению стенки пыльцевой трубки позволили выявить взаимосвязь генеративного ядра с протопластом, ассоциированным с ядром клетки трубки. Установлено, что генеративное ядро довольно прочно связано с протопластом ядра клетки трубки силой поверхностного натяжения внутренних мембран. Доказано, что протопласт и оба ядра некоторое время сохраняют нативность вне тела трубки после лизиса ее кончика. Однако ни генеративное ядро, ни ядро клетки трубки не могут самостоятельно функционировать вне протопласта пыльцевой трубки. Микрофибриллы актинового цитоскелета распределены во внутреннем объеме трубки неравномерно, большая их часть сконцентрирована в центральной части трубки и ассоциирована с ядром клетки трубки и протопластом. В составе пластид преобладают лейкопласты, в основном это амилопласты, большая часть которых сконцентрирована вокруг ядра клетки трубки. Протопласт содержит большое количество митохондрий. Лизосомы распределены по всему объему пыльцевой трубки более или менее равномерно, однако значительная их часть, особенно у активно растущих трубок, скапливается вокруг ядра клетки трубки и вблизи кончика трубки. Использование в качестве маркера дейтерия позволило установить последовательность синтеза и локализацию синтезируемых веществ в процессе роста пыльцевой трубки. Повышенное содержание дейтерия наблюдалось в зоне протопласта, ассоциированного с ядром клетки трубки. На основе новых экспериментальных данных высказано предположение, что, возможно, ядро клетки трубки контролирует синтез органических веществ и их распределение в теле трубки. Вероятно, ядро клетки трубки способствует ее полярному росту и ориентирует во времени и пространстве рост кончика трубки *in vivo*.

Для цитирования: Сурсо М.В., Чухчин Д.Г. Рост и развитие пыльцевой трубки можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis*): роль ядра клетки трубки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-20-34

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-04-00056. Образцы пыльцы собраны при проведении экспедиционных работ в рамках ФНИР по государственному заданию ФИЦКИА РАН (тема №0409-2019-0039), № гос. регистрации – АААА-А18-118011690221-0.

Благодарность: Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Ключевые слова: можжевельник, пыльцевая трубка, ядро клетки трубки, инфракрасная спектроскопия, дейтерий, ферментативный гидролиз.

Введение

Прорастание пыльцы и рост пыльцевых трубок являются важнейшим этапом в репродуктивной деятельности растений. У семенных растений пыльцевая трубка служит средством доставки мужских гамет к яйцеклетке, в пыльцевой трубке в большинстве случаев происходят заключительные этапы микрогаметогенеза. Поэтому пыльцевые трубки служат удобным лабораторным объектом при изучении физиолого-биохимических и структурно-динамических процессов в растительных клетках (например, полярности, апикального роста клеток, циркуляции цитоплазмы, транспорта ионов) [22, 24]. Вместе с тем у большинства голосеменных через кончики пыльцевых трубок, проникающих вглубь нуцеллуса семязачатков, выделяются гидролитические ферменты, способствующие лизису клеток тканей нуцеллуса. Продукты этого катаболизма служат питательной средой для нормального роста и развития пыльцевой трубки. Таким образом, пыльцевая трубка голосеменных осуществляет гетеротрофный тип питания, являясь по сути, эндопаразитом. В связи с этим для нее, как и для клеток некоторых других эмбриональных тканей, термин «растительная клетка» можно использовать лишь с определенными оговорками.

Взгляды на процессы роста и развития пыльцевых трубок со времен Амичи претерпели значительную эволюцию. Современные представления о развитии пыльцевых трубок основаны главным образом на экспериментах с проращиванием *in vitro* пыльцы покрытосеменных растений. В последние годы активно проводятся исследования роли филаментозных протеинов в прорастании пыльцы и росте пыльцевых трубок, связи микрофиламентов актинового цитоскелета с ядерными структурами, циркуляцией цитоплазмы [6, 18, 20, 35], транспорта везикул, эндо- и экзоцитоза в пыльцевых трубках [2, 4, 28, 29, 38]. Изучаются транспорт ионов и полярный рост пыльцевых трубок [5, 16, 19, 21, 23, 37, 39], роль ферментов в регуляции роста пыльцевых трубок и в процессах перемещения ядер и спермиев в растущих пыльцевых трубках [15, 25, 40]. В настоящее время для анализа состава пыльцы и пыльцевых трубок широко используется FTIR-спектроскопия (инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием), позволяющая интерпретировать определенные пики инфракрасных спектров [1, 3, 9, 26, 32, 41]. Все перечисленные исследования, выполненные на высоком техническом уровне, отвечают на вопрос «как?», но не говорят «почему?».

Роль генеративного ядра пыльцевой трубки голосеменных вполне понятна [31], однако функциональное значение ядра клетки трубки не столь очевидно. В этой статье сделана попытка дать теоретическое обоснование возможной роли ядра клетки трубки в росте и развитии пыльцевой трубки у можжевельника обыкновенного. Следует отметить, что процессы развития пыльцевых трубок *in vitro* у можжевельника обыкновенного изучены недостаточно. Известно

лишь несколько экспериментальных работ, посвященных механизму сбрасывания экзины при прорастании пыльцы, особенностям роста пыльцевых трубок и микрогаметогенезу у можжевельника [10–14, 30, 33, 34]. Для понимания функции ядра клетки трубки важно знать эти процессы, поэтому их описанию в статье уделено определенное внимание.

У видов сем. Cupressaceae зрелая пыльца обычно 2-клеточная [7, 8, 17], однако пыльцевые зерна можжевельника являются одноклеточными структурами, представляя собой не проросшие в микрогаметофит микроспоры. При инкубировании пыльцы в dH_2O , а также в водных растворах сахарозы или минеральных солей развитие пыльцевых трубок чаще всего заканчивается на стадии «туфельки». На агаровых средах, содержащих сахарозу, продолжительность роста пыльцевых трубок ограничена лишь динамикой развития микрофлоры, избежать которого сложно из-за естественного фона грибных спор, содержащихся в образцах пыльцы [33].

Цель исследования – описание развития пыльцевой трубки можжевельника обыкновенного и выяснение возможной роли ядра клетки трубки и ассоциированного с ним протопласта в этом процессе.

Объекты и методы исследования

Световая микроскопия. Пыльцу проращивали *in vitro* в течение 168 ч во влажных камерах (чашки Петри) в термостате при температуре 26,5 °C на 1,0 % агаре с добавлением 5,0 % (w/v) сахарозы. Проросшую пыльцу смывали с поверхности геля и 3 раза промывали в dH_2O . Неокрашенные или окрашенные 2,5 % (w/v) водным раствором щелочного синего (или 0,25 % (w/v) водным раствором сафранина) пыльцевые трубки на разных стадиях развития просматривали в проходящем свете на микроскопе AxioScope A1 («Carl Zeiss», Германия). При изучении актинового цитоскелета пыльцевые трубки фиксировали в 4,0 % (w/v) растворе параформальдегида в актистабилизирующем буфере, содержащем 100 mM Pipes, 1 mM $MgCl_2$, 1 mM $CaCl_2$ и 75 mM KCl (pH 6,9), в течение 1 ч. Затем образцы трижды промывали в фосфатном буфере и инкубировали в темноте в растворе 0,2 nM TRITC-фаллоидин в фосфатном буфере в течение 1 ч. Микрофиламенты актинового цитоскелета в пыльцевых трубках визуализировали на флуоресцентном микроскопе Altamir Lum 1LED (светофильтр В, 420...485 нм). При изучении ядерных структур пыльцевые трубки инкубировали в растворе 300 nM DAPI (4',6-диамидино-2-фенилиндол дигидрохлорид) в dH_2O в течение 0,5 ч в темноте и после 3-кратной промывки в dH_2O просматривали на флуоресцентном микроскопе Altamir Lum 1LED (светофильтр UV, 330...400 нм).

Ферментативный гидролиз полисахаридов клеточных стенок пыльцевых трубок. Проводили с помощью ламинариазы (катализирует гидролиз каллозы), пектинлиазы (катализирует гидролиз пектина), эндоглюконазы II (катализирует гидролиз целлюлозы) и целлюлазы (катализирует гидролиз целлюлозы). Состав препарата ламинариазы: КМЦ-аза (карбоксиметилцеллюлаза) – 3 900 ед./г; ламинариаза – 12 000 ед./г; белок – 840 мг/г. Состав препарата эндоглюконазы II: белок – 750 мг/г, КМЦ-аза – 15 000 ед./г; β -глюконаза – 10 000 ед./г; АФБ – 90 ед./г; авицелаза – 250 ед./г; целлобиаза – 50 ед./г; β -глюкозидаза – 90 ед./г. Состав препарата целлюлазы: КМЦ-аза (карбокси-

метилцеллюлаза) – 19 142 ед./г; ксиланаза – 19 671 ед./г; β -глюкозидаза – 1 173 ед./г; белок – 889 мг/г. Пыльцу проращивали, как описано выше, в течение 168 ч. В водную суспензию чистой культуры пыльцевых трубок добавляли 10 % (v/v) стокового водного раствора (10 мг/мл) соответствующего фермента. Культуры трубок инкубировали при температуре 37 °С. Препараты пыльцевых трубок после гидролиза просматривали с периодичностью примерно 2 ч в течение 8...24 ч. Препараты окрашивали в растворе 300 нМ DAPI в dH_2O .

Сканирующая электронная микроскопия. Разрушенные с помощью каталитических ферментов протопласты пыльцевых трубок 3 раза промывали в dH_2O , водную суспензию лиофильно высушивали. Образец наносили на пленку-подложку и после напыления золота просматривали на сканирующем электронном микроскопе при различных режимах увеличения.

FTIR-спектроскопия. Схема измерений показана на рис. 1.

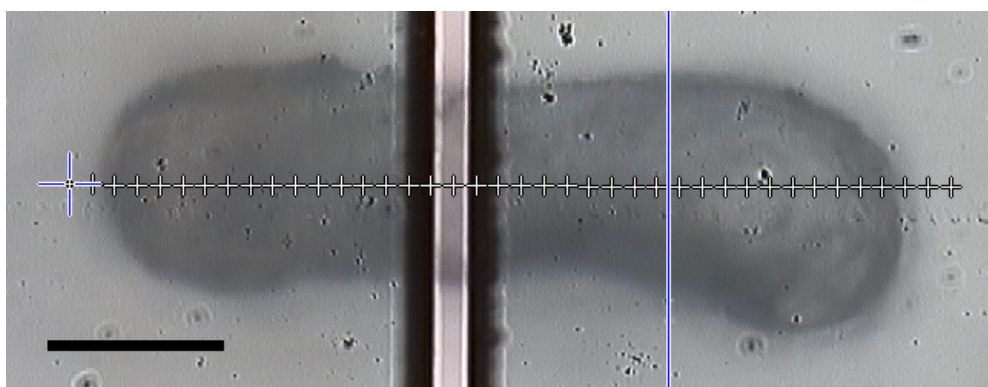


Рис. 1. Схема измерений ИК-спектров по длине пыльцевой трубки (крестиками обозначены точки автоматического позиционирования центра столика микроскопа при записи спектров; количество крестиков равно количеству полученных спектров; 40 спектров записаны последовательно слева направо; светлая вертикальная полоса (область сканирования) вырезается с помощью специальной апертуры, пластины которой (более темные области) поглощают ИК-излучение и пропускают видимый свет; в качестве фона, относительно которого проводилась запись, использована та же апертура с полосой сканирования, проходящей мимо объекта исследования.

Цена деления измерительной шкалы – 50 μm (фото Д.Г. Чухчина)

Fig. 1. The scheme of infrared spectra measurement along the pollen tube. The crosses indicate the points of automatic positioning of the center of the microscope table while spectra are recording. The number of crosses is equal to the number of spectra obtained; 40 spectra were recorded sequentially from the left to the right. The light vertical band in the center of the image represents the scan area. It is cut using a special aperture, the plates of which (darker areas) absorb infrared radiation and transmit visible light. The same aperture with the scanning band passing by the object of study was used as the background for the spectra recording.

Scale bar – 50 μm (photo by D.G. Chukhchin)

Пыльцу проращивали *in vitro* во влажных камерах (чашки Петри) в термостате при температуре 26,5 °С на 1,0 % агаре с добавлением 5,0 % сахарозы в течение 96 ч. Проросшую пыльцу смывали с поверхности геля и 3 раза промывали в dH_2O . В суспензию добавляли 15,0 % (v/v) дейтерий (D_2O), который в отличие от трития (^3H) и изотопа углерода (^{14}C) не обладает радиоактивностью

и не влияет на физиологические процессы в клетках растений. Кроме того, он хорошо детектируется методом FTIR-спектроскопии в области валентных колебаний C–D связей. Теоретически увеличение массы водорода в 2 раза должно приводить к уменьшению резонансной частоты колебаний в $\sqrt{2}$ раз и смещать полосу поглощения в область 2000...2100 см^{-1} , где отсутствуют полосы поглощения, характерные для живых объектов. Полученную смесь инкубировали в течение 72 ч при постоянном перемешивании в шейкере. Чистую культуру пыльцевых трубок замораживали в жидком азоте и лиофильно высушивали. Исследования пыльцевых трубок можжевельника обыкновенного в инфракрасной области спектра проводили на инфракрасном Фурье-спектрометре Vertex 70v («Bruker», Германия) с помощью инфракрасного микроскопа HYPERION 3000 («Bruker», Германия). Использовали точечный МСТ-детектор, позволяющий снимать ИК-спектры в точке размером 1 мкм. Условия записи спектров: фон – зеркальная поверхность (напыление Au–Pd); режим записи спектров – отражение; объектив – 36х-IR. Число сканирований в каждой точке позиционирования – 1024; разрешение – 4 см^{-1} .

В качестве маркера использовали C–D связь. Это связано с тем, что водород может спонтанно обмениваться с дейтерием в O–H и O–D связях. Исследуемые участки пыльцевых трубок имеют разную отражающую способность и, соответственно, разные абсолютные значения оптических плотностей. Однако измерение отношения оптических плотностей A_{2100}/A_{2930} устраняет эти недостатки и позволяет корректно характеризовать содержание C–D связи. Еще более точные результаты можно получить, используя отношение площадей пиков $S_{\text{C-D}}$ и $S_{\text{C-H}}$ колебаний:

$$ID = \frac{\int_{\lambda=1980 \text{ см}^{-1}}^{2220 \text{ см}^{-1}} Ad\lambda - \left(\frac{A_{2220} + A_{1980}}{2} \right) (2220 - 1980)}{\int_{\lambda=2788 \text{ см}^{-1}}^{3044 \text{ см}^{-1}} Ad\lambda - \left(\frac{A_{3044} + A_{2788}}{2} \right) (3024 - 2788)},$$

где ID – индекс дейтерирования.

Степень дейтерирования пропорциональна концентрации дейтерия в веществе клетки, ее значение должно быть одинаковым по всей длине трубки, выращенной только на H_2O . Точно так же оно будет одинаковым и у трубок, культивируемых только на D_2O . Замена H_2O на D_2O в процессе роста пыльцевой трубки позволяет установить последовательность синтеза и локализацию синтезируемых веществ, при образовании которых используется вода.

Результаты исследования и их обсуждение

Прорастание микроспоры в микрогаметофит у можжевельника начинается после сбрасывания экзины, когда микроспора находится в центре гидрофильной капсулы. В результате деления ядра микроспоры образуется 2-клеточный микрогаметофит, состоящий из маленькой генеративной клетки и более крупной клетки трубки, разделенных перегородкой (рис. 2, А).

Пыльцевая трубка приобретает сначала овальную, затем туфелькообразную форму, но все еще целиком вмещается в гидрофильную капсулу. Постепен-

но растущий кончик пыльцевой трубки достигает края гидрофильной капсулы и проходит сквозь нее, не прорывая ее стенки. Ядро генеративной клетки остается в дистальной части трубки, прижимаясь к одной из ее боковых стенок, ядро клетки-трубки постепенно перемещается ближе к ее центральной зоне (рис. 2, B). В культуре *in vitro* гидрофильная капсула сохраняется в течение всего времени прорастивания. При прорастании пыльцы можжевельника *in vivo* гидрофильная капсула сохраняется в течение всей жизни пыльцевых трубок, вплоть до момента оплодотворения. Перегородка между генеративным ядром и ядром клетки трубки обычно лизирует, но иногда может сохраняться некоторое время (рис. 2, D).

Ядро клетки трубки с ассоциированным протопластом и цитоплазмой отгорожены внутренней мембраной (рис. 2, C). Такая же мембрана имеется и у генеративного ядра. На отдельных препаратах, окрашенных щелочным синим, иногда просматривалась наружная мембрана, отслаивающаяся от внутренней поверхности стенки трубки в районе генеративного ядра и, вероятно, объединяющая оба ядра и ассоциированные с ядром клетки трубки протопласт и гиалоплазму. Микрофибриллы актинового цитоскелета распределены во внутреннем объеме трубки неравномерно. Бóльшая их часть сконцентрирована в центральной части трубки и ассоциирована с ядром клетки трубки (рис. 2, E).

Цитоплазматический тяж между ядрами, описанный для *Taxus uupnanensis* [36], у можжевельника отсутствует. Однако опыты по ферментативному разрушению стенки трубки показали, что генеративное ядро довольно прочно связано с протопластом ядра клетки трубки. В случае лизиса кончика трубки ядро клетки трубки, окруженное протопластом, выходит наружу. Генеративное ядро, прочно прилепившееся к дистальной поверхности протопласта, неизбежно следует вслед за ним (рис. 2, F). При этом бóльшая часть гиалоплазмы все еще находится внутри трубки. При полном лизисе стенки трубки и излиянии гиалоплазмы связь между генеративным ядром и протопластом сохраняется в большинстве случаев. Возможно, эта довольно прочная связь осуществляется посредством силы поверхностного натяжения внутренних мембран. Генеративное ядро как бы приклеивается к поверхности протопласта, ассоциированного с ядром клетки трубки. Оба ядра и протопласт сохраняют нативность вне тела трубки (рис. 2, G). В случае потери генеративного ядра нативность ядра клетки трубки и ассоциированного с ним протопласта также сохраняется. При длительном (18 ч и более) ферментативном гидролизе целлюлозы протопласт пыльцевой трубки полностью разрушается, распадаясь на отдельные пластиды, которые сохраняют нативность (рис. 2, H). Оба ядра трубки при этом дегенерируют, т. е. генеративное ядро, как и ядро клетки трубки, не может самостоятельно функционировать вне протопласта пыльцевой трубки. В составе пластид по-видимому преобладают лейкопласты, в большинстве своем это амилопласты, реагирующие на окрашивание раствором J–KJ. Бóльшая часть амилопластов сконцентрирована вокруг ядра клетки трубки (рис. 2, I, J). После введения препарата амилазы в водную суспензию, содержащую пластиды разрушенных пыльцевых трубок, амилопласты полностью лизируют. Кроме того, протопласт содержит очень большое количество митохондрий и лизосом (рис. 3).

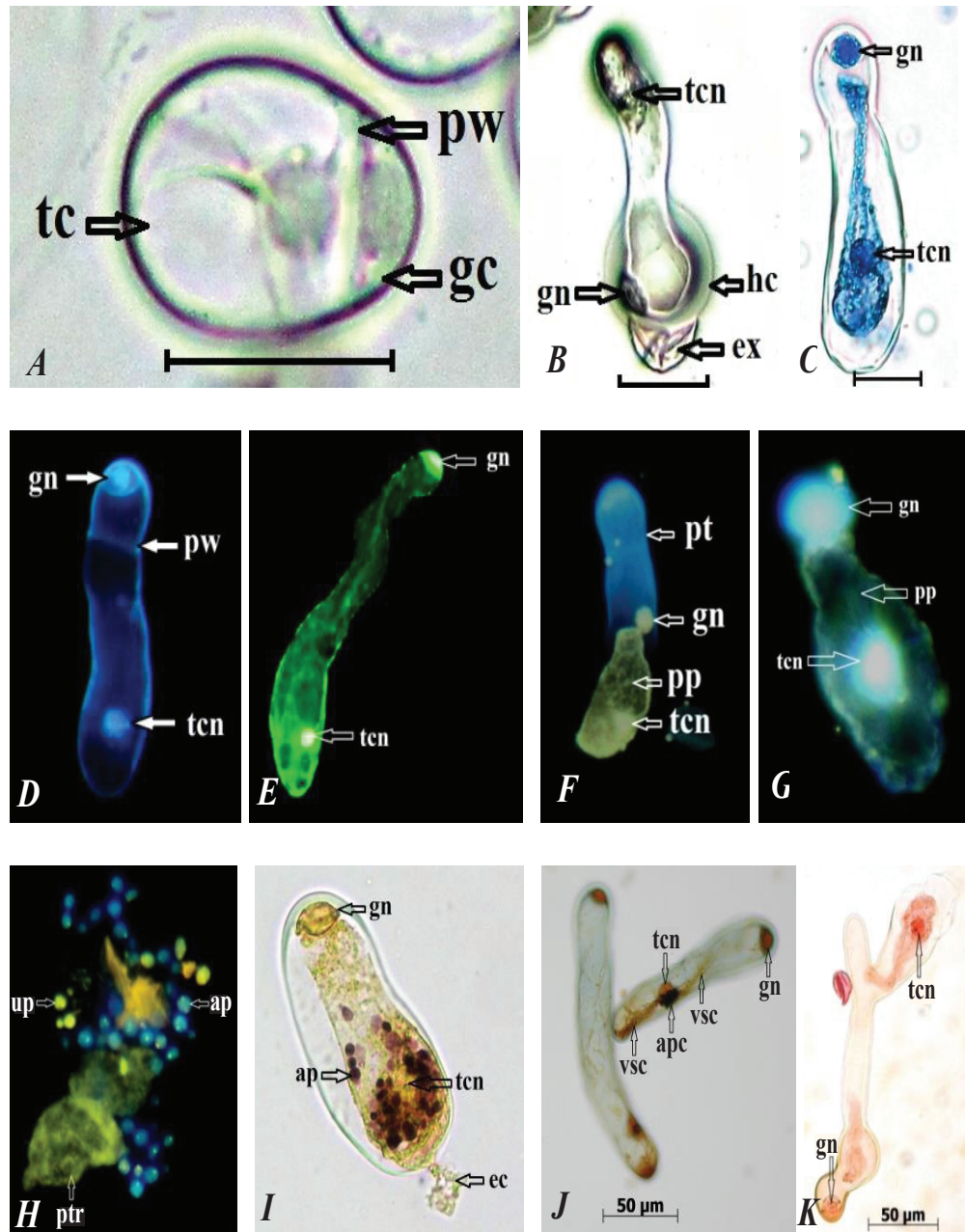


Рис. 2. Прорастание пыльцы можжевельника обыкновенного *in vitro*: *A* – 2-клеточный микрогаметофит внутри гидрофильной капсулы (генеративная клетка и клетка трубки разделены перегородкой); *B* – сформировавшаяся пыльцевая трубка (дистальный кончик трубки остается внутри сохранившейся гидрофильной капсулы); *C* – внутри пыльцевой трубки видна мембрана, отделяющая ядро клетки трубки с ассоциированным протопластом и цитоплазмой от генеративного ядра; *D* – у вполне сформировавшейся пыльцевой трубки между генеративным ядром и ядром клетки трубки все еще сохраняется разделительная перегородка; *E* – цитоскелет пыльцевой трубки можжевельника; *F* – кончик пыльцевой трубки лизировал под воздействием ламинариазы, протопласт выходит наружу через разрушенный кончик, генеративное ядро частично оторвалось от поверхности протопласта, гиалоплазма все еще находится внутри тела трубки;

G – оболочка трубки полностью лизировала под воздействием целлюлазы, гиалоплазма отсутствует, протопласт, ядро клетки трубки и генеративное ядро сохранили нативность; *H* – оболочка пыльцевой трубки полностью лизировала, протопласт разрушен, оба ядра дегенерировали, пластиды «высыпались» из протопласта, в составе лейкопластов преобладают амилопласты; *I* – пыльцевые трубки после 3 дней проращивания (активный рост трубок): амилопласты аккумулируются вокруг ядра клетки трубки, везикулы более или менее распределены по внутреннему объему трубки, более высокая концентрация везикул наблюдается вблизи кончика трубки, содержимое везикул выходит наружу через растущий кончик трубки; *J* – пыльцевая трубка через 7 дней проращивания (полностью сформировавшаяся пыльцевая трубка): амилопласты плотным кольцом окружают ядро клетки трубки, везикулы сконцентрированы вокруг ядра клетки трубки и вблизи кончика трубки; *K* – ветвление пыльцевой трубки можжевельника (ядро клетки трубки с большей частью ассоциированного протопласта переходит в более длинный отросток); *A, B* – без окрашивания; *C* – окрашивание 2,5 % (v/v) водным раствором щелочного синего; *D, F-H* – 300 nM DAPI; *E* – FITC-phalloidin; *I, J* – 1,0 % (v/v) водным раствором I-KI; *K* – 0,25 % (v/v) водным раствором сафранина; *tc* – клетка трубки; *gc* – генеративная клетка; *pw* – разделительная перегородка; *tcn* – ядро клетки трубки; *gn* – генеративное ядро; *hc* – гидрофильная капсула; *ex* – экзина пыльцевого зерна; *pt* – пыльцевая трубка; *pp* – протопласт; *ptr* – останки пыльцевой трубки; *ap* – амилопласты; *up* – пластиды неизвестного происхождения (вероятно, митохондрии); *ec* – экзоцитоз; *apc* – скопление амилопластов; *vsc* – скопление везикул.

Цена деления измерительной шкалы – 50 μm (фото М.В. Сурсо)

Fig. 2. The germination of juniper pollen *in vitro*: *A* – two-cell microgametophyte inside the hydrophilic capsule (generative cell and tube cell separated by a partition wall); *B* – formed pollen tube (the distal tip of the tube stays inside the well-preserved hydrophilic capsule); *C* – the membrane separating the tube cell nucleus with associated protoplast from the generative nucleus is visible inside the pollen tube; *D* – the partition wall still persists in fully formed pollen tube between the generative nucleus and tube cell nucleus; *E* – cytoskeleton of the pollen tube of juniper; *F* – the tip of the pollen tube was lysed under the influence of laminariase, protoplast comes out through the dissolved tip, the generative nucleus partially detached from the surface of the protoplast, hyaloplasm is still inside the tube body; *G* – the tube wall is completely lysed under the influence of cellulase, hyaloplasm is missing, the protoplast, the tube cell nucleus and generative nucleus have preserved the native character; *H* – the pollen tube wall is lysed fully, the protoplast is destroyed, both nuclei are degenerated, plastids spilled out of the protoplast, the composition of leucoplasts is dominated by amyloplasts; *I* – pollen tubes after 3 days of germination (active tube growth): amyloplasts accumulate around the tube cell nucleus, vesicles are more or less distributed throughout the inner volume of the tube, a higher concentration of vesicles is observed near the tube tip, the contents of the vesicles come out through the growing tube tip; *J* – pollen tube (fully formed) after 7 days of germination: amyloplasts form a tight ring around the tube cell nucleus, vesicles are concentrated around the tube cell nucleus and near the tube tip; *K* – branching pollen tubes of juniper (the nucleus of the cell tube with a large part of associated protoplast goes into a longer branch); *A, B* – without staining; *C* – staining with 2.5 % (v/v) aqueous solution of alkaliblau; *D, F-H* – 300 nM DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole dihydrochloride); *E* – FITC-phalloidin (fluorescein isothiocyanate-phalloidin); *I, J* – staining with 1.0 % (v/v) aqueous solution of I-KI; *K* – staining with 0.25 % (v/v) aqueous solution of safranin; *tc* – tube cell; *gc* – generative cell; *pw* – partition wall; *tcn* – tube cell nucleus; *gn* – generative nucleus; *hc* – hydrophilic capsule; *ex* – exine of pollen grains; *pt* – pollen tube; *pp* – protoplast; *ptr* – pollen tube ruins; *ap* – amyloplasts; *up* – plastids of unknown origin (probably mitochondria); *ec* – exocytosis; *apc* – amyloplasts accumulation; *vsc* – vesicles accumulation.

Scale bar – 50 μm (photos by M.V. Surso)

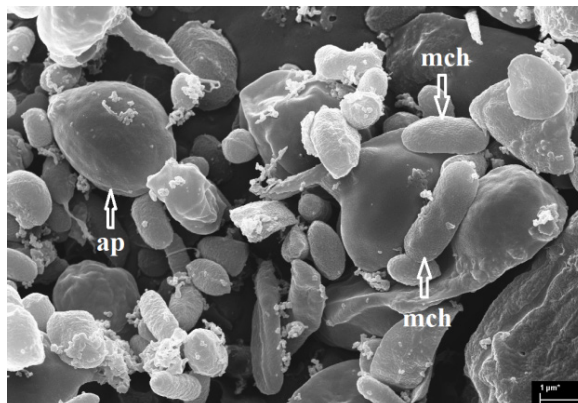


Рис. 3. Содержимое разрушенных протопластов пыльцевых трубок можжевельника: ap – амилопласты, mch – митохондрии. Цена деления шкалы – 1 μm (фото Д.Г. Чухчина)

Fig. 3. Ruins of the destroyed protoplasts of the pollen tubes of juniper: ap – amyloplast, mch – mitochondria. Scale bar – 1 μm (photo by D.G. Chukhchin)

Везикулы распределены по всему объему пыльцевой трубки более или менее равномерно. Однако значительная часть везикул, особенно у активно растущих трубок, скапливается вокруг ядра клетки трубки и вблизи ее кончика (см. рис. 2, *Л*). Вероятно, кончик стенки пыльцевой трубки у можжевельника состоит преимущественно из тонкого слоя каллозы. Основная часть стенки трубки – это эластичная пектиновая оболочка [27], на которую наслаиваются микрофибриллы целлюлозы, хорошо заметные на сканирующем электронном микроскопе и придающие ей упругость.

Вегетативное ядро участвует в регуляции роста пыльцевой трубки. Это косвенно подтверждается тем, что у ветвящихся пыльцевых трубок вегетативное ядро вместе с ассоциированным протопластом перемещается в наиболее быстро растущий кончик трубки (рис. 2, *К*). В северной тайге время между опылением и оплодотворением у можжевельника составляет примерно 13 месяцев, включая период зимнего покоя. Все это время генеративное ядро находится в состоянии анабиоза, активизируясь лишь перед оплодотворением. Поэтому в культуре *in vitro* деление генеративного ядра не наблюдается. В результате митоза генеративного ядра образуются два спермия. У видов сем. Cupressaceae, в отличие от других хвойных, спермии разделены перегородкой, т. е. имеют клеточное происхождение [17].

ИК-спектры пыльцевых трубок показаны на рис. 4.

Спектры с 1 по 11 и с 32 по 40 (рис. 1) почти идентичны фону и имеют малые оптические плотности во всем диапазоне. Это свидетельствует о том, что основная масса вещества пыльцевой трубки сосредоточена в центре, а периферия представлена только тонкой клеточной стенкой. В спектрах можно четко идентифицировать следующие полосы поглощения: широкая полоса 3100...3600 cm^{-1} – валентные колебания O–H групп; 2830...2970 cm^{-1} – валентные колебания C–H групп; 1730 cm^{-1} – валентные колебания C=O связей; 1030 cm^{-1} – колебания C–O–C связей.

На рис. 5 приведены зависимости оптической плотности от положения области сканирования на пыльцевой трубке.

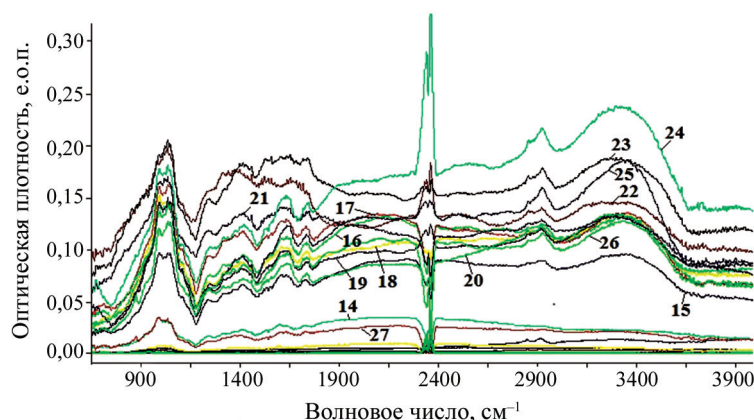


Рис. 4. ИК-спектры пыльцевых трубок можжевельника (е. о. п. – единицы оптической плотности; каждая кривая (номера с 14 по 26) соответствует ИК-спектру в одной точке измерения, номер кривой – точке автоматического позиционирования на рис. 1 (слева направо))

Fig. 4. Infrared spectra of the juniper pollen tubes (e.o.p. – units of optical density). Each curve (No. 14–26) corresponds to the infrared spectrum at one measurement point. The curve number corresponds to the point indicated by the cross in Fig. 1 (from the left to the right)

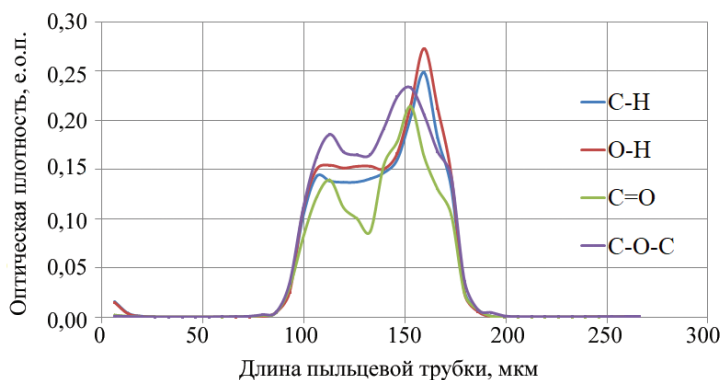


Рис. 5. Значения оптической плотности по длине пыльцевой трубки: C–H группы (липиды, углеводы, белки, РНК, ДНК); O–H группы (углеводы, белки, РНК, ДНК); C=O группы – карбонильные и карбоксильные группы (белки, РНК, ДНК, липиды); C–O–C группы (полисахариды)

Fig. 5 Absorbency values along the length of the pollen tube. C–H groups: lipids, carbohydrates, proteins, RNA, DNA. O–H groups: carbohydrates, proteins, RNA, DNA. C=O groups (carbonyl and carboxyl groups): proteins, RNA, DNA, lipids. C–O–C groups: polysaccharides

Оптическая плотность напрямую связана с концентрацией вещества, имеющего определенную химическую связь. Вещества в центральной части трубки, содержащей большую часть протопласта, распределены неравномерно.

Отношение концентраций может составлять 1,5–2 раза. Распределение C=O и C–O–C групп синхронно и имеет бимодальный характер. Максимумы расположены на периферии. Распределение C–H и O–H групп также синхронно и имеет один ярко выраженный максимум.

Значения индексов дейтерирования (*ID*) приведены на рис. 6.

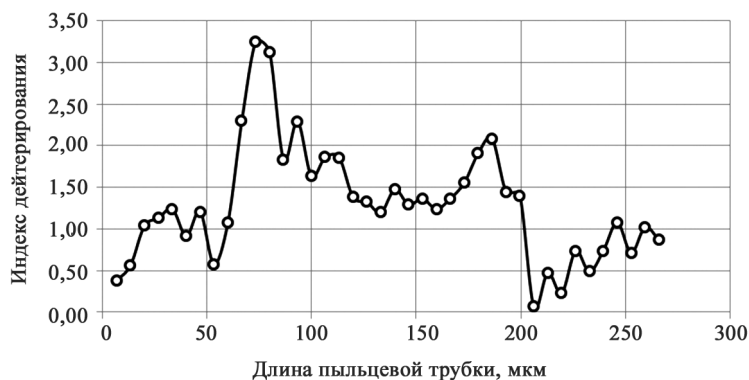


Рис. 6. Распределение индекса дейтерирования по длине пыльцевой трубки

Fig. 6 Distribution of the deuterium index along the length of the pollen tube

Относительное содержание дейтерия характеризует последовательность формирования тканей в объекте. Чем оно выше, тем позднее образована эта ткань. Из рис. 6 следует, что наибольшее содержание C–D связей находится на самых краях зоны протопласта, ассоциированного с ядром клетки трубки. Значит, и повышенное содержание дейтерия также наблюдается на краях протопласта, ассоциированного с ядром клетки трубки. Скорее всего, дейтерий локализован в фосфолипидном слое внутренней мембраны, отделяющей протопласт от стенки пыльцевой трубки.

Заключение

Ядро клетки трубки и ассоциированного с ним протопласта у можжевельника обыкновенного функционально связаны с синтезом органических веществ, необходимых для построения тела трубки. Вероятно, функция ядра клетки трубки заключается не только в регулировании процессов синтеза органических веществ, но и в распределении их при построении тела пыльцевой трубки. Очевидно, что ядро клетки трубки, непрерывно перемещаясь внутри тела трубки вместе с ассоциированным протопластом в сторону растущего кончика трубки, способствует ее полярному росту. Гораздо сложнее понять, каким образом у голосеменных, у которых отсутствует проводниковая ткань, кончик трубки, растущей *in vivo*, достигает строго определенной точки в строго определенный момент. При этом продолжительность жизни пыльцевой трубки у голосеменных растений может быть весьма значительной. Например, у можжевельника обыкновенного в северной тайге она составляет, с учетом зимнего покоя, около 13 мес. Не ясно, каким образом осуществляется интеракция мужского и женского гаметофитов, когда между ними нет прямого контакта. Но такая интеракция доказана результатами многочисленных экспериментов по искус-

ственному опылению. Не исключено, что ядро клетки трубки у голосеменных является одним из двух центров, координирующих интеракцию мужского и женского гаметофитов, и играет роль своеобразного гироскопа. Приняв *a priori* этот тезис, можно предположить, что кончик растущей пыльцевой трубки достигает яйцеклетки к моменту ее созревания во многом благодаря регуляторной функции ядра клетки трубки.

Хотя регуляторная функция ядра растительной клетки как результат сложной экспрессии генов в онтогенезе давно установлена и не оспаривается, следует признать, что это лишь в общих чертах объясняет механизм развития пыльцевой трубки. Наше исследование позволяет высказать осторожное предположение, что, возможно, этот механизм регулируется не одним, а многими составляющими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bağcıoğlu M., Kohler A., Seifert S., Kneipp J., Zimmermann B. Monitoring of Plant–Environment Interactions by High-Throughput FTIR Spectroscopy of Pollen. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, no. 8, iss. 7, pp. 870–880. DOI: [10.1111/2041-210X.12697](https://doi.org/10.1111/2041-210X.12697)
2. Battey N.H., James N.C., Greenland A.J., Brownlee C. Exocytosis and Endocytosis. *The Plant Cell*, 1999, vol. 11, pp. 643–659. DOI: [10.1105/tpc.11.4.643](https://doi.org/10.1105/tpc.11.4.643)
3. Buta E., Cantor M., Ștefan R., Pop R., Mitre I., Buta M., Sestraș R.E. FT-IR Characterization of Pollen Biochemistry, Viability, and Germination Capacity in *Saintpaulia* H. Wendl. Genotypes. *Journal of Spectroscopy*, 2015, vol. 2015, art. 706370. 7 p. DOI: [10.1155/2015/706370](https://doi.org/10.1155/2015/706370)
4. Camacho L., Malhó R. Endo/Exocytosis in the Pollen Tube Apex is Differentially Regulated by Ca^{2+} and GTPases. *Journal of Experimental Botany*, 2003, no. 54, iss. 380, pp. 83–92. DOI: [10.1093/jxb/erg043](https://doi.org/10.1093/jxb/erg043)
5. Chen T., Wu X., Chen Y., Li X., Huang M., Zheng M., Baluška F., Šamaj J., Lin J. Combined Proteomic and Cytological Analysis of Ca^{2+} -Calmodulin Regulation in *Picea meyeri* Pollen Tube Growth. *Plant Physiology*, 2009, vol. 149, pp. 1111–1126. DOI: [10.1104/pp.108.127514](https://doi.org/10.1104/pp.108.127514)
6. Chen Y., Chen T., Shen S., Zheng M., Guo Y., Lin J., Baluška F., Šamaj J. Differential Display Proteomic Analysis of *Picea meyeri* Pollen Germination and Pollen-Tube Growth after Inhibition of Actin Polymerization by Latrunculin B. *The Plant Journal*, 2006, vol. 47, iss. 2, pp. 174–195. DOI: [10.1111/j.1365-3113X.2006.02783.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2006.02783.x)
7. Chichiricò G., Pacini E. *Cupressus arizonica* Pollen Wall Zonation and *in vitro* Hydration. *Plant Systematics and Evolution*, 2008, vol. 270, iss. 3–4, pp. 231–242. DOI: [10.1007/s00606-007-0610-6](https://doi.org/10.1007/s00606-007-0610-6)
8. Chichiricò G., Spanò L., Torracca G., Tartarini A. Hydration, Sporoderm Breaking and Germination of *Cupressus arizonica* Pollen. *Plant Biology*, 2009, vol. 11, iss. 3, pp. 359–368. DOI: [10.1111/j.1438-8677.2008.00134.x](https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00134.x)
9. Depciuch J., Kasprzuk I., Drzymala E., Parlinska-Wojtan M. Identification of Birch Pollen Species Using FTIR Spectroscopy. *Aerobiologia*, 2018, vol. 34, iss. 4, pp. 525–538. DOI: [10.1007/s10453-018-9528-4](https://doi.org/10.1007/s10453-018-9528-4)
10. Diavanshir K., Fechner G.H. Pollen Germination and Pollen Tube Growth of *Juniperus* from Autumn and Winter Collections. *Silvae Genetica*, 1975, vol. 24, iss. 1, pp. 26–29.
11. Duhoux E. Structural Growth of the Wall of the Pollen Grain of *Juniperus communis* (Cupressaceae), Growth *in vitro* during the Hydration Phase. *Comptes Rendus Des Seances Hebdomadaires De L'Academie Des Sciences*, 1972, vol. 274, no. 20, pp. 2767–2770.

12. Duhoux E. Formation of the Cell Wall of the Pollen Tube during Germination of Pollen in *Juniperus communis* Growth *in vitro*. *Comptes Rendus Des Seances Hebdomadaires De L'Academie Des Sciences*, 1972, vol. 274, no. 24, pp. 3238–3241.
13. Duhoux E. The Division of the Reproductive Cell and the Release of Its Products in the Pollen Tubes of *Juniperus communis* and *Cupressus arizonica*. *Revue Generale De Botanique*, 1974, vol. 81, no. 962/963/964, pp. 193–204.
14. Duhoux E. Mechanism of Exine Rupture in Hydrated Taxoid Type of Pollen. *Grana*, 1982, vol. 21, iss. 1, pp. 1–7. DOI: [10.1080/00173138209427673](https://doi.org/10.1080/00173138209427673)
15. Feijó J.A., Malhó R., Pais M.S.S. A Cytochemical Study on the Role of ATPases during Pollen Germination in *Agapanthus umbelatus* L'her. *Sexual Plant Reproduction*, 1992, vol. 5, iss. 2, pp. 138–145. DOI: [10.1007/BF00194873](https://doi.org/10.1007/BF00194873)
16. Feijó J.A., Sainhas J., Hackett G.R., Kunkel J.G., Hepler P.K. Growing Pollen Tubes Possess a Constitutive Alkaline Band in the Clear Zone and a Growth-Dependent Acidic Tip. *Journal of Cell Biology*, 1999, vol. 144, no. 3, pp. 483–496. DOI: [10.1083/jcb.144.3.483](https://doi.org/10.1083/jcb.144.3.483)
17. Fernando D.D., Lazzaro M.D., Owens J.N. Growth and Development of Conifer Pollen Tubes. *Sexual Plant Reproduction*, 2005, vol. 18, iss. 4, pp. 149–162. DOI: [10.1007/s00497-005-0008-y](https://doi.org/10.1007/s00497-005-0008-y)
18. Geitmann A., Snowman B.N., Emons A.M.C., Franklin-Tong V.E. Alterations in the Actin Cytoskeleton of Pollen Tubes are Induced by the Self-Incompatibility Reaction in *Papaver rhoeas*. *The Plant Cell*, 2000, vol. 12, pp. 1239–1251. DOI: [10.1105/tpc.12.7.1239](https://doi.org/10.1105/tpc.12.7.1239)
19. Holdaway-Clarke T.L., Hepler P.K. Control of Pollen Tube Growth: Role of Ion Gradients and Fluxes. *New Phytologist*, 2003, vol. 159, iss. 3, pp. 539–563. DOI: [10.1046/j.1469-8137.2003.00847.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00847.x)
20. Justus C.D., Anderhang P., Goins J.L., Lazzaro M.D. Microtubules and Microfilaments Coordinate to Direct a Fountain Streaming Pattern in Elongating Conifer Pollen Tube Tips. *Planta*, 2004, vol. 219, iss. 1, pp. 103–109. DOI: [10.1007/s00425-003-1193-2](https://doi.org/10.1007/s00425-003-1193-2)
21. Malho R., Read N.D., Trewavas A.J., Pais M.S. Calcium Channel Activity during Pollen Tube Growth and Reorientation. *The Plant Cell*, 1995, vol. 7, pp. 1173–1184. DOI: [10.1105/tpc.7.8.1173](https://doi.org/10.1105/tpc.7.8.1173)
22. Mascarenhas J.P. Molecular Mechanisms of Pollen Tube Growth and Differentiation. *The Plant Cell*, 1993, vol. 5, pp. 1303–1314. DOI: [10.1105/tpc.5.10.1303](https://doi.org/10.1105/tpc.5.10.1303)
23. Messerli M.A., Robinson K.R. Ionic and Osmotic Disruptions of the Lily Pollen Tube Oscillator: Testing Proposed Models. *Planta*, 2003, vol. 217, iss. 1, pp. 147–157. DOI: [10.1007/s00425-003-0972-0](https://doi.org/10.1007/s00425-003-0972-0)
24. Moscatelli A., Cresti M. Pollen Germination and Pollen Tube Growth. *Current Trends in the Embryology of Angiosperms*. Ed. by S.S. Bhojwani, W.-Y. Soh. Dordrecht, Springer, 2001, pp. 33–65. DOI: [10.1007/978-94-017-1203-3_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1203-3_3)
25. Moutinho A., Love J., Trewavas A.J., Malhó R. Distribution of Calmodulin Protein and mRNA in Growing Pollen Tubes. *Sexual Plant Reproduction*, 1998, vol. 11, iss. 3, pp. 131–139. DOI: [10.1007/s004970050130](https://doi.org/10.1007/s004970050130)
26. Pappas C.S., Tarantilis P.A., Harizanis P.C., Polissiou M.G. New Method for Pollen Identification by FT-IR Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 57, iss. 1, pp. 23–27. DOI: [10.1366/000370203321165160](https://doi.org/10.1366/000370203321165160)
27. Parre E., Geitmann A. Pectin and the Role of the Physical Properties of the Cell Wall in Pollen Tube Growth of *Solanum chacoense*. *Planta*, 2005, vol. 220, iss. 4, pp. 582–592. DOI: [10.1007/s00425-004-1368-5](https://doi.org/10.1007/s00425-004-1368-5)
28. Parton R.M., Fisher-Parton S., Watahiki M.K., Trewavas A.J. Dynamics of the Apical Vesicle Accumulation and the Rate of Growth are Related in Individual Pollen Tubes. *Journal of Cell Science*, 2001, vol. 114, iss. 14, pp. 2685–2695.
29. Šamaj J., Baluška F., Voigt B., Schlicht M., Volkmann D., Menzel D. Endocytosis, Actin Cytoskeleton, and Signaling. *Plant Physiology*, 2004, vol. 135, pp. 1150–1161. DOI: [10.1104/pp.104.040683](https://doi.org/10.1104/pp.104.040683)

30. Southworth D. Pollen Exine Substructure. III. *Juniperus communis*. *Canadian Journal of Botany*, 1986, vol. 64, iss. 5, pp. 983–987. DOI: [10.1139/b86-132](https://doi.org/10.1139/b86-132)
31. Southworth D. Sperm and Generative Cell. *Current Trends in the Embryology of Angiosperms*. Ed. by S.S. Bhojwani, W.Y. Soh. Dordrecht, Springer, 2001, pp. 17–32. DOI: [10.1007/978-94-017-1203-3_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1203-3_2)
32. Sowa S., Connor K.F. Biochemical Changes during Pollen Germination Measured *in vivo* by Infrared Spectroscopy. *Plant Science*, 1995, vol. 105, iss. 1, pp. 23–30. DOI: [10.1016/0168-9452\(94\)04036-G](https://doi.org/10.1016/0168-9452(94)04036-G)
33. Surso M. Pollination and Pollen Germination in Common Juniper (*Juniperus communis*: Cupressaceae). *Arctic Environmental Research*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 162–174. DOI: [10.3897/issn2541-8416.2018.18.4.162](https://doi.org/10.3897/issn2541-8416.2018.18.4.162)
34. Takaso T., Owens J.N. Significance of Exine Shedding in Cupressaceae-Type Pollen. *Journal of Plant Research*, 2008, vol. 121, iss. 1, art. 83. DOI: [10.1007/s10265-007-0135-7](https://doi.org/10.1007/s10265-007-0135-7)
35. Vidali L., McKenna S.T., Hepler P.K. Actin Polymerization is Necessary for Pollen Tube Growth. *Molecular Biology of the Cell*, 2017, vol. 12, no. 8, pp. 2534–2545. DOI: [10.1091/mbc.12.8.2534](https://doi.org/10.1091/mbc.12.8.2534)
36. Wang B.-Y., Su J.-R., Fernando D.D., Yang Z.-H., Zhang Z.-J., Chen X.-M., Zhang Y.-P. Development of the Male Reproductive Structures in *Taxus yunnanensis*. *Plant Systematics and Evolution*, 2008, vol. 276, iss. 1–2, art. 51. DOI: [10.1007/s00606-008-0079-y](https://doi.org/10.1007/s00606-008-0079-y)
37. Wang Q., Lu L., Wu X., Li Y., Lin J. Boron Influences Pollen Germination and Pollen Tube Growth in *Picea meyeri*. *Tree Physiology*, 2003, vol. 23, iss. 5, pp. 345–351. DOI: [10.1093/treephys/23.5.345](https://doi.org/10.1093/treephys/23.5.345)
38. Wang X., Teng Y., Wang Q., Li X., Sheng X., Zheng M., Šamaj J., Baluška F., Lin J. Imaging of Dynamic Secretory Vesicles in Living Pollen Tubes of *Picea meyeri* Using Evanescent Wave Microscopy. *Plant Physiology*, 2006, vol. 141, pp. 1591–1603. DOI: [10.1104/pp.106.080168](https://doi.org/10.1104/pp.106.080168)
39. Wu X., Chen T., Zheng M., Chen Y., Teng N., Šamaj J., Baluška F., Lin J. Integrative Proteomic and Cytological Analysis of the Effects of Extracellular Ca²⁺ Influx on *Pinus bungeana* Pollen Tube Development. *Journal of Proteome Research*, 2008, vol. 7, pp. 4299–4312. DOI: [10.1021/pr800241u](https://doi.org/10.1021/pr800241u)
40. Zhang L., Hao H., Wang Q., Fang K., Hou Z., Lin J. The Localization of Rac GTPase in *Picea willsonii* Pollen Tubes Implies Roles in Tube Growth and the Movement of the Tube Nucleus and Sperm Cells. *Plant Science*, 2007, vol. 172, iss. 6, pp. 1210–1217. DOI: [10.1016/j.plantsci.2007.02.011](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2007.02.011)
41. Zimmermann B. Chemical Characterization and Identification of Pinaceae Pollen by Infrared Microspectroscopy. *Planta*, 2018, vol. 247, iss. 1, pp. 171–180. DOI: [10.1007/s00425-017-2774-9](https://doi.org/10.1007/s00425-017-2774-9)

GROWTH AND DEVELOPMENT OF POLLEN TUBES IN COMMON JUNIPER (*Juniperus communis*): THE ROLE OF THE TUBE CELL NUCLEUS

M.V. Surso¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

D.G. Chukhchin², Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

¹Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;

e-mail: surso@fciarctic.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: dimatsch@mail.ru

In this work we have tried to explain the functional value of the tube cell nucleus and its relationship with the structures of the pollen tube on the example of juniper. Juniper pollen tubes were studied *in vitro* by the methods of light microscopy (transmitted light, fluorescence) and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. A brief description of the growth and development processes of juniper pollen tubes is given. The experiments on the enzymatic destruction of the pollen tube wall revealed the relation between the generative nucleus and the protoplast associated with the tube cell nucleus. The generative nucleus is quite firmly connected with the protoplast of the tube cell nucleus by means of the surface tension of internal membranes. It was proven that the protoplast and the both nuclei save their integrity outside the tube body. That is, they retain their viability outside the tube body for some time after lysis the tube tip. However, both the generative nucleus and the tube cell nucleus cannot function independently outside the protoplast of the pollen tube. Microfibrils of the actin cytoskeleton are distributed irregularly inside the tube. Most of them are concentrated in the central part of the tube and associated with the tube cell nucleus and protoplast. Leucoplasts predominate in the composition of plastids. The majority of them are amyloplasts, the better part of which is concentrated around the tube cell nucleus and protoplast. Protoplast contains a large number of mitochondria. Lysosomes are distributed over the entire volume of the pollen tube more or less regularly. However, a significant part of lysosomes, especially in actively growing tubes, accumulates around the tube cell nucleus and near the tube tip. The use of deuterium as a marker allowed to establish the sequence of synthesis and localization of synthesized substances during the pollen tube growth. The increased deuterium content was observed in the zone of the protoplast associated with the tube cell nucleus. The obtained experimental data allowed to suggest that the tube cell nucleus likely controls the synthesis of organic substances and their distribution in the tube body. Probably, the tube cell nucleus promotes its polar growth and orients the growth of the tube tip *in vivo* in time and space.

For citation: Surso M.V., Chukhchin D.G. Growth and Development of Pollen Tubes in Common Juniper (*Juniperus communis*): The Role of the Tube Cell Nucleus. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-20-34

Funding: The study was carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project No. 18-04-00056. Pollen samples were collected during the expedition work within the framework of the research on the state assignment of the Russian Academy of Sciences (topic No. 0409-2019-0039), state registration No. AAAA-A18-118011690221-0.

Acknowledgments: This research was performed using the equipment of the Core Facility Center “Arktika” of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

Keywords: juniper, pollen tube, tube cell nucleus, infrared spectrometry, deuterium, enzymatic hydrolysis.

Поступила 05.06.19 / Received on June 5, 2019

УДК 631.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-35-50

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА СТРУКТУРУ ДРЕВОСТОЯ И НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ СОСНЯКОВ БРУСНИЧНЫХ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

Н.В. Геникова, канд. биол. наук, ст. научн. сотр.; *ResearcherID*: [M-2052-2013](https://orcid.org/0000-0001-6475-8396),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6475-8396>

В.А. Харитонов, научн. сотр.; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-0703-3473>

А.М. Крышень, д-р биол. наук, директор, ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [E-1898-2012](https://orcid.org/0000-0003-1964-2073), *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1964-2073>

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Респ. Карелия, Россия, 185910; e-mail: genikova@krc.karelia.ru, haritonov@krc.karelia.ru, kryshen@krc.karelia.ru

В статье приведены результаты изучения влияния последствий периодического внесения азотных (N) и комплексных (NPK) удобрений на структуру древесного яруса и напочвенного покрова. Объектами исследования послужили культуры сосны на бедных песчаных почвах в условиях сосняков брусничных (Карельский таежный район, средняя тайга). На момент обследования возраст культур составлял 53 года, последнее внесение удобрений было 30 лет назад. На каждой пробной площади проводилось геоботаническое описание, определялись таксационные характеристики древостоя, картировались растительные микрогруппировки. Внесение комплексного удобрения привело к увеличению средних значений диаметра и высоты культур сосны при более интенсивном изреживании древостоя по сравнению с контролем и вариантом опыта с внесением азотного удобрения. По общему количеству видов напочвенного покрова варианты опыта и контроль не различаются между собой. В то же время отмечены достоверные отличия в соотношении проективных покрытий мхов и лишайников. На всех участках с внесением удобрений обилие мхов более чем в 2 раза выше, чем лишайников, в то время как на контроле покрытие мхов практически не отличается от такового у лишайников, а местами даже ниже. Вероятно, это связано с реакцией зеленых мхов на повышенное содержание углерода и азота в верхних горизонтах почвы. Из таксационных характеристик древостоя только средний диаметр достоверно и однозначно связан со структурой напочвенного покрова: при большем значении среднего диаметра отмечается и большее проективное покрытие зеленых мхов. В целом четырехкратное (с периодом 5 лет) внесение минеральных удобрений в культурах сосны на песчаных почвах проявляется в структуре древесного яруса и напочвенного покрова даже через 30 лет после последнего внесения. На опытных участках увеличенное содержание азота и углерода наблюдается только в подстилке и подподстилочном горизонте почвы. Это объясняется тем, что азот в незначительных количествах закрепляется в фитоценозе и возвращается с опадом только в самые верхние почвенные горизонты, влияя на структуру мохово-лишайникового яруса и приводя к преобладанию зеленых мхов (*Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*) над кустистыми лишайниками рода *Cladonia* в напочвенном покрове.

Для цитирования: Геникова Н.В., Харитонов В.А., Крышень А.М. Влияние длительного периодического внесения удобрений на структуру древостоя и напочвенного покрова в условиях среднетаежных сосняков брусничных (Республика Карелия) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 35–50. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-35-50

Финансирование: Из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН).

Ключевые слова: минеральные удобрения, культуры сосны, напочвенный покров, видовой состав, песчаные почвы, Республика Карелия.

Введение

Повышение продуктивности лесов является одной из важнейших задач интенсификации лесного хозяйства [10]. Среди мероприятий, направленных на увеличение прироста древесины, приоритетное место длительное время отводилось внесению минеральных удобрений [16, 20, 21]. В научной литературе достаточно широко освещено влияние удобрений на рост основных древесных пород и качество древесины [14, 15, 17, 19, 22, 30, 33 и др.]. При этом минеральные удобрения не всегда оказывают достоверно положительное влияние на увеличение прироста в культурах [12], их применение вызывает вопросы как по силе, так и по характеру изменений в других элементах фитоценоза, в частности в напочвенном покрове [9, 23, 27, 28 и др.].

Исследование закономерностей формирования структуры напочвенного покрова в лесных сообществах имеет давнюю историю. Значительный вклад в решение проблемы внесли Н.В. Дылис [6], В.И. Василевич [3], В.С. Ипатов [7], В.Г. Карпов [8] и др. Ранее отмечалось [11], что в сообществах с упрощенным строением древесного яруса и бедным видовым составом значительно облегчается интерпретация результатов исследований по влиянию факторов (древесный ярус, микрорельеф и т. п.) на процессы формирования напочвенного покрова. Еще более точной интерпретации результатов можно достичь в многолетних экспериментах, где известна история формирования сообщества. Об одном из таких исследований писалось ранее [5]. Было показано, что влияние азотсодержащих удобрений на напочвенный покров проявляется как прямым образом (через увеличение плодородия почвы), так и опосредованно (через изменение характеристик древесного яруса).

Упомянутые выше и множество других публикаций преимущественно посвящены влиянию удобрений на рост деревьев и структуру сообщества непосредственно в годы их использования. Однако практически не изученным остается вопрос последствия удобрений через многие годы – как долго обнаруживается в экосистеме азот и как долго проявляется его действие на различные компоненты лесного сообщества.

Цель исследования – выявление различий в структуре сообществ экспериментальных культур сосны через 30 лет после интенсивного четырехкратного (с периодом 5 лет) внесения минеральных удобрений.

Объекты и методы исследования

Для изучения влияния различных видов минеральных удобрений на рост культур сосны (*Pinus sylvestris* L.) и формирование грибных сообществ под руководством В.И. Шубина в 1962 г. были заложены многолетние опыты на вырубке сосняка брусничного (состав древостоя 10С+Б, IV класс бонитета) в Нелгомозерском лесничестве Спасогубского лесхоза Карельской АССР (Ка-

рельский таежный район, средняя тайга). Почва – поверхностно-подзолистая песчаная на озерно-ледниковых песчаных отложениях. Данный тип почвы характеризуется низкой влагообеспеченностью, бедностью элементами питания, особенно азотом и калием. После рубки древостоя и последовавшего затем пожара сформировалось сообщество вересково-палового типа [13].

Культуры сосны создавались посевом в 1962 г. по полосам, подготовленным якорным покровосдирателем тяжелого типа. Ширина минерализованных полос – 0,8...1,2 м, расстояние между полосами – 1,5...2,2 м. Посев проводился сеялкой от плуга ПКЛ-70. Семена II класса сортности местного сбора высевались непрерывно, без четко выраженных посевных мест. Расход семян – 0,8 кг/га.

Опыт с внесением удобрений на пробных площадях (ПП) закладывался в 1969 г. на ровном участке в культурах сосны. Размер ПП составлял 0,05 га (контроль – без удобрения) и 0,25 га (опытные участки – с удобрением). Удобрение вносили в конце мая – начале июня в 1970 (перед первым внесением удобрений были вырублены крупные экземпляры березы), 1975, 1979 и 1985 гг. Схема опыта: N (азот), NPK (азот-фосфор-калий) и контроль (без удобрения). Дозы удобрений: в 1970 г. азот и калий – 60 кг действующего вещества / га, фосфор – 120 кг / га; в 1975 г. – по 60 кг / га каждого из элементов питания; с 1979 г. дозы увеличены в 2 раза, при этом опытные участки были разделены пополам и на них применены две формы азотных удобрений – мочевины и аммиачная селитра гранулированные. На всех участках использовались гранулированные суперфосфат и мочевины, а также хлористый калий. По поверхности почвы удобрения разбрасывались вручную [19].

Описание сообществ в целях изучения последствий удобрений на древостой и напочвенный покров проводилось в 2014 г., через 30 лет после последнего внесения удобрений. Таксация древостоя осуществлялась общепринятыми методами с проведением на ПП сплошного перечета деревьев по диаметрам и измерением высоты по ступеням толщины.

Для описания равномерности распределения деревьев на ПП от каждого дерева измерялось расстояние до 5 ближайших стволов, затем рассчитывался средний показатель для ПП.

Оценивалось проективное покрытие видов сосудистых растений, наземных мхов, лишайников и опада. Для выявления мозаичности напочвенного покрова ПП разделялись на учетные площадки размером 5×5 м, на которых проводилось картирование микрогруппировок напочвенного покрова по преобладанию мхов, лишайников и опада, а также обилия кустарничков. Границы контуров микрогруппировок определялись визуально, размеры микрогруппировок изменялись от 1 до 50 м² (рис. 1). Кроме того, на каждой учетной площадке измерялась толщина лесной подстилки в 5-кратной повторности методом конверта (по углам и в центре).

В масштабах ПП и учетной площадки для выявления связи обилия мхов, лишайников, кустарничков и опада с таксационными характеристиками древостоя осуществлялся корреляционный анализ с использованием непараметрического критерия Спирмена. Чтобы установить различия ПП по характеристикам напочвенного покрова, проводился дисперсионный анализ варьирования проективного покрытия кустарничков, мхов, лишайников и опада по данным учетных площадок с использованием непараметрического критерия Крускала–Уоллиса.

Расположение и картирование микрогруппировок приведено на рис. 1.

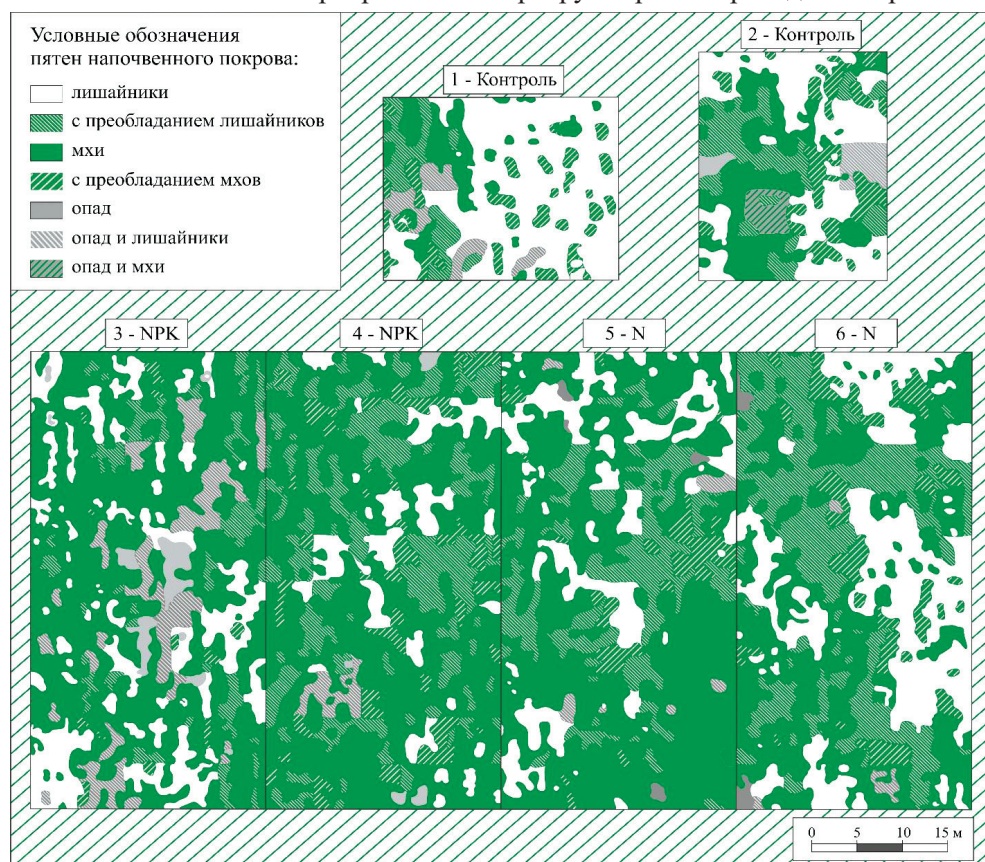


Рис. 1. Схема расположения и картирование микрогруппировок напочвенного покрова на каждой ПП

Fig. 1. Layout of the sample plots and mapping of the ground cover patches

Результаты исследования и их обсуждение

Структура древесного яруса. К 2014 г. на участке сформировалось сосновое насаждение (10С). В подросте единично встречались береза и ель, в подлеске – ива козья. Таксационные характеристики древостоя приведены в табл. 1.

Усыхание деревьев сосны на площадках в разные периоды эксперимента с внесением удобрений и после него не имеет четкой закономерности и вызвано различными причинами. До первого внесения удобрений часть саженцев погибла от поражения фацидиозом (*Phacidium infestans* Karst.), носящего очаговый характер [19]. Впоследствии снижение числа деревьев на единицу площади, возможно, было связано с внесением удобрений: минимальное (в среднем менее 2,5 тыс. шт./га) отмечено на участках с NPK, на контроле – превышало 3,0 тыс. шт./га, в варианте с азотом – более 4,5 тыс. шт./га. Тенденция продолжилась и после прекращения внесения удобрений. На момент учета в 2014 г. наибольшее число сухих стволов наблюдалось в вариантах с полным удобрением, при этом густота их уже была значительно ниже, чем в других вариантах. Полученные данные подтверждают гипотезу об обострении конкуренции среди деревьев при внесении удобрений.

Таблица 1

**Таксационная характеристика 53-летних культур сосны
на вересково-паловой вырубке (учет 2014 г.)**

ПП	Вариант опыта	Густота, тыс. шт. / га		Средние		Объем среднего дерева, м ³	Полнота, м ² / га	Запас, м ³ / га
		Живые	Сухие	диаметр, см	высота, м			
1	Контроль	2,76	0,38	9,5	10,6	0,041	19,5	112
2	Контроль	3,56	0,76	8,4	10,3	0,032	19,7	113
	<i>Среднее</i>	3,16	0,57	8,9	10,5	0,036	19,6	113
3	NPK	3,34	0,84	10,7	12,4	0,059	29,8	196
4	NPK	1,98	0,37	11,5	12,8	0,069	20,5	137
	<i>Среднее</i>	2,66	0,64	11,0	12,6	0,063	25,1	167
5	N	2,72	0,72	10,3	11,1	0,050	22,6	135
6	N	4,11	0,74	8,5	10,0	0,032	23,2	130
	<i>Среднее</i>	3,42	0,73	9,2	10,5	0,039	22,9	133

Кроме того, внесение комплексного удобрения повлияло и на распределение деревьев по диаметру. На контрольных участках преобладал тонкомер, почти 75 % всех деревьев относилось к двум нижним ступеням толщины. Улучшение минерального питания с внесением NPK обусловило увеличение прироста культур по диаметру и количества крупных деревьев (рис. 2).

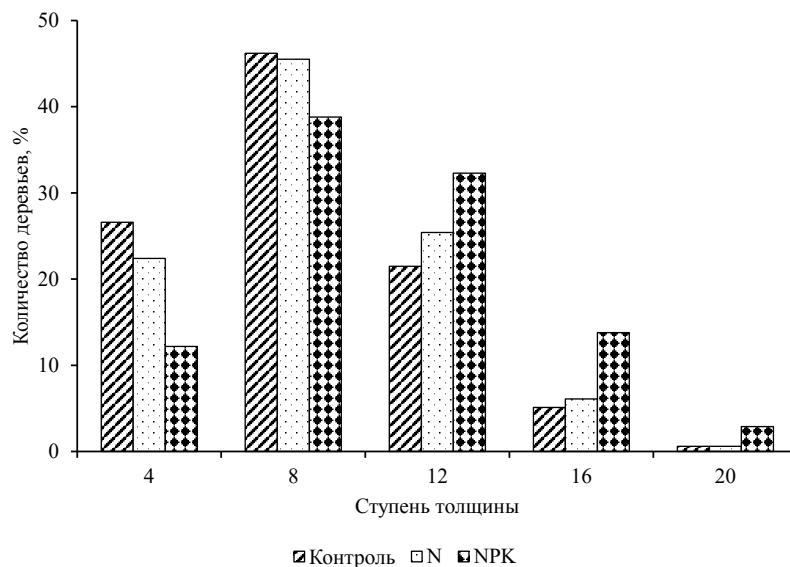


Рис. 2. Влияние удобрений на распределение по ступеням толщины 53-летних культур сосны, созданных посевом на песчаных почвах

Fig. 2. The effect of fertilizers on the diameter distribution of 53-year-old pine plantations planted by seedling-down on sandy soils

Таким образом, даже при меньшей густоте в варианте с NPK абсолютная полнота была максимальной и превосходила контроль на 28 %. По объему среднего дерева превышение составляло 75 %, по запасу древесины – 48 %. Внесение азота способствовало увеличению прироста древесины незначительно [15].

Внесение только азотных удобрений вызвало неоднозначную реакцию деревьев и сообщества в целом. В одном случае (ПП 5) все показатели сходны с таковыми на ПП с комплексным удобрением. При этом на ПП 6 средние показатели роста деревьев сосны сходны с контролем, а древостой в целом (полнота и запас) – с участками при внесении NPK и густоте, существенно превышающей этот показатель для остальных площадок. Очевидно, что в данном случае густота древостоя определила низкие средние показатели роста деревьев, но на вопрос, что стало причиной сохранения большого числа деревьев на ПП 5, к сожалению, нет прямого ответа. За более чем 50-летний период развития на лесное сообщество воздействовало множество факторов. Необходимо учитывать, что 40–60 лет – это период, когда в чистых сосняках часто наблюдается интенсивное самоизреживание древостоя. Кроме того, может иметь значение и то, что на бедных песчаных почвах чистый азот без фосфора и калия не эффективен [1]. Все это в комплексе с другими факторами могло определить продолжительность процесса самоизреживания древостоя или растянуть его во времени, поэтому необходимо выполнить повторный учет через 5–10 лет.

Независимость процесса изреживания (интенсивности отпада) древостоя от внесения удобрения в исследованный период подтверждается данными о распределении деревьев на ПП. Для этого были измерены расстояния от каждого дерева до 5 ближайших стволов (табл. 2).

Таблица 2

Среднее расстояние до 5 ближайших деревьев

Показатель	1 (контроль)	2 (контроль)	3 (NPK)	4 (NPK)	5 (N)	6 (N)
Среднее расстояние и ошибка среднего	1,83±0,03	1,62±0,02	1,62±0,01	2,11±0,03	1,65±0,02	1,48±0,01
Различия	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>d</i>

Примечание. Латинские буквы (*a* – *d*) показывают достоверные ($p < 0,05$) различия между ПП при варьировании среднего расстояния между деревьями, одинаковые – означают, что различий по этому признаку нет.

Для одного контрольного участка (ПП 1) и одного варианта опыта с комплексным удобрением (ПП 4) средние значения расстояний между деревьями были выше, чем среднее по всем пробным площадям – 1,7 м. Эти ПП имели небольшую густоту насаждений. Один вариант с азотным удобрением (ПП 6) характеризуется крайне высокой густотой насаждения (см. табл. 1) и, закономерно, самыми низкими значениями среднего расстояния между стволами. Проведенный дисперсионный анализ варьирования значений расстояния между стволами показал, что ПП статистически различаются по этому признаку.

Приведенное на рис. 3 соотношение деревьев, расположенных на определенном расстоянии друг от друга (с интервалом 1 м), показывает, что на всех ПП преимущественное расстояние до 5 ближайших деревьев составляет 1...2 м. На участках 1 (контроль), 4 (NPK) и 5 (N) шире диапазон варьирования расстояний между деревьями и нет абсолютного преобладания малых (менее 1 м) расстояний. При этом среднее расстояние между деревьями (табл. 2) согласуется с данными по густоте древостоя (см. табл. 1) и практически не связано с

распределением расстояний между деревьями (рис. 3), что свидетельствует о сложном характере конкурентных отношений, определяемых не только расстоянием между особями.

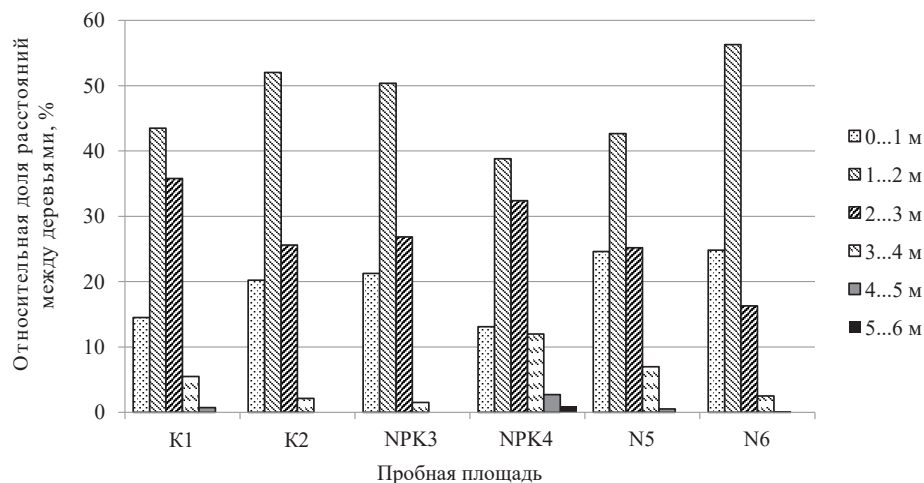


Рис. 3. Соотношение средних расстояний между стволами, %

Fig. 3. The ratio of average distances between the trees, %

Структура напочвенного покрова. Напочвенный покров исследованных опытных участков крайне беден, всего отмечено 6 видов травяно-кустарничкового яруса и по 4 вида мхов и лишайников (табл. 3).

Таблица 3

Видовой состав и проективное покрытие видов напочвенного покрова на ПП

Показатель	1 (контроль)	2 (контроль)	3 (NPK)	4 (NPK)	5 (N)	6 (N)
Общее проективное покрытие, %	95	90	90	90	90	90
Травяно-кустарничковый ярус, %	15	25	10	15	15	15
Мохово-лишайниковый ярус, %	95	90	90	90	90	90
Опад, %	10	20	15	15	15	15
<i>Травяно-кустарничковый ярус</i>						
Вереск обыкновенный (<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull)	5	5	2	5	5	7
Водяника черная (<i>Empetrum nigrum</i> L. s. l.)	+	+	0	0	+	+
Багульник обыкновенный (<i>Ledum palustre</i> L.)	0	0	0	0	+	0
Черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	+	5	+	+	2	1
Голубика обыкновенная (<i>Vaccinium uliginosum</i> L.)	0	0	0	0	0	+
Брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	10	15	8	10	5	7

Окончание табл. 3

Показатель	1 (контроль)	2 (контроль)	3 (NPK)	4 (NPK)	5 (N)	6 (N)
<i>Мохово-лишайниковый ярус</i>						
Цетрария исландская (<i>Cetraria islandica</i> (L.) Ach.)	+	+	+	+	+	5
Кладония лесная (<i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.)	20	15	2	3	5	10
Кладония оленья (<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) F. H. Wigg.)	40	25	10	10	10	15
Кладония звездчатая (<i>Cladonia stellaris</i> (Opiz) Pouz. et Vezda)	+	+	+	2	1	+
Дикранум многоножко- вый (<i>Dicranum polysetum</i> Sw.)	+	5	3	5	3	5
Дикранум метловидный (<i>Dicranum scoparium</i> Hedw.)	0	0	2	5	2	+
Плеурозиум Шребера (<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.)	35	45	75	70	70	55
Политрихум можжевель- никовый (<i>Polytrichum</i> <i>juniperinum</i> Hedw.)	+	0	0	0	0	+

Примечания: Знаком «+» отмечено проективное покрытие менее 1 %.

При обследовании ПП перед началом эксперимента с внесением удобрений (1970 г.) при возрасте культур сосны 8 лет в напочвенном покрове вследствие огневой обработки вырубки за год до создания лесных культур преобладали вереск (30 %) и политриховые мхи (50 %), реже встречались брусника, багульник, вороника и голубика [19]. Через 39 лет на всех ПП площадях увеличилось покрытие брусники (15...25 %) и снизилось покрытие вереска (10...25 %). Проективное покрытие кустистых лишайников (40...60 %) достигло и даже слегка превысило обилие политриховых мхов (30...50 %) [4]. Через 54 года после создания культур на всех ПП уже доминируют брусника (в среднем 10 %) и плеурозиум Шребера (в среднем 60 %), покрытие вереска составляет в среднем 5 %, политриховые мхи практически отсутствуют, что характерно для типичных сосняков брусничных.

В относительно более богатых условиях местообитаний на песчаных почвах в таежной зоне через 5–20 лет после внесения минеральных удобрений в напочвенном покрове увеличивается обилие злаков и, как следствие, уменьшается покрытие лесных кустарничков рода *Vaccinium* и зеленых мхов [2, 17, 25, 28, 32]. В описываемом нами эксперименте таких изменений в напочвенном покрове не наблюдается. Возможно, это связано с тем, что через 30 лет после последнего внесения удобрений превышение содержания углерода и азота примерно на 30...70 % по сравнению с контролем отмечается только в лесной подстилке и подподстилочном элювиальном горизонте удобренных участков.

Содержание указанных минеральных элементов в нижележащих почвенных горизонтах на опытных ПП не отличалось от контрольных [15].

Отсутствуют заметные различия по общему количеству видов и проективному покрытию опада и ярусов растительного покрова в целом. Различия есть только в соотношении проективных покрытий мхов и лишайников (рис. 4).

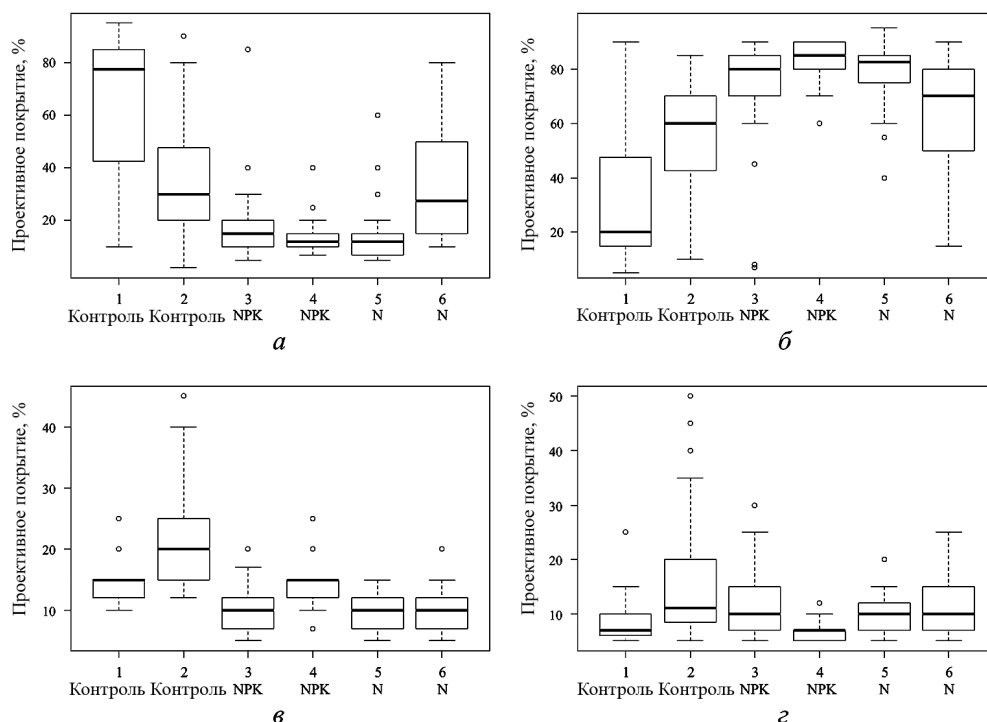


Рис. 4. Варьирование значений проективного покрытия кустистых лишайников (а), зеленых мхов (б), лесных кустарничков (в) и опада (г) по данным с учетных площадок 25 м²

Fig. 4. Variation in the values of the projective cover of fruticose lichens (а), true mosses (б), forest dwarf shrubs (в), and litter fall (г), based on the data of the registration sites of 25 m²

На всех опытных участках (3–6) обилие мхов в 2 раза и более превышает проективное покрытие лишайников в отличие от контрольных (1, 2), где покрытие мхов не намного выше лишайников (ПП 2) или лишайники преобладают в напочвенном покрове (ПП 1). Наиболее заметны эти различия на участках с внесением комплексного минерального удобрения и в одном повторе с азотным удобрением (ПП 3–5), где проективное покрытие мхов в 5 раз выше, чем у лишайников (75...80 и 13...16 % соответственно). Возможно, это связано с тем, что именно в верхних горизонтах (в лесной подстилке и подподстилочном элювиальном горизонте) отмечено повышенное содержание углерода и азота [15]. Основная масса корней сосудистых растений расположена в более глубоких слоях и заметно не реагирует на различия в содержании азота и углерода у поверхности почвы, что нельзя сказать о мхах и лишайниках, непосредственно соприкасающихся с измененными горизонтами. Наземные мхи по сравнению с сосудистыми растениями чувствительнее к содержанию азота [26, 31]. Интересно, что в работах по изучению влияния разных доз азотных удобрений на напочвенный покров [18, 24 и др.] показана статистически значимая отрицательная реакция мхов и кустистых лишайников даже на однократное внесе-

ние удобрений в дозе больше 100 кг / га по действующему веществу в течение вегетационного периода [29]. При дозах внесенного удобрения менее 100 кг/га обилие мхов (проективное покрытие и фитомасса) снижается, но в меньшей степени, однако уже через год начинается восстановление обилия мхов [9]. Возможно, внесением удобрений, а не только влиянием пожара, объясняется отсутствие зеленых мхов в предыдущих описаниях [4, 19]. За 30 лет концентрация внесенных минеральных элементов снизилась до уровней, обеспечивающих конкурентное преимущество зеленых мхов над лишайниками, а их преобладание на опытных пробных площадях можно считать последствием внесения азотных удобрений. Необходимо отметить, что на момент обследования ПП в 2014 г. повышенное содержание общего азота в подстилке и сразу под ней поддерживалось, вероятно, за счет азота, зафиксированного в надземной фитомассе деревьев и возвращающегося в почву с опадом.

Кластерный анализ данных по проективному покрытию видов напочвенного покрова на основе коэффициента Сьеренсена (метод Варда) подтвердил разделение ПП на две группы (рис. 5).

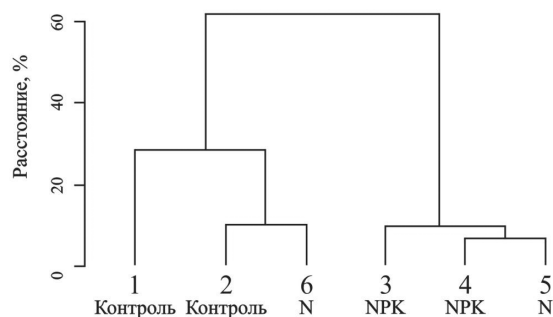


Рис. 5. Дендрограмма сходства напочвенного покрова пробных участков по коэффициенту Сьеренсена

Fig. 5. Similarity dendrogram of sample plots ground cover according to Sørensen-Dice coefficient

И если при сопоставлении комплексного удобрения (NPK) и контроля достаточно четко видны расхождения в структуре напочвенного покрова, то в случае с чистым азотом закономерности нет. В первую группу (контроль и один вариант с азотом) вошли пробные площади с высоким проективным покрытием кустистых лишайников в напочвенном покрове, во вторую группу (NPK и одна пробная площадь с азотом) – с высоким обилием зеленых мхов. Возвращаясь к влиянию удобрений на древостой, отмечаем, что на участках с применением удобрений выявлены наибольшие значения абсолютной и относительной полноты древостоя по сравнению с контролем. При этом коэффициент корреляции значений абсолютной полноты с проективным покрытием наземных лишайников на пробных участках отрицательный ($r = -0,77$), с обилием мхов – положительный ($r = 0,60$). Эти значения корреляции статистически не значимы, так как в анализе участвовало всего 6 пробных участков – (для $n = 6$ при $p \leq 0,05$ критическое значение коэффициента $r = 0,85$). Но в данном случае важны не значения, а знак коэффициента корреляции.

Нами предпринята попытка оценить влияние древостоя на напочвенный покров с помощью корреляционного анализа на учетных площадках размером 5×5 м². Определялись связи таксационных показателей древостоя (сумма площадей поперечных сечений, количество и средний диаметр деревьев) со средним проективным покрытием зеленых мхов, кустистых лишайников, кустарничков, опада и толщиной лесной подстилки (табл. 4).

Таблица 4

Влияние древостоя на показатели структуры напочвенного покрова

Показатель	Площадь поперечного сечения	Количество деревьев	Средний диаметр деревьев
Проективное покрытие, %: зеленых мхов*	0,06 (p = 0,36)	-0,18 (p = 0,00)	0,37 (p = 0,00)
лишайников	-0,14 (p = 0,03)	0,09 (p = 0,17)	-0,32 (p = 0,00)
кустарничков	-0,16 (p = 0,01)	-0,24 (p = 0,00)	0,14 (p = 0,04)
опада	0,23 (p = 0,00)	0,31 (p = 0,00)	-0,13 (p = 0,04)
Толщина лесной подстилки, см	0,37 (p = 0,00)	0,27 (p = 0,00)	0,11 (p = 0,07)

Примечание: В скобках после коэффициента корреляции указан уровень значимости (p); жирным шрифтом выделены значения коэффициента корреляции при уровне значимости меньше 0,05.

Использование данных с нескольких учетных площадок повышает достоверность полученных коэффициентов, позволяет учесть варьирование таксационных показателей и неравномерность расположения деревьев на ПП.

На исследованных ПП выявлено статистически значимое увеличение толщины лесных подстилок при внесении минеральных удобрений по сравнению с контрольным вариантом. Эту связь можно считать опосредованной через древостой, так как средняя толщина лесной подстилки положительно коррелирует с такими характеристиками древостоя, как площадь поперечного сечения и количество деревьев.

Результаты корреляционного анализа (табл. 4) показывают, что проективное покрытие зеленых мхов слабо связано с количеством деревьев на учетных площадках ($r = -0,18$) и никак не связано с площадью поперечных сечений всех деревьев на площадке. Более важным фактором, влияющим на обилие мхов, является средний диаметр деревьев ($r = 0,37$). Даже на ПП 4, которая характеризуется наименьшей густотой древостоя и низкими (наравне с контрольными площадками) показателями относительной и абсолютной полноты, но наибольшим значением среднего диаметра деревьев среди всех ПП, обилие мхов наибольшее. Эти данные согласуются с результатами кластерного анализа (рис. 5), где ПП 4 входит в одну группу с ПП 3 и 5, а объединяет их большое обилие зеленых мхов, низкое проективное покрытие лишайников и высокие значения среднего диаметра деревьев. Высокое отрицательное значение коэффициента корреляции ($r = -0,86$; $p = 0,00$) обилия зеленых мхов и наземных лишайников объясняется пространственным исключением, мхи при этом получают конкурентные преимущества в более богатых условиях. Кроме того, проективное покрытие опада отрицательно связано с диаметром деревьев на учетной площадке ($r = -0,29$; $p = 0,04$) и положительно с количеством деревьев ($r = 0,31$; $p = 0,00$). В свою очередь опад отрицательно влияет на проективное покрытие мхов ($r = -0,33$; $p = 0,00$) и никак не связан с обилием наземных лишайников ($r = 0,01$; $p = 0,9$), т. е. на учетных площадках с большой густотой древостоя и / или низкими значениями диаметра деревьев наблюдается относительно высокое проективное покрытие опада и, следовательно, низкое покрытие зеле-

ных мхов. Однако данные связи, учитывая низкие и средние по силе значения корреляции таксационных характеристик древостоя, проективного покрытия опада и мхов, только частично объясняют варьирование мхов на обследованных ПП.

Также стоит отметить широкий диапазон варьирования проективного покрытия мхов и лишайников на ПП 1, 2 (контроль) и 6 (вариант с азотным удобрением), что указывает на большую мозаичность напочвенного покрова. Это иллюстрирует схема картирования растительных микрогруппировок (см. рис. 1).

Заключение

Четырехкратное (с периодом в 5 лет) внесение минеральных удобрений в культурах сосны на песчаных почвах проявляется в структуре древесного яруса и напочвенного покрова даже через 30 лет после последнего внесения. На опытных участках увеличенное содержание азота и углерода обеспечивается более интенсивным опадом и закрепляется в подстилке и подподстилочном горизонте почвы. При этом различия в концентрации питательных веществ не затрагивают более глубокие слои, где расположена основная масса корней сосудистых растений, и, видимо, поэтому не сказываются на их покрытии. В то же время мхи и лишайники достоверно реагируют на различия в структуре древесного яруса удобренных и контрольных участков. Не исключено, что это влияние опосредовано – через изменения в лесной подстилке. В целом в вариантах опыта с внесением азотных и комплексных удобрений по сравнению с контрольными участками древесный ярус, накопив азот и другие элементы минерального питания, вызвал через опад повышенное содержание азота и углерода в верхних горизонтах почвы и определил заметное преобладание зеленых мхов (*Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*) над кустистыми лишайниками рода *Cladonia*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антропогенные леса Восточной Фенноскандии: целевое назначение, динамика и ресурсный потенциал: отчет о НИР / ВНИИЦентр; рук. А.И. Соколов. № ГР 01201353234; инв. № 02201352213. Петрозаводск, 2015. 147 с. [*Anthropogenic Forests of Eastern Fennoscandia: Purpose, Dynamics and Resource Potential*. Research Report. Guided by A.I. Sokolov. Petrozavodsk, 2015. 147 p.].
2. Беляева Н.В., Грязькин А.В., Ковалев Н.В., Фетисова А.А., Казы И.А. Сравнительная оценка структуры живого напочвенного покрова после рубок ухода и комплексного ухода за лесом в сосняках брусничных // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 6. С. 193–199. [Beliaeva N.V., Gryazkin A.V., Kovalev N.V., Fetisova A.A., Kasi I.A. The Comparative Estimation of Natural Solid Cover after Improvement Cutting and Complex Care in Cowberry Pine Forest. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 6, pp. 193–199].
3. Василевич В.И. Очерки теоретической фитоценологии. Л.: Наука, 1983. 247 с. [Vasilevich V.I. *Essays in Theoretical Phytocenology*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 247 p.].
4. Гаврилова О.И., Кущенко И.Т. Влияние минеральных удобрений на рост культур сосны обыкновенной на песчаных почвах южной Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 6. С. 7–15. [Gavrilova O.I., Kishchenko I.T. Influence of Mineral Fertilizers on Scots Pine Growth on South Karelia Sand Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal],

2003, no. 6, pp. 7–15]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/39c/39c4fd9e098303207e6431b88d82373b.pdf>

5. Геникова Н.В., Харитонов В.А. Последствие многолетнего внесения минеральных удобрений на видовой состав и структуру напочвенного покрова в культурах сосны на песчаных почвах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 1. С. 18–28. [Genikova N.V., Kharitonov V.A. The Aftereffects of Long-Term Mineral Fertilization on the Species Composition and the Ground Cover Structure of Pine Crops on Sandy Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 18–28]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.1.18](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.18). URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/97d/18_28.pdf

6. Дылис Н.В. Основы биогеоценологии. М.: Изд-во МГУ, 1978. 152 с. [Dylis N.V. *The Basics of Biogeocenology*. Moscow, MGU Publ., 1978. 152 p.]

7. Ипатов В.С. Некоторые вопросы теории организации растительного покрова // Ботан. журн. 1970. Т. 55, № 2. С. 184–195. [Ipatov V.S. Certain Problems Pertaining to the Theory of Organization in the Vegetational Cover. *Botanicheskii Zhurnal*, 1970, vol. 55, no. 2, pp. 184–195].

8. Карпов В.Г. Экспериментальная фитоценология темнохвойной тайги. Л.: Наука, 1969. 336 с. [Karpov V.G. *Experimental Phytocenology of Dark Coniferous Taiga*. Leningrad, Nauka Publ., 1969. 336 p.]

9. Ковалева Н.М., Собакин Р.С. Влияние азотного удобрения на формирование нижних ярусов в сосняках Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2016. № 1. С. 25–33. [Kovaleva N.M., Sobachkin R.S. The Effect of Nitrogen Fertilizer on the Development of Lower Stories of Pine Forests in Krasnoyarsk. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2016, no. 1, pp. 25–33].

10. Концепция интенсивного использования и воспроизводства лесов. СПб.: СПбНИИЛХ, 2015. 16 с. [*The Concept of Intensive Use and Regeneration of Forests*. Saint Petersburg, SPbNIIHL Publ., 2015. 16 p.]

11. Крышень А.М. К методике изучения фитогенных полей деревьев // Ботан. журн. 1998. Т. 83, № 10. С. 133–142. [Kryshen A.M. On the Methods of Tree Phytogenic Fields Study. *Botanicheskii Zhurnal*, 1998, vol. 83, no. 10, pp. 133–142].

12. Кузьмин И.А. Применение удобрений и гербицидов в культурах сосны на супесчаных почвах // Повышение эффективности лесовосстановительных мероприятий на Севере. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. С. 88–92. [Kuz'min I.A. Application of Fertilizers and Herbicides in Pine Plantations on Sandy Loam Soils. *Improving the Efficiency of Reforestation in the North*. Petrozavodsk, Karel'skiy filial AN SSSR Publ., 1977, pp. 88–92].

13. Ронконен Н.И. Вырубки и естественное лесовозобновление на них // Лесовосстановление в Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1975. С. 36–65. [Ronkonen N.I. Fellings and Their Natural Reforestation. *Reforestation in the Karelian ASSR and Murmansk Region*. Petrozavodsk, Karel'skiy filial AN SSSR Publ., 1975, pp. 36–65].

14. Соколов А.И., Пеккоев А.Н., Неронова Я.А., Харитонов В.А. Влияние удобрений на рост *Pinus sylvestris* (Pinaceae) на гарях // Растительные ресурсы. 2018. Т. 54, № 2. С. 235–245. [Sokolov A.I., Pekkoiev A.N., Neronova Ya.A., Kharitonov V.A. Fertilization Effects on *Pinus Sylvestris* (Pinaceae) Growth on the Burnt Areas. *Rastitelnye Resursy*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 235–245].

15. Солодовников А.Н., Федорец Н.Г., Соколов А.И. Последствие минеральных удобрений на свойства почв и продуктивность насаждений в долгосрочном эксперименте в среднетаежной подзоне Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2017. № 5. С. 45–51. [Solodovnikov A.N., Fedorets N.G., Sokolov A.I. Mineral Fertilizers' After-Effect on Soil Properties and Stand Productivity in a Long-Term Experiment in Karelian Middle Taiga. *Trudy KarNC RAN* [Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences], 2017, no. 5, pp. 45–51]. DOI: [10.17076/eb490](https://doi.org/10.17076/eb490)

16. Степаненко И.И. Повышение продуктивности сосновых насаждений в результате внесения минеральных удобрений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2005. № 4. С. 61–69. [Stepanenko I.I. Increasing Productivity of Pine Stands by Mineral Fertilizers Application. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2005, no. 4, pp. 61–69]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/dd5/dd587c7ae966221659e1543c8dee6188.pdf>
17. Степаненко И.И. Изменения в живом напочвенном покрове в опытах с минеральными удобрениями в разных типах леса // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2006. № 6. С. 4–12. [Stepanenko I.I. The Changes on Plant Community for Experiments with Mineral Fertilizers in Pine Stands of Different Forest Types. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2006, no. 6, pp. 4–12].
18. Шапченкова О.А., Ковалева Н.М., Иванов В.В., Собакин Р.С., Собакин Д.С., Петренко А.Е. Влияние азотных удобрений на свойства подстилки и живой напочвенный покров в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 1. С. 44–51. [Shapchenkova O.A., Kovaleva N.M., Ivanov V.V., Sobachkin R.S., Sobachkin D.S., Petrenko A.E. Effect of Nitrogen Fertilizers on the Ground Cover and the Properties of a Forest Floor in Pine Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 1, pp. 44–51].
19. Шубин В.И., Гелес И.С., Крутов В.И., Морозова Р.М., Соколов А.И. Повышение производительности культур сосны и ели на вырубках. Петрозаводск: Карел. НЦ АН СССР, 1991. 172 с. [Shubin V.I., Geles I.S., Krutov V.I., Morozova R.M., Sokolov A.I. *Productivity Improvement of Pine and Spruce Plantations in Fellings*. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr AN SSSR Publ., 1991. 172 p.].
20. Шумаков В.С. Достижения и проблемы применения минеральных удобрений в лесном хозяйстве СССР // Агрохимия. 1972. № 7. С. 145–153. [Shumakov V.S. Achievements and Problems of Mineral Fertilizers Application in Forestry of the USSR. *Agrokhimiya*, 1972, no. 7, pp. 145–153].
21. Шутов И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А., Полянский Е.В., Бельков В.П., Гладков Е.Г., Головчанский И.Н., Рябинин Б.Н., Морозов В.А., Шиманский П.С. Лесные плантации (Ускоренное выращивание ели и сосны). М.: Лесн. пром-сть, 1984. 248 с. [Shutov I.V., Maslakov E.L., Markova I.A., Polyanskiy E.V., Bel'kov V.P., Gladkov E.G., Golovchanskiy I.N., Ryabinin B.N., Morozov V.A., Shimanskiy P.S. *Forest Plantations (Fast Growing of Spruce and Pine)*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 248 p.].
22. Bergh J., Nilsson U., Allen H. L., Johansson U., Fahlvik N. Long-Term Responses of Scots Pine and Norway Spruce Stands in Sweden to Repeated Fertilization and Thinning. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 320, pp. 118–128. DOI: [10.1016 / j. foreco. 2014.02.016](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.016)
23. Boonstra R., Krebs C.J., Cowcill K. Responses of Key Understory Plants in the Boreal Forests of Western North America to Natural versus Anthropogenic Nitrogen Levels. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 401, pp. 45–54. DOI: [10.1016 / j. foreco. 2017.06.065](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.065)
24. Kellner O., Märshagen M. Effects of Irrigation and Fertilization on the Ground Vegetation in a 130-Year-Old Stand of Scots Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, vol. 21(5), pp. 733–738. DOI: [10.1139 / x91-104](https://doi.org/10.1139/x91-104)
25. Kellner O., Redbo-Torstensson P. Effects of Elevated Nitrogen Deposition on the Field-Layer Vegetation in Coniferous Forests. *Ecological Bulletins*, 1995, no. 44, pp. 227–237.
26. Mäkipää R. Sensitivity of Forest-Floor Mosses in Boreal Forests to Nitrogen and Sulphur Deposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, vol. 85, iss. 3, pp. 1239–1244. DOI: [10.1007 / BF00477151](https://doi.org/10.1007/BF00477151)
27. Mälikönen E., Aro-Heinilä V., Kellomäki S. Lannoituksen ja kastelun vaikutus männikön pintakasvillisuuteen [Effect of Fertilization and Irrigation on the Ground Vegetation of a Scots Pine Stand]. *Silva Fennica*, 1982, vol. 16, iss. 1, pp. 27–42. DOI: [10.14214 / sf. a15072](https://doi.org/10.14214/sf.a15072)

28. Manninen O., Stark S., Kytöviita M., Lampinen L., Tolvanen A. Understorey Plant and Soil Responses to Disturbance and Increased Nitrogen in Boreal Forests. *Journal of Vegetation Science*, 2009, vol. 20, iss. 2, pp. 311–322. DOI: [10.1111/j.1654-1103.2009.05529.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.05529.x)
29. Olsson B.A., Kellner O. Long-Term Effects of Nitrogen Fertilization on Ground Vegetation in Coniferous Forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 237, iss. 1–3, pp. 458–470. DOI: [10.1016/j.foreco.2006.09.068](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.068)
30. Rowe E.C., Healey J.R., Edwards-Jones G., Hills J., Howells M., Jones D.L. Fertilizer Application during Primary Succession Changes the Structure of Plant and Herbivore Communities. *Biological Conservation*, 2006, vol. 131, iss. 4, pp. 510–522. DOI: [10.1016/j.biocon.2006.02.023](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.02.023)
31. Strengbom J., Nordin A. Commercial Forest Fertilization Causes Long-Term Residual Effects in Ground Vegetation of Boreal Forests. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 256, iss. 12, pp. 2175–2181. DOI: [10.1016/j.foreco.2008.08.009](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.009)
32. Strengbom J., Nordin A., Näsholm T., Ericson L. Slow Recovery of Boreal Forest Ecosystem Following Decreased Nitrogen Input. *Functional Ecology*, 2001, vol. 15, iss. 4, pp. 451–457. DOI: [10.1046/j.0269-8463.2001.00538.x](https://doi.org/10.1046/j.0269-8463.2001.00538.x)
33. Sullivan T.P., Sullivan D.S. Old-Growth Characteristics 20 Years after Thinning and Repeated Fertilization of Lodgepole Pine Forest: Tree Growth, Structural Attributes, and Red-Backed Voles. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 391, pp. 207–220. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.02.021](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.021)

THE EFFECT OF LONG-TERM PERIODIC FERTILIZATION ON THE STRUCTURE OF THE STAND AND THE GROUND COVER IN THE COWBERRY PINE FORESTS OF MIDDLE TAIGA (REPUBLIC OF KARELIA)

N.V. Genikova, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [M-2052-2013](https://orcid.org/0000-0001-6475-8396), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6475-8396>

V.A. Kharitonov, Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-3473>

A.M. Kryshen', Doctor of Biology, Director, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [E-1898-2012](https://orcid.org/0000-0003-1964-2073), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1964-2073>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation;
e-mail: genikova@krc.karelia.ru, haritonov@krc.karelia.ru, kryshen@krc.karlia.ru

The results of research on studying the influence of after-effects of periodic nitrogen (N) and complex fertilizer (NPK) treatments on the structure of the tree layer and ground cover are reported. The study objects were pine plantations growing on poor sandy soils in the cowberry pine forests (Karelian taiga district and middle taiga). At the time of survey, the plantations were 53 years old; fertilizers were last applied 30 years ago. A geobotanical relevé was carried out, stand valuation characteristics were determined, and microphytocoenoses were mapped at each sample plot. The NPK fertilization resulted in an increase in the average diameter and height of the pine plantations with more intensive thinning of the stand in comparison to the control and nitrogen fertilizer treatments. The fertilizer and control treatments are the same according to the total number of species in the ground cover. At the same time, significant differences were observed in the ratio of projective covers of mosses and lichens. In all fertilized plots, the abundance of mosses was twice or even more higher than the abundance of lichens, whereas the moss cover at the control site was almost the same as the lichen cover, and locally even lower. This pattern is probably associated with the response of true mosses to elevated carbon and nitrogen content in upper soil horizons. The only stand valuation

characteristic reliably and unambiguously correlating with the ground cover structure is the average diameter: the larger the value of the average diameter, the larger the projective cover of true mosses. Generally speaking, four-time mineral fertilization with 5 year intervals of pine plantations growing on sandy soils continue to exert an effect on the structure of the tree layer and ground cover even 30 years after the last treatment. In the fertilized sample plots, elevated nitrogen and carbon levels are observed only in the forest floor and the soil horizon directly underlying the floor. This is due to the fact that trace amounts of nitrogen are fixed in the phytocenosis and released back with litter fall only into the topmost soil horizons; influencing the structure of the moss-and-lichen layer towards the prevalence of true mosses (*Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*) over fruticose lichens of the genus *Cladonia* in the ground cover.

For citation: Genikova N.V., Kharitonov V.A., Kryshen' A.M. The Effect of Long-Term Periodic Fertilization on the Structure of the Stand and the Ground Cover in the Cowberry Pine Forests of Middle Taiga (Republic of Karelia). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 35–50. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-35-50

Funding: The research is federally funded within the framework of the state assignment of the KarRC RAS (Forest Research Institute).

Keywords: mineral fertilizers, pine plantations, ground cover, species composition, sandy soils.

Поступила 01.06.19 / Received on June 1, 2019

УДК 630*114.33

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-51-59

ЛЕСНЫЕ НАСАЖДЕНИЯ НА ОСУШЕННОМ ДНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

Н.Ж. Бакиров¹, председатель комитета

А.Х. Хамзаев², д-р с.-х. наук, проф., директор

З.Б. Новицкий², д-р с.-х. наук, зав. лаб.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9280-9557>

¹Государственный комитет по лесному хозяйству Республики Узбекистан, ул. Катартал, д. 21, г. Ташкент, Республика Узбекистан, 100113; e-mail: forestry@urmon.uz

²Научно-исследовательский институт лесного хозяйства, п. Дархан, Ташкентский р-н, Ташкентская обл., Республика Узбекистан, 111104; e-mail: markaz@urmon.uz, zinoviy.novitskiy@mail.ru

Приведены сведения о современном состоянии осушенного дна Аральского моря. Отмечается, что до 1966 г. реки Амударья и Сырдарья сбрасывали в море 55...60 км³ воды. Воды Сырдарьи перестали поступать в открытую акваторию моря с 1973 г., Амударьи – с 1986 г. Это привело к тому, что площадь осушенного дна сегодня составляет около 6 млн га, на которой необходимо провести лесомелиоративные работы для закрепления этих земель и не допущения возникновения дефляционных процессов. Целью работы являлось выделение типов донных отложений по степени их лесопригодности и с учетом гранулометрического и химического состава, а также подбор древесно-кустарниковых растений для лесомелиоративного освоения осушенного дна. Исследования проводились с 2006 по 2019 г. С учетом гранулометрического состава выделено 3 категории почвогрунтов: первая – песчаные и супесчаные почвы; вторая – подвижные пески; третья – соленые пустоши. Установлена роль лесных насаждений в уменьшении дефляционных процессов: скорость ветра в 1-летнем саксаулово-черкезовом насаждении снижается на 20,5 %, в 2-летнем – на 34,6 %, в 5-летнем – на 87,4 %. Под пологом 4–5-летних лесных насаждений появляется естественная травянистая растительность, что приводит к резкому снижению скорости ветра и, соответственно, к прекращению дефляции почв. Определено, что лесные насаждения уменьшают выдувание соли, пыли и песка и способствуют экологическому оздоровлению территории. Под защитой лесных насаждений вынос из почвогрунта химических элементов (хлор, сера, кальций, магний, натрий) значительно ниже, чем с открытой поверхности. Результаты исследования широко используются организациями, занимающимися облесением осушенного дна Аральского моря, в частности лесхозами Республики Узбекистан, которыми уже создано около 400 тыс. га лесных насаждений. Таким образом, проведение широкомасштабных лесомелиоративных работ на осушенном дне Аральского моря позволит укрепить его и тем самым свести к минимуму возникновение дефляционных процессов, т. е. улучшить экологическую ситуацию в Центрально-Азиатском регионе.

Для цитирования: Бакиров Н.Ж., Хамзаев А.Х., Новицкий З.Б. Лесные насаждения на осушенном дне Аральского моря // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 51–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-51-59

Ключевые слова: дефляция почв, лесные насаждения, осушенное дно, Аральское море, лесомелиорация, ветер, рельеф, подбор ассортимента растительности, мелиоративная эффективность.

Введение

Аральское море начало высыхать со второй половины 60-х гг. XX в. Сейчас площадь осушенного дна составляет около 6 млн га, с которой ежегодно в воздух поднимается более 150 млн т соли, пыли и песка. Ранее Аральское море являлось одним из самых больших озер на Земле и занимало 4-е место после Каспийского моря, озер Верхнее (Северная Америка) и Виктория (Африка). До 1966 г. реки Амударья и Сырдарья сбрасывали в море 55...60 км³ воды в год, вокруг имелось 70 озер, обрамленных зарослями камыша и тугаями [14]. Воды Сырдарьи перестали поступать в открытую акваторию Аральского моря с 1973 г., Амударьи – с 1986 г. Море стало резко высыхать. Это привело к тому, что образовался новый вид ландшафта – пустыня Аралкум, из которой соли уносятся на расстояние до 1000 км и выпадают в виде соленых дождей и снега. Около 300 дн. в год по региону гуляют солено-песчаные бури. Преимущественно это мелкодисперсная соленая пыль, убивающая все живое на своем пути. Уже сегодня из-под воды освобождаются все более и более засоленные почвогрунты, а концентрация солей в воде оставшейся западной части моря значительно увеличивается. Воздух в Приаралье насыщен ядовитой солью и пылью, что является важным фактором, обуславливающим климатическое развитие опустынивания. Смягчить экологическую напряженность в Приаралье можно с помощью лесных насаждений из засухоустойчивых пустынных растений, которые на осушенном дне моря должны стать основным климаторегулирующим звеном. В мировой практике опыт по созданию лесных насаждений на бывшем дне моря отсутствует [1].

Цель исследования – выделение типов донных отложений по степени их лесопригодности (лесопригодными считаются почвогрунты со степенью засоления по хлору не выше 0,04 %), подбор ассортимента древесно-кустарниковой растительности для лесомелиоративного освоения и установление роли лесных насаждений в снижении дефляционных процессов почвогрунтов с определением их мелиоративной эффективности.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на осушенном дне Аральского моря с применением искусственно создаваемых защитных лесных насаждений из сеянцев рядовыми посадками, выращенных в лесопитомнике Муйнакского лесхоза. Для размещения древесных растений при создании лесных насаждений использовались методы, ранее применяемые в пустынях, с учетом рельефа местности. Скорость ветра измерялась анемометром, количество переметаемого песка учитывалось с помощью пескоулавливателей [14]. Чертами, отличающими изучаемую территорию – осушенное дно Аральского моря, от пустынь, являются близкий уровень залегания соленых грунтовых вод (засоление почвогрунта) и сложность строения ее профиля, общей для них чертой – засушливость климата. Почвы осушенного дна практически лишены гумуса, бедны и по строению профиля не однородны [10].

Осушенное дно представлено почвогрунтами разного механического состава: от легкого до тяжелого. Наш подход к освоению осушенного дна сводился к дифференциации почвогрунтов по степени их лесомелиоративного освое-

ния. На основании данных механического анализа было выделено 3 категории почвогрунтов, которые служили объектами исследований:

в первую категорию входят почвогрунты, освоение которых возможно при предварительной их обработке сельскохозяйственными орудиями;

во вторую – почвогрунты, освоение которых возможно только при предварительной фиксации рельефа (подвижные пески);

в третью – почвогрунты, не пригодные для лесовыращивания (солончаки, соленые пустоши).

Лесные насаждения на равнинной местности создавались в разрезе научной тематики НИИЛХ в 1985–2010 гг. под руководством академика РАЕН З.Б. Новицкого путем посадки семян с помощью лесопосадочного агрегата ЛПА, на бугристых песках и барханах ее проводили вручную под меч Колесова [8].

После изучения химического и гранулометрического состава почвогрунтов, а также требовательности древесных растений к почвенным показателям, на осушенном дне проводились лесомелиоративные работы с использованием следующих древесно-кустарниковых растений: саксаул черный, черкез Рихтера, соляноколосник, сарсазан, тамарикс Карелина, селитрянки, кандым голова Медузы.

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении исследований установлено, что лесные насаждения играют важную роль в уменьшении возникновения дефляционных процессов. Скорость ветра в 1-летнем саксаулово-черкезовом насаждении снижалась на 20,5 %, в 2-летнем – на 34,6 %, в 5-летнем – на 87,4 %. Под пологом 4–5-летних лесных насаждений уже появляются естественная травянистая растительность и самосев от материнского насаждения в количестве 3...4 шт./м². Это приводит к резкому уменьшению скорости ветра и, соответственно, к прекращению дефляции почв. С достижением насаждениями 7-летнего возраста скорость ветра снижается до нуля. Исследования, проведенные в лесных насаждениях на подвижных песках, показали, что аккумуляция песка у древесных пород зависит от их структуры. Так, 7-летний куст саксаула черного высотой 265 см и диаметром кроны 320 см аккумулирует вокруг себя 10,61 м³ песка и засыпается песком на 28 % высоты; черкез Рихтера в этом же возрасте, достигший высоты 220 см, при диаметре кроны 260 см – соответственно 5,6 м³ и 23 %; кандым голова Медузы высотой 110 см и диаметром кроны 210 см – соответственно 6,9 м³ и 55 % [3].

В ходе эксперимента выявлено, что растения консервируют поверхность песка, бронируя его опадом и скрепляя частички песка гумусом. Консервирующая способность зависит от его аккумулялирующей способности, а также от количества опада, производимого им и скапливающегося у его подножья. Преимущество принадлежит саксаулу черному [11].

Следующим после ветра рельефообразующим фактором является растительность [4, 9], которая играет активную роль в процессах перехода подвижных эоловых форм рельефа в полуподвижные или заросшие. Растительность не только снижает скорость ветра вблизи поверхности песка, но и ее корневая система, скрепляя песок, усиливает его устойчивость против разрушающего воздействия ветра. При уменьшении его скорости, песчинки выпадают из ве-

тропесчаного потока и накапливаются около растений. На ход дефляции влияют наземные и подземные части растений. Первые создают ветровую тень, тормозящую воздушный поток. Даже на осушенном дне Аральского моря, где процент занятой растительностью не так уж велик, ветровые струи, обтекая кроны растений и пробиваясь сквозь них, теряют скорость. Это снижает интенсивность дефляции [2].

Установлено, что лесные насаждения уменьшают выдувание соли, пыли и песка и этим способствуют экологическому оздоровлению территории. Однако важно знать, какая связь существует между скоростью ветра, количеством переметаемого песка и его химическим составом. С этой целью учет переметаемого песка проводился в течение 100 ч при следующих градациях скорости ветра: 2...5; 6...10; 11...16 м/с. Наибольшее перемещение песка установлено на необлесенном бархане, наименьшее – в защитных лесных насаждениях. В 1-летних рядовых посадках, созданных на бархане вдоль механической защиты из камыша, вынос песка по сравнению с необлесенным барханом уменьшился на 10 %. Так, за 100 ч в летне-осенний период при скорости ветра 2...5; 6...10 и 11...16 м/с от необлесенного бархана переносится 226,5; 293,7 и 325,8 г/м² песка соответственно. Из середины 9-летних насаждений – соответственно 37,6; 84,5 и 108,6 г/м², что в 3–6 раз меньше, чем на необлесенной территории. Песок, переносимый за 100 ч при скорости ветра 11...16 м/с с бархана, закрепленного 1-летними посадками, содержит на 1 м² площади: хлора – 0,22; серы – 0,87; кальция – 0,26; магния – 0,17; натрия – 0,01 г (при сухом остатке 2,16 г, определенном путем водной вытяжки в лабораторных условиях). Песок, выносимый с середины лесных насаждений, содержит значительно меньше химических элементов: хлора – 0,08; серы – 0,33; кальция – 0,09; магния – 0,06; натрия – 0,005 г (при сухом остатке 0,81 г, определенном путем водной вытяжки в лабораторных условиях). Наибольший вынос химических элементов выявлен с необлесенного бархана. Таким образом, лесные насаждения закрепляют подвижные пески и предотвращают вынос вредных веществ [11].

Исследования показали, что наибольшее количество песчаных частиц накапливается под кронами кандыма голова Медузы, при этом прикустовой бугорок имеет высоту 130 см и диаметр 800 см, что позволяет в нем аккумулировать 277,8 кг различных солей (табл. 1).

Таблица 1

**Аккумуляция соли растениями-мелиорантами на песчаной равнине
осушенного дна Аральского моря**

Растение	Возраст, лет	Размер растения, см		Количество на 1 га, шт.	Размер прикустового бугорка, см		Количество соли, кг	
		по высоте	по диаметру кроны		по высоте	по диаметру	под кроной 1 растения	на 1 га
Саксаул черный (<i>Haloxylon aphyllum</i> Minkw.)	22–23	275±6,5	530±11,7	400	60±1,2	500±13,6	33,40	13 360,0
Черкез Рихтера (<i>Salsola Richteri</i> Karel.)	22–23	245±4,2	410±12,9	400	50±1,4	400±5,6	17,80	7 120,0

Окончание табл. 1

Растение	Возраст, лет	Размер растения, см		Количество на 1 га, шт.	Размер прикустового бугорка, см		Количество соли, кг	
		по высоте	по диаметру кроны		по высоте	по диаметру	под кроной 1 растения	на 1 га
Соляноколосник (<i>Halostachys</i> С.А.Мей. Эк. Schrenk)	8–9	85±2,1	155±4,5	500	30±0,9	150±3,2	2,20	1 100,0
Сарсазан (<i>Halocnemum</i> (Pall.) М. Биб.)	8–9	25±1,1	110±4,1	3956	35±0,7	111±2,8	2,80	11 076,8
Тамарикс Карелина (<i>Tamarix karelinii</i> Bunge)	8–9	240±3,7	430±4,3	500	120±2,1	400±11,4	63,72	318 60,0
Селитрянка (<i>Nitraria</i> L.)	8–9	230±7,6	170±5,3	500	60	150±4,6	3,0±1,1	1 500,0
Кандым голова Медузы (<i>Galligonum caput Meduase</i> Schrenk)	20–21	255±8,6	820±13,7	100	130	800±17,6	277,8±10,1	27 780,0

На осушенном дне Аральского моря изучалось расположение холмиков-кос и производились их замеры. Выявлено, что их размеры зависят от высоты, диаметра и ярусности насаждений, рельефа местности, силы и направления последнего ветра. К аккумуляции песка и созданию холмиков-кос не способны растения штамбовой формы (песчаная акация, верблюжья колючка и др.). Ветровая тень у основания побегов таких растений не образуется, т.е. холмики-косы не формируются.

Чем выше растение и больше диаметр приземной части его кроны, тем крупнее около него холмик-коса. У растений с более разреженной кроной эти холмики пологие. При этом, вершина находится тем дальше от центральной оси растения, чем ажурнее его крона [5]. У растений с плотной кроной вершина холмика-косы располагается внутри этой кроны [4]. В ходе исследований установлено, что у растений, ажурность кроны которых колебалась в пределах 0...70 %, вершина холмика-косы находилась между серединой холмика-косы и центральной осью растения. При ажурности, превышающей 70 %, вершина холмика-косы располагалась на его середине. Если на площади имеются не отдельные растения, а большие группы сильно сближенных растений, оседание песка происходит равномерно на всей площади ветровой тени и заметные холмики-косы отсутствуют. При большом количестве растений наблюдается общее повышение рельефа за счет осевшего песка.

На осушенном дне Аральского моря в основном преобладают ветры, дующие с моря на сушу [6]. Нередко бывают случаи, когда ветер дует параллельно урезу воды. При обследовании осушенного дна в районе Акпеткинского архипелага установлено, что вновь отложенные холмики-косы эфемерны, не постоянны, и разрушаются при перемене направления ветра или в случае гибели растения. Поэтому на осушенном дне холмики-косы меняют свою ориентацию, отражая направление последнего ветра. При этом размеры их меняются, так как ажурность одного и того же растения и диаметр его кроны оказываются

различными в разных направлениях. Данные исследования позволили выявить пескозадерживающую способность разных видов растений, что напрямую отражается на формировании рельефа в целом [7, 12].

Очень важно знать, как зарождаются дефляционные процессы на осушенном дне, ибо это имеет прямое отношение к состоянию экологии в регионе. Установлено, что количество почвогрунта, приводимое в движение ветром вблизи поверхности, зависит от его структурного состава и влажности, наличия растительных остатков, шероховатости поверхности, скорости ветра, возрастание которой приводит к отрыву частиц, что увеличивает насыщенность ветропесчаного потока. Плотность этого потока на разных высотах от поверхности земли различна и зависит от скорости ветра. По мере приближения к поверхности наблюдается более плотный поток частиц, на большие высоты песчаные частицы поднимаются только при очень сильном ветре [12, 16]. Исследования ветропесчаного потока на открытой части осушенного дна Аральского моря показали, что 85...90 % песка переносится в непосредственной близости от поверхности земли и лишь 10...15 % на высоте, как правило, не превышающей 30 см. Однако при увеличении скорости ветра до 12...15 м/с ветропесчаный поток переходит в верхние горизонты и тогда количество песчаных частиц на высоте 5...10 см составляет $(29 \pm 1,4) \%$, на высоте 10...15 см – $(26 \pm 0,6) \%$, на высоте 15...30 см – $(10 \pm 0,4) \%$ (табл. 2).

Таблица 2

Перенос песка в ветропесчаном потоке на открытой части песчаной равнины осушенного дна Аральского моря

Скорость ветра, м/с	Количество переносимого песка, %, при расстоянии от поверхности см			
	0...5	6...10	11...15	16...30
0...3	$63 \pm 2,4$	$28 \pm 1,1$	$6 \pm 0,5$	$3 \pm 0,2$
4...7	$56 \pm 2,2$	$30 \pm 1,3$	$9 \pm 0,7$	$5 \pm 0,3$
8...11	$48 \pm 1,8$	$34 \pm 1,2$	$11 \pm 0,4$	$7 \pm 0,3$
12...15	$35 \pm 1,5$	$29 \pm 1,4$	$26 \pm 0,6$	$10 \pm 0,4$

Необходимо отметить, что при возникновении песчаных бурь, часто происходящих на осушенном дне Аральского моря, воздух насыщается не песком, а песчаной пылью [15, 17].

Вывод

На основании результатов исследований можно утверждать, что проведение широкомасштабных лесомелиоративных работ на осушенном дне Аральского моря будет способствовать его закреплению, что сведет к минимуму дефляционные процессы и улучшит экологическую ситуацию в Центрально-Азиатском регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вилс Х., Новицкий З. Принципы лесомелиоративного освоения осушенного дна Аральского моря // Вестн. Жалалабад. гос. ун-та. 2006. № 1. С. 190–193. [Vilps Kh.,

Novitsky Z. Principles of Forest Reclamation Development of the Drained Bottom of the Aral Sea. *Vestnik Zhalal-Abadskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Jalal-Abad State University], 2006, no. 1, pp. 190–193].

2. Вилпс Х., Новицкий З. Лесомелиорация в решении проблемы Арала // Лесн. хоз-во. 2007. № 4. С. 41–42. [Vilps Kh., Novitsky Z. Forest Reclamation in Solving the Problem of the Aral Sea. *Lesnoye khozyaystvo*, 2007, no. 4, pp. 41–42].

3. Новицкий З.Б. Изучить мелиоративное влияние защитных лесных насаждений, созданных на разных типах донных отложений осушенного дна Аральского моря: отчет по проекту А-8-145. Ташкент, 2006. 49 с. [Novitsky Z.B. *To Study the Reclamation Effect of Protective Forest Plantations Created on Different Types of Bottom Sediments of the Drained Bottom of the Aral Sea*: Report on the Project A-8-145. Tashkent, 2006. 49 p.].

4. Новицкий З.Б. Аральский кризис и пути его решения методами лесомелиорации // Современные проблемы геоэкологии и сохранение биоразнообразия: сб. материалов II Междунар. конф. Бишкек, 2007. С. 287–290. [Novitsky Z.B. The Aral Sea Crisis and Ways of Solving It by the Forest Reclamation Methods. *Modern Problems of Geo-Ecology and Biodiversity Conservation: Proceedings of the 2nd International Conference*. Bishkek, 2007, pp. 287–290].

5. Новицкий З.Б. Рекомендации по размещению защитных лесных насаждений на осушенном дне Аральского моря. Ташкент: ФАН «Наука», 2008. 11 с. [Novitsky Z.B. *Recommendations on the Placement of Protective Forest Plantations on the Drained Bottom of the Aral Sea*. Tashkent, FAN “Nauka” Publ., 2008. 11 p.].

6. Новицкий З.Б. Лесомелиорация входит в комплекс мер, направленных на оздоровление экологической обстановки на осушенном дне Аральского моря // Узбек. эколог. вестн. 2017. № 4. С. 37–42. [Novitsky Z.B. Forest Reclamation is Part of a Set of Measures Aimed at Environmental Improvement on the Drained Bottom of the Aral Sea. *Uzbekskiy ekologicheskiy vestnik*, 2017, no. 4, pp. 37–42].

7. Новицкий З.Б. Облесение засоленных почвогрунтов на осушенном дне Арала // Сел. хоз-во Узбекистана. 2018. № 8. С. 33. [Novitsky Z.B. Afforestation of Saline Soils on the Drained Bottom of the Aral Sea. *Sel'skoye khozyaystvo Uzbekistana*, 2018, no. 8, p. 33].

8. Новицкий З.Б., Кокшарова Н.Е., Снигирев В.В. Рекомендации по созданию защитных насаждений на грунтах легкого механического состава осушенного дна Арала. Ташкент: Узинформагрупп, 1991. 38 с. [Novitsky Z.B., Koksharova N.E., Snigirev V.V. *Recommendations on the Creation of Protective Plantations on Light-Textured Soils of the Drained Bottom of the Aral Sea*. Tashkent, Uzinformagrupm Publ., 1991. 38 p.].

9. Новицкий З.Б., Устемиров К.Ж., Боровков А.В., Таирбергенов Ю.К. Лесомелиорация осушенного дна Аральского моря // Экол. вестн. Узбекистана. 2016. № 6. С. 22–25. [Novitsky Z.B., Ustemirov K.Zh., Borovkov A.V., Tanirbergenov Yu.K. Forest Reclamation of the Drained Bottom of the Aral Sea. *Ekologicheskiy vestnik Uzbekistana*, 2016, no. 6, pp. 22–25].

10. Новицкий З.Б., Устемиров К.Ж. Лесные насаждения на осушенном дне Аральского моря // Экол. вестн. Узбекистана. 2015. № 10. С. 31–36. [Novitsky Z.B., Ustemirov K.Zh. Forest Plantations on the Drained Bottom of the Aral Sea. *Ekologicheskiy vestnik Uzbekistana*, 2015, no. 10, pp. 31–36].

11. Устемиров К.Ж., Боровков А.В., Таирбергенов Ю.К., Новицкий З.Б. Лесомелиорация осушенного дна Аральского моря // Сб. аннотир. отчетов (трудов) по проекту «Сохранение лесов и увеличение лесистости территории республики». 2007–2014 гг. Астана, 2014. С. 432–438. [Ustemirov K.Zh., Borovkov A., Tanirbergenov Yu.K., Novitsky Z.B. Forest Reclamation of the Drained Bottom of the Aral Sea. *Collection of Annotated Reports (Works) on the Project “Conservation of Forests and Increasing Forest Cover of the Republic’s Territory”*. 2007–2014. Astana, 2014, pp. 432–438].

12. Хюфлер Ф., Новицкий З. Лес на осушенном дне Арала. Ташкент, 2001. 61 с. [Huffer F., Novitsky Z. *Forest on the Drained Bottom of the Aral Sea*. Tashkent, 2001. 61 p.].
13. Хюфлер Ф., Новицкий З. Зеленый щит осушенного дна Арала. Ташкент, 2003. 75 с. [Huffer F., Novitsky Z. *Green Shield of the Drained Bottom of the Aral Sea*. Tashkent, 2003. 75 p.].
14. Хюфлер Ф., Новицкий З. Противодефляционная роль лесных насаждений на осушенном дне Аральского моря // Токой лес. 2004. № 28. С. 32–34. [Huffer F., Novitsky Z. Anti-Deflationary Role of Forest Plantations on the Drained Bottom of the Aral Sea. *Tokoy les*, 2004, no. 28, pp. 32–34].
15. Breckle S.-W., Wucherer W., Dimeyeva L.A., Ogar N.P. *Aralkum – A Man-Made Desert*. Berlin, Springer, 2012. 488 p. DOI: [10.1007/978-3-642-21117-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21117-1)
16. *The Aral Sea Basin*. Ed. by P.P. Micklin, W.D. Williams. Berlin, Springer, 1996. 187 p. DOI: [10.1007/978-3-642-61182-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61182-7)
17. Wilps H., Huffer F., Novitskiy S. *The Aral Sea Crisis: A New Approach towards Its Overcoming through Recultivation Measures: Report on the Project*. Germany, 2006. 20 p.

FOREST PLANTATIONS ON THE DRAINED BOTTOM OF THE ARAL SEA

N.J. Bakirov¹, Chairman of the State Committee

A.Kh. Khamzaev², Doctor of Agriculture, Prof., Director

Z.B. Novitskiy², Doctor of Agriculture, Head of Laboratory;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9280-9557>

¹State Committee on Forestry of the Republic of Uzbekistan, ul. Katartal, 21, Tashkent, 100113, Republic of Uzbekistan; e-mail: forestry@urmon.uz

²Research and Development Institute of Forestry, pos. Darkhon, Tashkent district, Tashkent region, 111104, Republic of Uzbekistan; e-mail: markaz@urmon.uz, zinoviy.novitskiy@mail.ru

Information is provided on the current state of the drained bottom of the Aral Sea. It is noted that the Amu Darya and Syr Darya rivers dumped 55–60 km³ of water into the sea until 1966. The waters of Syr Darya ceased to flow into the open sea in 1973, and Amu Darya in 1966. This is largely responsible for the area of the drained bottom, which is about 6 mln ha today. It is necessary to carry out forest reclamation works in order to consolidate the drained bottom and prevent the occurrence of deflationary processes. The research purpose was to identify the types of bottom sediments according to their degree of forest suitability taking into account their mechanical and chemical composition and select woody-shrub plants for the reclamation development of the lands. The studies were carried out from 2006 till 2019. Soil was distinguished into 3 categories taking into account its granulometric texture: the first category is sandy and sandy loam soils; the second is shifting sands, and the third is salt wastelands. The role of forest plantations in reduction of deflationary processes has been established: the wind speed decreases by 20.5 % in the annual saxaul-saltwort plantation, by 34.6 % in the two-year plantation, and by 87.4 % in the five-year plantation. Natural grassland vegetation appears under the canopy of 4–5-year forest plantations, which results in a sharp decrease in wind speed and, thus, termination of soil deflation. It was determined that forest plantations reduce the blowing of salt, dust and sand and thereby contribute to the ecological recovery of the territory. The removal of chemical elements (such as chlorine, sulfur, calcium, magnesium and sodium) from the soil under the protection of forest plantations is significantly below than from an open surface. The research results are widely used by organizations involved in afforestation of the drained bottom of the Aral Sea, such as regional floristries of the Republic

of Uzbekistan, which have already created about 400 ths ha of forest plantations. As a result conducting large-scale forestry and forest reclamation on the drained bottom of the Aral Sea will allow to consolidate it and thereby minimize the occurrence of deflationary processes, in other words will make it possible to improve the environmental situation in the Central Asia region.

For citation: Bakirov N.J., Khamzaev A.Kh., Novitskiy Z.B. Forest Plantations on the Drained Bottom of the Aral Sea. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 51–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-51-59

Keywords: deflation of soils, forest plantations, drained bottom, Aral Sea, forest reclamation, wind, relief, selection of vegetation assortment, forest reclamation effectiveness.

Получена 16.04.19 / Received on April 16, 2019

УДК 630*22(470.324)

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-60-72

ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОЙ НАГОРНОЙ ДУБРАВЫ)

Г.А. Одноралов, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-7485-2020](https://orcid.org/0000-0002-7154-6807),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-6807>

Е.Н. Тихонова, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-7496-2020](https://orcid.org/0000-0002-9039-9822),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

И.В. Голядкина, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-7488-2020](https://orcid.org/0000-0002-4532-3810),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4532-3810>

Т.А. Малинина, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-7491-2020](https://orcid.org/0000-0002-5967-3336),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5967-3336>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: tichonova-9@mail.ru, nina1818@ya.ru, malinina15@ya.ru

Стремительная урбанизация территории сокращает площадь лесных массивов, в результате чего снижаются объемы фотосинтеза, обменных процессов, продуцирования кислорода, депонирования углерода и т. д. Все это заставляет задуматься о главном – о существовании лесов на планете. Воронежская нагорная дубрава (общая площадь более 7 тыс. га) служит центральным организующим элементом урбоэкосистемы г. Воронежа. Древостой представлен как хвойными культурами, расположенными по левобережным надпойменным террасам, так и широколиственными лесными насаждениями, раскинувшимися на приречных склонах водораздела. Воронежская нагорная дубрава – государственный природный заказник областного значения, имеет статус особо охраняемой природной территории. Одной из основных ее функций является снижение уровня антропогенного воздействия на уникальные ландшафтные комплексы и поддержание экологического баланса в регионе. На примере Воронежской нагорной дубравы приведена характеристика основных типов леса и рассчитана их биомасса, сопоставлена надземная органическая масса с массой почвенного гумуса, а также общая биомасса с биомассой глины. Установлено, что общие запасы биомассы коррелируют с массой физической глины в корнеобитаемом слое. Так, культуры сосны, произрастающие на местообитаниях, содержащих до 900 т/га физической глины, продуцируют 121,57 т биомассы на 1 га. Установлено, что увеличение ее в 2 раза повышает продуктивность леса до 288,92 т/га. При этом в первом случае класс бонитета культур сосны колеблется от 2-го до 3-го, во втором – достигает 1-го класса. Воронежская нагорная дубрава теряет свой лесорастительный потенциал, ухудшаются ее санитарно-гигиенические свойства, а также, с точки зрения концепции экосистемных услуг, происходит общее снижение экономической ценности особо охраняемой природной территории.

Для цитирования: Одноралов Г.А., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Малинина Т.А. Оценка биологической продуктивности лесной среды в условиях урбанизации (на примере Воронежской нагорной дубравы) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 60–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-60-72

Ключевые слова: Воронежская нагорная дубрава, лес, биологическая продуктивность, биоразнообразие, фитомасса, лесные почвы, городские зеленые насаждения, урбоэкосистема.

Введение

Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России [1] отводит лесам исключительное биосферное значение. Поэтому сохранение лесов, их восстановление, повышение продуктивности и медико-биологического потенциала является приоритетнейшей задачей в нашей стране.

На сегодняшний день деградация лесов в мировом масштабе достигла такой черты, за которой развал биосистемы – вполне ожидаемая и реальная перспектива [10, 15]. Бесконтрольная хищническая вырубка леса, лесные пожары, безудержный рост городов, транспортных коммуникаций стремительно сокращают площадь активной биосферы, превращая ее в безжизненное пространство, лишенное биомассы, фотосинтеза, продуцирования кислорода, аккумуляции углерода и свободной энергии. В экосистемах разрушаются закономерные генетические связи, нарушается энерго- и массообмен между всеми их частями и, как следствие, нарастает энтропия [18].

Сохранившиеся в настоящее время лесные массивы Среднерусской лесостепи в связи с мощным антропогенным воздействием превратились в техногенные экосистемы с соответствующей формой миграции химических элементов [14]. Серьезные проблемы ожидают нас и в связи с нарастающим потеплением, которое в основном трансформирует лесную среду, особенно в переходной лесостепной зоне, расположенной между аридными и гумидными территориями [19, 20]. Эта зона характеризуется уравновешенным водным балансом с коэффициентом относительной увлажненности, изменяющимся в узком диапазоне значений ($KУ = 0,7...1,2$). Увеличение радиационного баланса нарушает умеренно-влажные климатические условия лесостепи, переводя их в аридную стадию развития (в начале умеренно-сухую, затем сухую и, возможно, в чрезвычайно сухую ($KУ < 0,2$)), что будет способствовать гибели лесов.

Чтобы предотвратить или хотя бы отсрочить катастрофу, необходимо прежде всего увеличить площадь лесов и их биомассу, а для этого требуется разработка новых технологий лесопользования и лесоразведения [12].

Нормальное функционирование лесных систем определяется совокупностью процессов перемещения, обмена и трансформации вещества, энергии и информации между всеми компонентами ландшафта (листьями или хвоей, ветвями, стволами, травяным и моховым покровом, лесной подстилкой, почвенными горизонтами, корой выветривания, грунтовыми водами). Визуально измерить эти связи невозможно. Необходима количественная оценка, однако до последнего времени главными показателями состояния леса служат высота, выраженная в метрах, диаметр в сантиметрах, площадь в квадратных метрах, запас и изменение запаса в кубических метрах. В то же время при исследовании почв на тех же пробных площадях используют другие параметры: миллиграммы, граммы, проценты, моли, рН, Eh и др.

Безусловно, совместить показатели лесной среды и почв невозможно, но если рассматривать лес как совокупность живых организмов, выраженную массой и химическим составом, то это позволяет сопоставить массу химических элементов биогенных компонентов леса с теми же показателями других компонентов природы – горными породами, гидросферой и атмосферой.

Только такой глобальный геохимический подход к изучению сложнейших генетических связей в природе даст возможность количественно определить эти связи и перейти к их кодово-цифровой характеристике [13, 16, 22].

Целью данного исследования является оценка биологической продуктивности Воронежской нагорной дубравы в условиях нарастающей урбанизации, основанная на ландшафтно-геохимическом подходе.

Объекты и методы исследования

Природно-территориальный комплекс (ПТК) г. Воронежа включает в себя совокупность промышленных и гражданских сооружений с сетью улиц, дорог, автомагистралей, парков, скверов, водных объектов и лесных насаждений разного назначения. Центральным организующим элементом ПТК является Воронежская нагорная дубрава, занимающая площадь 7098 га.

Воронежская нагорная дубрава – государственный природный заказник областного значения, имеющий статус особо охраняемой природной территории (ООПТ) на основании постановления правительства Воронежской области № 321 от 17.04.2013 г. В условиях городской территории наиболее значимы средообразующие и рекреационные функции ООПТ, преимущественно связанные с регулированием локального климата и рекреацией жителей [17, 21].

Наблюдения за состоянием Воронежской нагорной дубравы, начатые авторским коллективом во главе с Г.А. Однораловым в 1980 г., проводятся и в настоящее время.

Исторически эта ООПТ является остатком сплошной полосы правобережных лесов, сохранившейся после многовекового антропогенного воздействия. При Петре I практически весь массив был вырублен для строительства русского флота. Затем дубрава подвергалась вырубке еще несколько раз и каждый раз восстанавливалась от пня и корней, используя для своего питания один и тот же объем почв.

Многократная вырубка дуба с течением времени превратила корневую семенную дубраву в низкобонитетное порослевое насаждение, которое в процессе многих генераций истощило минеральные, энергетические и информационные ресурсы данного ландшафта. Утратив устойчивость к внешним воздействиям, дубрава начала быстро деградировать, в результате чего дуб стал покидать когда-то любимые им места в первом ярусе и в насаждении в целом, уступая сопутствующим клену, липе, ясеню, вязу. В подросте стали преобладать второстепенные породы. Появилось много поврежденных, усыхающих и сухостойных деревьев. Чтобы противостоять этому необходимо, прежде всего, проанализировать текущее состояние лесной среды, ее биологическую продуктивность, количество синтезированной ею органической массы. С этой целью во всех основных типах леса, характерных для Воронежской нагорной дубравы, в кварталах 46–52 было выделено 5 пробных площадей (ПП), на которых произведен обмер и пересчет всех составляющих лес компонентов (от листьев (или хвои) до подроста, лесной подстилки и корней), определена их фитомасса в пересчете на 1 га, заложены почвенные шурфы (разрезы) и изучены литогенные параметры. Номера ПП соответствуют номерам почвенных разрезов: 580, 590, 601, 615, 630.

Размер ПП – 0,25 га. Границы ПП отбивались по буссоли. На каждой из них измеряли диаметр, производили пересчет всех растущих деревьев и рассчитывали средний диаметр. При помощи высотомера определяли высоту 20 деревьев и вычисляли среднюю высоту древостоя. По среднему диаметру и средней высоте находили средние модельные деревья, характеризующие данный древостой. Всего было учтено 18 модельных деревьев, включающих основные виды лесообразующих пород. Выбранные модельные деревья служили основной единицей учета массы органического вещества на ПП как для отдельных частей дерева (листья, ветви, ствол, корни), так и для дерева в целом.

Модельное дерево спиливали, уточняли длину, по срезу у основания определяли возраст. Со срубленных деревьев обирали листву (хвою), мелкие и крупные ветви, пилили ствол на части, удобные для взвешивания, и определяли массу всех сегментов дерева.

Крупные и мелкие корни отбирали из траншей, выкопанных от пня до границы площади питания дерева, и выкладывали на брезент. Мелкие корни предварительно отделяли от почвы просеиванием через сито. Почву из этих траншей подвергали описанию.

Пересчет на абсолютно сухое органическое вещество проводили с учетом данных Н.И. Базилевич, О.П. Добродеева и И.А. Суевой о том, что масса абсолютно сухого органического вещества составляет 40 % от живой биомассы [4]. Для анализа почв с глубины 0...50, 50...100, 100...150 и 100...200 см были отобраны смешанные образцы, в которых по методу Качинского определяли массу гранулометрических фракций, в том числе физической глины (частицы меньше 0,01 мм). Параллельно изучали содержание гумуса по Тюнину. Статистическую обработку данных проводили в соответствии с указаниями Е.А. Дмитриева [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Воронежская нагорная дубрава представлена всеми основными типами леса: от бора свежего травяного до дубравы свежей снытево-осоковой, сформировавшихся на местообитаниях от A_2 до D_2 . Эти условия сочли благоприятными для своего произрастания 18 видов лесообразующих пород, среди которых доминируют дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), вяз шершавый (*Ulmus glabra*), осина (*Populus tremula* L.), сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.), иногда ель обыкновенная (*Picea excelsa* Link.), ольха черная (*Alnus glutinosa* Gaerth.) и др. (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика типов леса Воронежской нагорной дубравы

ТЛУ	Тип леса	Почва	Состав насаждений	Класс бонитета	Подрост	Подлесок
A_2	Бор свежий травяной	Светло-серая лесная песчаная на монолитных песчаных отложениях	Л/к 10С+Д,Б,Ос	2-3	–	Редкий: ракитник, бересклет бородавчатый

Окончание табл. 1

ТЛУ	Тип леса	Почва	Состав насаждений	Класс бонитета	Подрост	Подлесок
В ₂	Суборь свежая с производными насаждениями дубняков	Светло-серая лесная песчаная на ортзандовых гетеролитных песках	8Д2Ос+Лп,Б,Я Л/к 10С+Д,Б,Ос, Ил,Кл _о	3 (реже 4)	Редкий: дуб, осина, клен остролистный	Средней густоты или редкий: липа, клен татарский, бузина, крушина, бересклет, рябина
С ₂	Судубрава свежая осоково-снытевая	Серая лесная супесчаная на гетеролитных суглинисто-песчаных отложениях	8Д1Лп1Ос+ Я,Кл _о ,Б,Ол _ч Иногда л/к 8С2Д+Б,Ос	2 (реже 3) 1а-1	Редкий: дуб, ясень, клен остролистный	Средней густоты: клен татарский, липа мелколистная, бересклет бородавчатый, лещина
СД ₂	Судубрава свежая осоково-снытевая	Серая лесная супесчаная, на гетеролитных песчано-суглинистых отложениях	8Д1Лп1Я+Ос, Кл _о или 4Д3Лп2Кл _о 1Яс+ +Ос	2-3	Редкий: дуб, осина, клен, ясень	Средней густоты: клен, лещина, бересклет бородавчатый, липа мелколистная
Д ₂	Дубрава свежая, снытево-осоковая	Серая лесная легкосуглинистая на суглинстом аллювии	8Д1Я1Лп+Ос, Кл _о ,Б или 6Д2Я1Кл _о 1Лп	2-3	Редкий: дуб, клен, ясень	Средней густоты или редкий: клен татарский, липа, лещина, бересклет бородавчатый

Примечание: Б – береза бородавчатая; Д – дуб черешчатый; Ил – ильм (вяз шершавый); Кл_о – клен остролистный; Лп – липа мелколистная; Ол_ч – ольха черная; Ос – осина; С – сосна обыкновенная; Я – ясень обыкновенный; л/к – лесные культуры; ТЛУ – тип лесорастительных условий.

Бонитет исследуемых насаждений, как правило, не поднимается выше 2-го или 3-го классов, часто снижается и до 4-го.

Проведенные крупномасштабные почвенно-лесотипологические исследования показывают, что Воронежская нагорная дубрава не выдерживает воздействия города. В целом жизнеспособные деревья при сильной степени рекреации в дубраве составляют не более 22 %, при слабой – около 60 %. Отдаленные от городской черты насаждения характеризуются более высокими показателями своего жизненного состояния. В пригородных кварталах леса от 30 до 40 % деревьев – сухостойные. Заметное ухудшение жизненного состояния древостоя отмечается в возрасте от 50 до 80 лет, хотя часты случаи и более раннего усыхания.

Выделенные типы леса сформировались на одном почвенном типе серых лесных почв и двух его подтипах: светло-серых и серых лесных почвах. Но существующее разнообразие лесорастительных возможностей связано не с типовыми или подтиповыми особенностями почв, а с таксонами самого нижнего уровня: разновидностями и разрядами, характеризующими гранулометрический состав верхних почвенных горизонтов и почвообразующих пород.

П.С. Погребняк выделял очень бедные (пески), бедные (легкие супеси), богатые (супеси) и очень плодородные (суглинки) местообитания [11]. Но та-

кие параметры оценки лесорастительных возможностей почв позволяют лишь формально оценивать лесорастительный потенциал конкретной территории, поскольку даже пески могут быть моно- и полиминеральными, рыхлыми и связными, содержащими в своем составе от 0 до 5 % и от 5 до 10 % глины. В супесях количество тонкодисперсных частиц возрастает до 10...20 %, а суглинки могут быть легкими, средними или тяжелыми. Кроме того, отложения бывают однородными (предположим, песчаными), гетеролитными (у которых верхняя песчаная или супесчаная толща почвенного профиля чередуется с суглинистыми горизонтами, которые вновь сменяются песками и т.д.). Такие комбинации при таксации леса, как правило, не учитываются, и тип лесорастительных условий определяется субъективно по верхнему горизонту.

Все разнообразие лесорастительных условий чаще всего связано с соотношением в почвенно-грунтовой толще частиц разного размера и в первую очередь с содержанием физической глины [6]. Проведенные исследования и статистическая обработка большого массива данных позволили выявить связь трофотопов с количеством физической глины (сумма частиц меньше 0,01 мм) в 2-метровой корнеобитаемой толще (табл. 2).

Таблица 2

**Среднестатистические запасы физической глины (кг/м²)
в 2-метровом слое почвы**

ТЛУ	M	m	G	V	P	T	N
A ₂	79,78	5,74	25,03	31,37	7,20	13,89	19
B ₂	195,01	7,27	37,07	19,01	3,73	26,83	26
C ₂	425,87	27,70	78,55	18,44	6,50	15,34	8
CD ₂	729,28	37,78	73,31	10,05	4,49	22,24	5
D ₂	977,00	81,71	182,70	18,68	8,36	11,97	5

Примечание: M – выборочное среднее арифметическое; m – ошибка среднего; G – критерий Кохрена; V – значение случайной величины; P – вероятность; T – критерий достоверности разности; N – объем выборки.

Полученные данные показывают, что каждый тип лесорастительных условий характеризуется своей массой глины в корнеобитаемой 2-метровой толще почв. Так, для бора это значение составляет 79,78 кг/м², для субори – 195,01, а для произрастания дубравы требуется 977,00 кг/м². Большой разрыв между содержанием глины в ТЛУ C₂ и D₂ вызвал необходимость выделения промежуточного трофотопы – CD₂. Дальнейшие исследования позволили разработать градацию выявления трофотопов по содержанию глины в корнеобитаемом слое почв (табл. 3).

Таблица 3

**Параметры выявления трофотопов по количеству глины
в 2-метровом корнеобитаемом слое почвы**

Единица измерения	Трофотопы по содержанию глины				
	Очень бедные (А) боры	Бедные (В) субори	Богатые судубравы		Очень плодородные (Д) дубравы
			(С)	(СД)	
кг/м ²	0...100	100...250	250...500	500...800	> 800
т/га	0...1000	1000...2500	2500...5000	5000...8000	> 8000

Различное содержание глины в 2-метровой толще флювиогляциальных отложений образовало в ландшафтах Воронежской нагорной дубравы сопряженный ряд лесообразующих условий: от очень бедных до очень плодородных (табл. 4).

Таблица 4

**Содержание гранулометрических фракций и валового гумуса
в 2-метровом слое почвы и почвообразующих пород**

ТЛУ	ПП	Состав насаждения	Бонитет	Масса гумуса, т/га	Масса фракции, т/га				
					Песок (0,05...0,01 мм)	Пыль		Ил ($\hat{>}$ 0,001 мм)	Физическая глина ($\hat{>}$ 0,01 мм)
						крупная (0,05...0,01 мм)	средняя и мелкая (0,01...0,001 мм)		
A ₂	630	Л/к 10С	2-3	88,0	26 946	1 566	264	632	896
B ₂	615	8Д2Ос+Лп,Б,Я,Кл _о или Л/к 10С	3-4 1	92,5	24 742	1 635	1 286	680	1 996
C ₂	601	8Д1Лп1Ос+ +Я,Кл _о ,Б,Олч или Л/к 8С2Д+Б,Ос	2-3 1а	131,0	22 037	1 138	2 561	731	3 372
СД ₂	580	5Д2Кл _о 2Лп1Яс	2-3	202,1	15 050	3 398	3 022	3 768	6 790
Д ₂	590	3Д2Яс3Лп2Кл _о	2-3	228,0	14 048	4 803	3 916	4 992	8 938

Очень бедные песчаные местообитания чаще всего расположены в верхних элювиальных частях катен. Крупные фракции этих отложений представлены устойчивыми к гипергенезу минералами, в основном кварцем, а выход тяжелых минералов (таких как ильменит, турмалин, сфен, дистен, ставролит, циркон, рутил, эпидот и др.), включающих в себя Са, Mg, Fe, Al, P, K, Ti и другие химические элементы, составляет не более 2,0 кг/т породы [8]. Ясно, что такой массы химических элементов недостаточно для нормального функционирования лесной экосистемы.

Содержание глины, представленной вторичными алюмосиликатами, служит наиболее емким показателем трофности почв. В боровых условиях этот показатель не превышает 900 т/га, в илистой составляющей – 630 т/га. Данная фракция адсорбирует многие химические элементы, удерживает их и при необходимости возвращает в раствор, улучшая режим питания растений. От количества этих частиц зависят степень насыщенности местообитаний основаниями, влагоемкость, физико-химическая и биологическая активность почв. Следовательно, низкое содержание глины в почвенной толще может служить главным диагностическим показателем ее низкого лесорастительного качества.

Если сравнить два занятых культурами сосны участка, расположенных практически в одинаковых условиях на однотипных флювиогляциальных песках (ПП 630 и 615), то во втором случае сосна произрастает по 1-му классу бонитета, а дубовые насаждения по 3-му, реже 4-му классу, в первом случае бонитет сосны ограничен 2-м или 3-м классами. Связано это с накоплением тонкодисперсных частиц (в основном пыли) в средней части почвенного профиля. Еще большее накопление глины (ПП 601) увеличивает продуктивность

сосны до 1а бонитета и повышает статус местообитания до судубравы свежей осоково-снытевой.

Синхронно с увеличением содержания ила в 2-метровом корнеобитаемом слое возрастает и содержание гумуса, что лишний раз подтверждает предположение о том, что образование ила и гумусообразование – это единый процесс энерго- и массообмена между химически активным живым веществом и инертным веществом литосферы [5]. Массообмен происходит на разных уровнях: от отдельного дерева и среды его местообитания до биогеоценоза, типа леса и окружающей их среды и т. д.

Степень деградации дубравы хорошо видна при таксационных исследованиях (табл. 5).

Таблица 5

**Таксационная характеристика насаждений
Воронежской нагорной дубравы**

Пробная площадь	Категория земель	Главная порода	Тип леса	ТЛУ	Порода	Бонитет	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Количество, шт./га	Состав насаждения
630	Л/к	С	БТМ	A ₂	10С	3,0	67	17	22	400	10С+Д,Б,Ос
615	Насаждения	Д	СБТ	В ₂	8Д	3,0	75	20	28	336	8Д2Ос+Лп,Б,Я
					2Ос	1,5	50	21	24	96	
					Лп	2,4	40	16	16	48	
	Л/к	С	СБТ	В ₂	8С	1а	65	24	28	704	10С+Д,Б, Ос,Ил,Кл _о
					2Д					176	
601	Л/к	Д	ДОС	С ₂	8Д	2,2	75	23	26	400	8Д1Лп10С+Кл _о , Ос иногда л/к 8С2Д+Б,Ос
					1Лп	2,2	55	24	28	84	
					1Ос	1,9	55	19	20	178	
					Кл _о	–	–	–	–	90	
580	Насаждения	Д	ДОС	СД ₂	5Д	2,4	75	22	32	280	5Д2Кл _о 2Лп1Яс
					2Кл _о	2,2	50	23	32	112	
					2Лп	2,0	50	19	20	110	
					1Яс	2,2	75	19	20	52	
590	Насаждения	Д	ДСО	Д ₂	3 Дн	2,7	100	23	32	180	3Д2Яс3Лп2Кл _о
					2Яс	2,5	80	24	32	120	
					3Лп	2,4	45	17	16	180	
					2Кл _о	–	–	17	16	120	

Примечание: БТМ – бор свежий травяной на рыхлых песках водораздела; СБТ – суборь свежая с производными насаждениями дубняков водораздела; ДОС – судубрава свежая осоково-снытевая на супесях водораздела; ДСО – дубрава свежая снытево-осоковая на суглинках водораздела.

Здесь практически во всех типах леса, биогеоценозах и классах возраста высота главной породы уступает сопутствующим породам (липе, клену, ясеню), стремящимся занять место в первом ярусе. Начавшаяся конкурентная борьба за лидерство в системе, мощное давление города, сильное загрязнение изменили лесную среду и сильно снизили биомассу насаждения. Для ее определения была исследована органическая масса всех компонентов модельных деревьев, а на основе полученных нами данных была рассчитана общая биомасса всех типов леса нагорной дубравы (табл. 6).

Таблица 6

Биомасса основных типов леса Воронежской нагорной дубравы

ПП	ТЛУ	Состав насаждения	Фракция фитомассы, т/га								
			Хвоя, ли- стья	Ветви		Ствол	Над- земная часть	Корни		Под- земная часть	Всего
				мел- кие	круп- ные			мел- кие	круп- ные		
630	А ₂	Сосна	4,00	1,92	4,36	90,80	101,08	1,68	11,16	12,84	113,92
		Подлесок	1,08	1,26	—	3,60	5,94	1,71	—	1,71	7,65
		<i>Итого</i>	5,08	3,18	4,36	94,40	107,02	3,39	11,16	14,55	121,57
615	В ₂	Дуб	1,54	0,74	13,88	134,40	150,56	1,01	9,14	10,15	160,71
		Осина	0,31	0,35	4,41	32,64	37,71	0,36	2,36	2,72	40,43
		Липа	0,24	0,25	1,56	9,84	11,89	0,27	1,26	1,53	13,42
		Подлесок	0,83	1,45	2,25	3,18	7,71	1,44	2,88	4,32	12,03
		<i>Итого</i>	2,92	2,79	22,10	180,06	207,87	3,08	15,64	18,72	226,59
		Сосна	8,59	3,66	9,99	186,56	208,80	2,60	23,37	25,97	234,77
		Дуб	1,02	0,88	2,57	41,89	46,36	0,53	4,95	5,48	51,84
		Подлесок	0,27	0,33	—	1,53	2,13	0,18	—	0,18	2,31
		<i>Итого</i>	9,88	4,87	12,56	229,98	257,29	3,31	28,32	31,63	288,92
		601	С ₂	Дуб	1,80	4,92	24,80	168,00	199,52	1,44	2,72
Липа	0,42			0,47	3,10	18,81	22,80	0,40	2,52	2,92	25,72
Осина	0,34			0,38	2,87	14,35	17,94	0,33	1,64	1,97	19,91
Клен	0,47			0,35	3,31	15,03	19,16	0,25	3,60	3,85	23,01
<i>Итого</i>	3,03			6,12	34,08	216,19	259,42	2,42	10,48	12,90	272,32
580	СД ₂	Дуб	0,89	0,59	10,08	119,00	130,56	1,32	10,08	11,40	141,96
		Клен	0,34	0,68	1,88	33,60	36,50	0,41	1,79	2,20	38,70
		Липа	0,45	0,42	3,85	23,32	28,04	0,55	3,52	4,07	32,11
		Ясень	0,20	0,23	2,08	9,62	12,13	0,20	1,09	1,29	13,42
		<i>Итого</i>	1,88	1,92	17,89	185,54	207,23	2,48	16,48	18,96	226,19
590	Д ₂	Дуб	0,94	2,18	14,40	117,00	134,52	0,58	3,73	4,31	138,83
		Ясень	0,41	0,50	1,80	13,20	15,91	—	—	—	15,91
		Липа	0,40	0,27	2,16	18,00	20,83	0,45	5,45	5,90	26,73
		Клен	0,29	0,23	0,80	2,64	3,96	0,46	0,41	0,87	4,83
		<i>Итого</i>	2,04	3,18	19,16	150,84	175,22	1,49	9,59	11,08	186,30

Примечание: На ПП 615 биомассу рассчитывали отдельно для культур сосны обыкновенной и насаждения дуба черешчатого.

Общая биомасса бора свежего травяного, сформированного на светло-серых лесных песчаных почвах в условиях произрастания А₂, – 121,57 т/га. Из этой величины 5,08 т/га постоянно участвуют в процессах фотосинтеза, а 101,94 т/га сконцентрированы в стволах и ветвях деревьев на длительный срок. Низкая энергоемкость данного компонента не способствует нормальному развитию культур сосны в экосистеме, поэтому насаждение постепенно изреживается, становится туповершинным и расстраивается. По своей биологической продуктивности сосняки Воронежской нагорной дубравы близки к насаждениям изреженной северной тайги или к лесотундре [7]. В связи с этим возникает вопрос о целесообразности использования сосны в подобных условиях при формировании городских и пригородных лесов зеленого кольца.

Следующие две ПП, характеризующие тип условий местопроизрастания В₂, также представлены светло-серыми лесными песчаными почвами, только с

увеличенным (относительно рассмотренного выше случая) содержанием глинистых частиц и тонкими ортзандовыми прослойками. На одной ПП произрастают дубовые насаждения по 3-му или даже 4-му классу бонитета, на другой – культуры сосны (в тех же условиях, но по 1-му классу). Биомасса дубняков здесь сильно уступает равнинным широколиственным лесам, синтезирующим до 370...400 т/га органического вещества.

В тех же литогенных условиях культуры сосны показывают хороший результат – 234,77 т/га, близкий к показателям средней тайги (260 т/га) [9]. Это еще раз указывает на то, что современный облик леса не является первозданным, а представляет собой продукт техногенных сукцессий и катастрофических трансформаций.

Следующие ПП характеризуют дубовые насаждения, произрастающие в условиях C_2 , CD_2 , D_2 . Гранулометрический состав почв первых двух местообитаний представлен чередованием супеси, песка и легкого суглинка в верхнем 1-метровом слое с прослойками тяжелых суглинков в нижележащей толще. В отложениях горных пород третьей ПП отмечается чередование легко- и среднесуглинистых верхних горизонтов, постепенно переходящих в тяжелосуглинистую подстилающую породу. И в этих условиях бонитет дубовых насаждений по-прежнему характеризуется 2–3-м классом, а у сосновых культур опять поднимается до 1-го и даже 1а класса. Общая масса органического вещества, создаваемая современной Воронежской нагорной дубравой, – 186,30...272,32 т/га, что гораздо ниже ее потенциала, который по данным А.И. Перельмана [9] составляет не менее 370,00...400,00 т/га. Из этого количества 150,84...216,19 т/га законсервировано в стволах и ветвях деревьев и лишь 1,88...3,03 т/га участвует в процессах фотосинтеза.

Общий показатель биомассы насаждений еще не дает полного представления о продуктивности насаждений [2]. Для этого необходимо определить соотношение опада и фитомассы, показывающее насколько прочно данный тип растительности удерживает органическое вещество. Дальнейшее изучение данной проблемы позволит оценить круговорот углекислого газа и степень выведения углерода из этого цикла, а также соотношение углекислого газа, связанного в процессе фотосинтеза в растительности и выведенного из почвы.

Выводы

1. Геохимическое направление в исследованиях лесных экосистем позволит разработать теоретическую базу для создания новых методов изучения лесной среды.

2. Важнейшим параметром экологического состояния лесной среды, ее биологической продуктивности и разнообразия является масса органического вещества, заключенного в биогенной и литогенной частях ландшафта.

3. Общие запасы биомассы коррелируют с массой физической глины в корнеобитаемом слое. Так, культуры сосны, произрастающие на местообитаниях, содержащих до 900 т физической глины на 1 га, продуцируют 121,57 т биомассы на 1 га, увеличение этого показателя в 2 раза повышает продуктивность леса до 288,92 т/га. Причем в первом случае класс бонитета культур сосны колеблется от 2-го до 3-го, во втором – достигает 1-го класса.

4. Воронежская нагорная дубрава теряет свой лесорастительный потенциал, ухудшаются ее санитарно-гигиенические свойства, при этом с точки зрения концепции экосистемных услуг происходит общее снижение экономической ценности ООПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алимов А.Ф., Алтухов Ю.П., Амирханов А.М., Бобылев С.Н., Боголюбов С.А., Большаков В.Н., Букварева Е.Н., Виноградов М.Е., Виноградов В.Г., Гунин П.Д., Гусев А.А., Данилов-Данильян В.И., Дгебуадзе Ю.Ю., Добровольский Г.В., Жученко А.А., Заварзин Г.А., Захаров В.М., Исаев А.С., Ильяшенко В.Ю., Мартынов А.С. Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России: принята на Форуме по сохранению живой природы России, Москва, июнь 2001 г. (проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия»). М.: РАН, М-во природ. ресурсов РФ, 2001. [Alimov A.F., Altukhov Yu.P., Amirkhanov A.M., Bobylev S.N., Bogolyubov S.A., Bol'shakov V.N. et al. *The National Strategy of Biodiversity Conservation in Russia: Adopted at the Forum for the Conservation of Wildlife of Russia, Moscow, June, 2001 (GEF Project "Biodiversity Conservation in Russia")*. Moscow, RAS Publ., 2001].
2. Гульбе Я.И., Гульбе А.Я., Ермолова Л.С., Гульбе Т.А. Исследования по биологической продуктивности лесов в Институте лесоведения РАН // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 4. С. 7–22. [Gulbe Ya., Gulbe A., Ermolova L., Gulbe T. Research on Biological Productivity of Forests at the Institute of Forest Science RAS. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2019, no. 4, pp. 7–22]. DOI: [10.24419/LHI.2304-3083.2019.4.01](https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.4.01)
3. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ, 1972. 334 с. [Dmitriyev E.A. *Mathematical Statistics in Soil Science*. Moscow, MGU Publ., 1972. 334 p.].
4. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с. [Dobrovol'skiy V.V. *The Basics of Biogeochemistry*. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p.].
5. Иркковский Э.Р., Одноралов Г.А., Харченко Н.А. Влияние почвы на произрастающие виды древесной растительности // Политематический сетевой электрон. науч. журн. Кубан. аграр. ун-та. 2013. №92. С. 288–301. [Irkovsky E.R., Odnoralov G.A., Harchenko N.A. Influence of the Soil on Growing Types of Wood Vegetation. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University], 2013, no. 92, pp. 288–301].
6. Одноралов Г.А., Голядкина И.В., Мухосимова Д.Ю. Влияние литогенеза на продуктивность ландшафтов Воронежской нагорной дубравы // Материалы междунар. науч.-техн. юбил. конф. «Развитие идей Г.Ф. Морозова при переходе к устойчивому лесопроизводству», 20–21 апреля 2017 г. Воронеж: ВГЛУ, 2017. С. 203–206. [Odnoralov G.A., Golyadkina I.V., Mukhosimova D.Yu. Influence of Lithogenesis on Productivity of Landscapes of the Voronezh Upland Oak Forest. *Proceedings of the International Scientific and Technical Jubilee Conference "Development of the Ideas of G.F. Morozov in the Transition to Sustainable Forest Management"*, April 20–21, 2017. Voronezh, VSFTU Publ., 2017, pp. 203–206].
7. Одноралов Г.А., Тихонова Е.Н. Почвенно-литологические факторы формирования сосновых насаждений Центрального Подонья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 56–60. [Odnoralov G.A., Tikhonova E.N. Soil-Lithologic Factors of Pine Plantations Productivity of Central Don Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2010, no. 2, pp. 56–60]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2010/%E2%84%962-2010.pdf>
8. Одноралов Г.А., Тихонова Е.Н., Трегубов О.В., Голядкина И.В. Литогенная основа продуктивности Воронежской нагорной дубравы // Лесотехн. журн. 2017.

T. 7, № 2(26). С. 26–34. [Odnorolov G.A., Tikhonova E.N. Tregubov O.V., Golyadkina I.V. Lithogene Basis of the Productivity of Voronezh Highland Oak Forest. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2017, vol. 7, no. 2(26), pp. 26–34]. DOI: [10.12737/article_5967e8e01143e9.03067340](https://doi.org/10.12737/article_5967e8e01143e9.03067340)

9. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 610 с. [Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Landscape Geochemistry*. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999. 610 p.].

10. Пятый национальный доклад «Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации». М.: М-во природ. ресурсов и экологии РФ, 2015. 124 с. [*The Fifth National Report: Preservation of Biodiversity in the Russian Federation*. Moscow, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Publ., 2015. 124 p.].

11. Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 324 с. [Remezov N.P., Pogrebnyak P.S. *Forest Soil Science*. Moscow, Lesnaya promishlennost' Publ., 1965. 324 p.].

12. Таранков В.И. Мониторинг лесных экосистем. Воронеж: ВГЛТА, 2006. 299 с. [Tarankov V.I. *Monitoring of Forest Ecosystems*. Voronezh, VSFTU Publ., 2006. 299 p.].

13. Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 335 с. [Usol'tsev V.A. *Sample Trees Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia: Database, Climate-Related Geography, Valuation Standards*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2016. 335 p.].

14. Харченко Н.Н., Харченко Н.А., Ахтырцев А.Б. Мелиоративная роль дубрав Центральной лесостепи // Лесотехн. журн. 2014. Т. 4, № 1(13). С. 40–47. [Kharchenko N.N., Kharchenko N.A., Akhtyrtsev A.B. Reclamation Role of Oak Forests of Central Forest Steppe. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 1(13), pp. 40–47]. DOI: [10.12737/3344](https://doi.org/10.12737/3344)

15. Alcamo J., Ash N.J., Butler C.D., Callicott J.B., Capistrano D., Carpenter S.R. et al. *Ecosystems and Human Wellbeing: A Framework for Assessment*. Washington, DC, Island Press, 2003. 245 p.

16. Bi H., Long Y., Turner J., Lei Y., Snowdon P., Li Y. et al. Additive Prediction of Aboveground Biomass for *Pinus radiata* (D. Don) Plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 259, iss. 12, pp. 2301–2314. DOI: [10.1016/j.foreco.2010.03.003](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.003)

17. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B. et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 253–260.

18. McCann K.S. The Diversity-Stability Debate. *Nature*, 2000, vol. 405, pp. 228–233. DOI: [10.1038/35012234](https://doi.org/10.1038/35012234)

19. Matveev S.M., Chendev Y.G., Lupo, A.R., Hubbart J.A., Timashchuk D.A. Climatic Changes in the East-European Forest-Steppe and Effects on Scots Pine Productivity. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, vol. 174, iss. 1, pp. 427–443.

20. Matveev S., Milenin A., Timashuk D. The Effects of Limiting Climatic Factors on the Increment of Native Tree Species (*Pinus silvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, no. 10, pp. 427–434. DOI: [10.17221/36/2018-jfs](https://doi.org/10.17221/36/2018-jfs)

21. Norris K. Biodiversity in the Context of Ecosystem Services. *UK National Ecosystem Assessment Technical Report*. Cambridge, UNEP-WCMC, 2011, pp. 63–104.

22. Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J. et al. How Does Biomass Distribution Change with Size and Differ among Species? An Analysis for 1200 Plant Species from Five Continents. *New Phytologist*, 2015, vol. 208, iss. 3, pp. 736–749. DOI: [10.1111/nph.13571](https://doi.org/10.1111/nph.13571)

**ASSESSMENT OF URBAN FOREST BIOLOGICAL PRODUCTIVITY
(CASE STUDY OF THE VORONEZH UPLAND OAK FOREST)**

G.A. Odnorlov, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-7485-2020](https://orcid.org/0000-0002-7154-6807),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-6807>

E.N. Tikhonova, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-7496-2020](https://orcid.org/0000-0002-9039-9822),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

I.V. Golyadkina, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-7488-2020](https://orcid.org/0000-0002-4532-3810),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4532-3810>

T.A. Malinina, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-7491-2020](https://orcid.org/0000-0002-5967-3336),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5967-3336>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: tikhonova-9@mail.ru, nina1818@ya.ru, malinina15@ya.ru

Fast-paced rates of urbanization reduce the area of forestlands. As a result, the volumes of photosynthesis, metabolic processes, oxygen production, carbon deposition and other processes are decreasing. All of this gives pause for thought about the existence of forests on the planet. The Voronezh upland oak forest with a total area of more than 7 thousand ha is the central organizing element of the entire urban ecosystem of Voronezh. The forest stand is represented by coniferous crops along the left bank of the terraces above the flood-plain, as well as broad-leaved forest plantations extended over the riverside slopes of the watershed. The oak forest is a state nature reserve of regional significance and has the status of a specially protected natural area. One of the main functions of the nature reserve is lowering the level of anthropogenic impact on unique landscape systems and maintaining the ecological balance in the region. Through the example of the oak forest the basic forest types are characterized and their total biomass is calculated, the above-ground organic biomass is compared with the mass of soil humus and total biomass with the clay biomass. It was found that the total biomass reserves correlate with the mass of physical clay in the root layer. So, pine crops growing in habitats containing up to 900 t/ha of physical clay produce 121.57 t/ha of biomass; its double increase boosts the productivity of the forest to 288.92 t/ha. Herewith, in the first case, the yield class of pine crops ranges from the second to the third; in the second case it reaches the first class. The oak forest is losing its forest-growing potential, its sanitary and hygienic properties are deteriorating. As well as, there is a general decline in the economic value of the specially protected natural area in the context of ecosystem services.

For citation: Odnorlov G.A., Tikhonova E.N., Golyadkina I.V., Malinina T.A. Assessment of Urban Forest Biological Productivity (Case Study of the Voronezh Upland Oak Forest). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 60–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-60-72

Keywords: Voronezh upland oak forest, forest, biological productivity, biodiversity, phytomass, forest soils, urban green areas, urban ecosystem.

Поступила 30.04.19 / Received on April 30, 2019

УДК 674.048

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-73-80

ПЛОТНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ В ОСУШАЕМЫХ СОСНЯКАХ КУСТАРНИЧКОВО-СФАГНОВЫХ

О.Н. Тюкавина, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

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

Плотность древесины является важнейшим показателем ее качества. Для эффективного и рационального ее использования необходимо выявить факторы, влияющие на этот показатель. Знание особенностей формирования древесины в различных лесорастительных условиях позволит целенаправленно проводить ее заготовку для промышленного использования. Плотность древесины сосны исследовали в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых Архангельского лесничества. Закладывали пробные площади ленточной формы шириной 20 м вблизи осушителя и в межканальном пространстве на расстоянии 40 м от осушителя. Расстояние между осушителями – 100 м. Керны древесины отбирали на высоте 1,3 м с северной стороны ствола и разделяли на части длиной 5 мм. Условную плотность древесины определяли способом максимальной влажности образцов, имеющих сравнительно небольшой объем. Условная плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых изменялась в диапазоне от 0,390 до 0,697 г/см³, вблизи осушителя она была меньше, чем в межканальном пространстве. В загущенных насаждениях удаленность от осушителя не влияет на этот показатель, в средневозрастных насаждениях он возрастает при увеличении густоты, но в древостоях старше 100 лет не изменяется. При увеличении возраста предельное значение условной плотности древесины сосны составляет 0,486 г/см³, при увеличении густоты древостоя – 0,532 г/см³. Отмечается тенденция возрастания плотности древесины при уменьшении ширины годичного слоя. В средневозрастных сосняках выявлена значительная корреляционная зависимость плотности древесины сосны от процента поздней древесины. Установлено, что в средней части радиуса ствола плотность древесины понижается.

Для цитирования: Тюкавина О.Н. Плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 73–80. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-73-80

Ключевые слова: осушаемые сосняки кустарничково-сфагновые, условная плотность древесины, густота древостоя, гидромелиорация, процент поздней древесины.

Введение

Одним из важнейших показателей качества древесины сосны является ее плотность, которую необходимо учитывать как при лесовыращивании, так и при промышленном использовании [6, 12, 16, 20, 21]. Плотность влияет не только на физические, но и на механические свойства древесины [5, 6, 10]. Для эффективного и рационального использования древесины сосны необходимо знать, как изменяются ее свойства при произрастании в различных лесорастительных условиях и под влиянием антропогенных факторов. На 16 % площадей, занятых сосняками в Архангельском лесничестве, проведена гидромелиорация. Влияние осушения на плотность древесины изучено недостаточно [1, 4]

по сравнению с влиянием рубок ухода и внесением удобрений [2, 8, 9, 13–15, 17, 19, 22, 23].

Цель исследования – оценка условной плотности древесины сосны в сосняках кустарничково-сфагновых осушенных.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в сосняках кустарничково-сфагновых, осушенных в 1969 г. Объект расположен в квартале 108 Усть-Двинского участкового лесничества Архангельского лесничества. Таксационные показатели древостоев на пробных площадях (ПП) отражены в табл. 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев (состав 10С)

ПП	Класс возраста	Средние		Относитель- ная полнота	Густота, шт./га	Запас, м ³ /га
		диаметр, см	высота, м			
1	III	9,0	8,1	0,45	1451	42,9
2	III	6,9	6,4	0,39	1873	27,8
3	III	6,2	6,7	1,03	6297	78,8
4	III	5,4	5,6	1,07	7867	64,6
5	VI	10,7	8,5	0,62	1436	62,2
6	VI	11,8	8,9	0,68	1335	72,7
7	VII	18,6	12,2	0,53	512	87,9
8	VII	17,6	12,6	0,54	598	93,4

Согласно критериям оценки качества осушительной сети [11], состояние осушительных каналов хорошее. Средневозрастные сосновые насаждения характеризуются 5-м классом бонитета, спелые и перестойные – 5а классом бонитета в соответствии с требованиями ОСТ 56-69–83 и рекомендациями В.Г. Рубцова и А.А. Книзе [7] закладывали ленточной формы шириной 20 м вблизи осушителя и в межканальном пространстве на расстоянии 40 м от осушителя. Расстояние между осушителями 100 м. На каждой ПП подбирали 20 модельных деревьев пропорционально представленности по ступеням толщины. У каждого дерева оценивали морфометрические характеристики: высоту, диаметр ствола, количество ветвей в кроне. На высоте 1,3 м с северной стороны дерева возрастным буром отбирали керны древесины. КERN разделяли на части длиной 0,5 см, отмечая их расположение относительно сердцевины. Ширину годичных слоев в образцах определяли полуавтоматическим комплексом для распознавания годичных колец «Линтаб-6» с точностью $\pm 0,01$ мм.

Условную (базисную) плотность древесины ($\rho_{\text{усл}}$, г/см³) рассчитывали способом максимальной влажности образцов, имеющих сравнительно небольшой объем [3, 6]:

$$\rho_{\text{усл}} = \frac{1}{\frac{m_w}{m_0} - 0,346},$$

где m_w – масса образца, предельно насыщенного влагой, г; m_0 – масса абсолютно сухого образца древесины, г.

Выборки данных проверены на нормальность распределения. Асимметрия кривых распределения изменяется от $-0,71$ до $0,71$, достоверность асимметрии – от $0,45$ до $1,30$. Эксцесс кривых распределения варьирует от $-0,53$ до $-1,33$, достоверность эксцесса – от $0,49$ до $1,20$. Для проверки различий между выборками использован критерий Стьюдента при уровне значимости $p = 0,05$. Обработка данных проведена с помощью программ MS Excel 2000 и Statistica 10.

Результаты исследования и их обсуждение

Условная плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых изменяется в диапазоне от $0,390$ до $0,697$ г/см³. В загущенных средневозрастных, приспевающих и спелых древостоях близость к осушителю не повлияла на плотность древесины сосны (табл. 2).

Таблица 2

**Условная плотность древесины сосны
с учетом макроскопических показателей годичных слоев**

ПП	Условная плотность*, г/см ³	Радиальный прирост*, мм	Доля поздней древесины, %
1	$0,451 \pm 0,004$	$1,56 \pm 0,08$	$26,9 \pm 0,95$
2	$0,486 \pm 0,005$	$1,20 \pm 0,06$	$31,7 \pm 1,07$
3	$0,529 \pm 0,006$	$0,98 \pm 0,05$	$35,1 \pm 0,96$
4	$0,517 \pm 0,006$	$0,96 \pm 0,08$	$33,9 \pm 0,95$
5	$0,480 \pm 0,008$	$0,89 \pm 0,18$	$32,1 \pm 0,86$
6	$0,481 \pm 0,006$	$0,62 \pm 0,08$	$30,1 \pm 0,92$
7	$0,480 \pm 0,005$	$0,70 \pm 0,04$	$31,5 \pm 0,88$
8	$0,486 \pm 0,010$	$0,84 \pm 0,04$	$30,1 \pm 0,62$

* Приведены средние значения показателей.

В средневозрастных древостоях с полнотой $0,39...0,45$ (см. табл. 1) вблизи осушителя отмечается снижение плотности древесины на 7% по сравнению с межканальным пространством. Различие значимо ($t = 5,4$ при $t_{st} = 2,0$; $F = 2,6$ при $F_{0,05} = 2,0$).

Более плотная древесина формируется в загущенных средневозрастных сосняках. При увеличении густоты древостоя в 4 раза плотность древесины сосны, растущей вблизи осушителя, возрастает на 17% , в межканальном пространстве – только на 6% ($t = 8,2$; $3,2$ соответственно при $t_{st} = 2,0$; $F = 1,8$; $1,5$ при $F_{0,05} = 2,0$). Увеличение плотности древесины сосны в результате повышения густоты древостоя обусловлено сокращением радиального прироста на $20...37\%$ и возрастанием доли поздней древесины на $2...8\%$.

В средневозрастных сосновых насаждениях отмечается тенденция увеличения плотности древесины с уменьшением ширины годичного слоя. Теснота корреляционной связи умеренная ($r = -0,45$ при $t = 4,3$). На увеличение плотности древесины с уменьшением ширины годичного слоя указывали O. Bouriaud, M. Teodosiu, A.V. Kirdeyanov, C. Wirth [14]. Выявлена значительная значимая корреляционная зависимость плотности от процента (доли) поздней древесины ($r = 0,67$ при $t = 7,9$) (рис. 1), что согласуется с результатами исследований других авторов [6, 18].

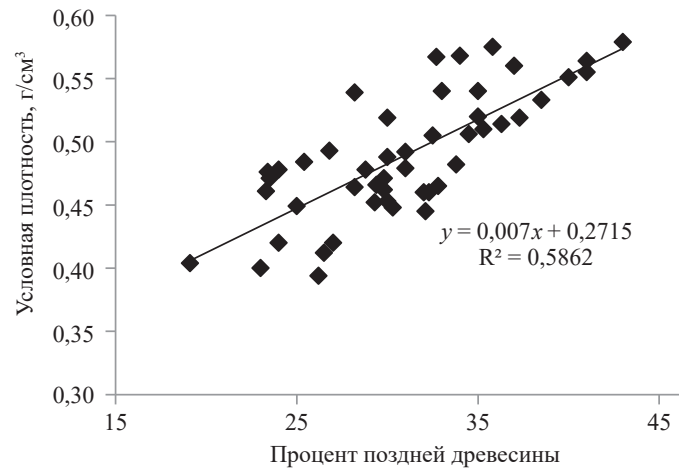


Рис. 1. Зависимость условной плотности от количества поздней древесины сосны в средневозрастных сосняках

Fig. 1. The dependence of conventional density on the number of pine late wood in middle-aged pine forests

Согласно рис. 1, при доле поздней древесины около 20 % условная плотность будет составлять около 0,400 г/см³, при 40 % и более – около 0,550 г/см³.

В древостоях старше 100 лет условная плотность древесины остается относительно стабильной – 0,480...0,486 г/см³ независимо от густоты древостоя и близости к осушителю. В приспевающих и перестойных насаждениях корреляционной связи между плотностью древесины и шириной годичного слоя, процентом поздней древесины не выявлено.

Не установлено корреляционной зависимости условной плотности древесины сосны от количества ветвей в кроне и возраста деревьев.

При анализе распределения условной плотности древесины сосны в радиальном направлении отмечается понижение ее в средней части радиуса ствола. Сравним распределение плотности древесины в поперечном сечении стволов в ступени толщины 12...16 см, которая присутствует в древостоях разных классов возраста (рис. 2).

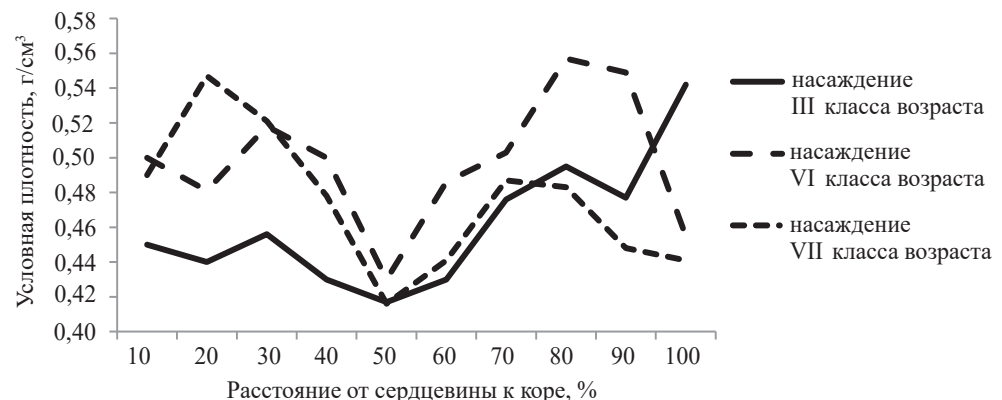


Рис. 2. Изменение плотности древесины сосны по радиусу ствола на примере деревьев ступени толщины 12...16 см в приканальной полосе (средние данные для 3–10 деревьев)

Fig. 2. The change in the pine wood density along the radius of the trunk on the example of trees with steps of thickness 12–16 cm in the canal-side forest strip (mean values for 3–10 trees)

На расстоянии, составляющем 50 % радиуса от коры, плотность древесины понижается на 16...23 % от максимального значения на периферии.

В центральной части радиуса ствола деревьев в средневозрастных насаждениях выявлено понижение плотности древесины у 67 % деревьев, в средневозрастных загущенных – у 40 %, в приспевающих – у 75 %, в спелых – у 82 % деревьев. Согласно О.И. Полубояринову [6], повышенная плотность околосердцевинной древесины связана со значительным процентом крени, с процессами ядрообразования; повышенная плотность периферийной древесины обусловлена формированием в старшем возрастном периоде более тяжелой «зрелой» древесины независимо от ширины годичного слоя. Понижение плотности внешних годовых слоев у старых деревьев зависит от формирования «перезрелой» древесины [6].

В приспевающих и спелых древостоях древесина, сформировавшаяся после проведения гидромелиорации, составляет от 5 до 20 % наружной части радиуса ствола. Значимого различия в плотности древесины до и после осушения не наблюдается.

Заключение

Условная плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых изменяется в диапазоне от 0,390 до 0,697 г/см³. При густоте древостоя 1451...1873 шт./га условная плотность древесины сосны вблизи осушителя сокращается на 7 % по сравнению с межканальным пространством. В загущенных насаждениях древостоев старше 100 лет удаленность от осушителя не влияет на этот показатель. В средневозрастных насаждениях при увеличении густоты древостоя в 4 раза плотность древесины сосны вблизи осушителя возрастает на 17 %, в межканальном пространстве – на 6 %. Изменение густоты древостоев старше 100 лет не влияет на условную плотность древесины сосны. Предельное значение условной плотности древесины сосны при увеличении возраста составляет 0,486 г/см³, при увеличении густоты древостоя – 0,532 г/см³. В средневозрастных сосняках плотность древесины сосны зависит от процента поздней древесины. При распределении условной плотности древесины сосны в радиальном направлении отмечается ее понижение в средней части радиуса ствола.

Полученные результаты могут быть использованы при составлении схем эффективного рационального природопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Данилов Д.А., Беляева Н.В., Зайцев Д.А. Запас и плотность древесины насаждений сосны в черничном осушенном типе леса // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2016. № 5. С. 142–146. [Danilov D.A., Beliaeva N.V., Zaytsev D.A. Stock and Density of Wood of Pine Tree Stand in the Dried Myrtillosum Forest Type. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2016, no. 5, pp. 142–146].

2. Данилов Д.А., Скупченко В.Б. Изменения в строении древесины сосны и ели на анатомическом уровне в древостоях, пройденных рубками ухода и комплексным уходом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 5. С. 70–88. [Danilov D.A., Skupchenko V.B. Changes in the Structure of Pine and Spruce on the Anatomical Level in the Stands Passed Cutting and Complex Care. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 5, pp. 70–88]. URL:

<http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/41d/8-izmeneniya-v-stroenii-drevesiny-sosny-i-eli-.pdf>

3. Ермакова М.В., Бессонова Т.П. Связь морфологических нарушений ствола с характеристиками древесины и размерами междоузлий у деревьев сосны обыкновенной (*PINUS SYLVESTRIS* L.) I класса возраста // Аграр. вестн. Урала. 2010. № 1(67). С. 70–71. [Ermakova M.V., Bessonova T.P. Relationship of Morphological Violations of Trunk with Description of Wood and Spear Length of Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.) of I Class of Age. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2010, no. 1(67), pp. 70–71].

4. Кистерная М.В., Аксененкова Я.А. Изменение анатомического строения древесины сосны под влиянием комплекса лесохозяйственных мероприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 4. С. 20–26. [Kisternaya M.V., Akseenenkova Ya.A. Change of Anatomic Structure of Pine Timber under Influence of Forest Management Measures. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2007, no. 4, pp. 20–26]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e9a/e9aa9d4eb2d4b04001952ba4de4adc6e.pdf>

5. Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с. [Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Quality of Pine Wood in Crops*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2003. 110 p.].

6. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с. [Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p.].

7. Рубцов В.Г., Книзе А.А. Закладка и обработка пробных площадей в осушенных насаждениях. Л.: ЛенНИИЛХ, 1974. 56 с. [Rubtsov V.G., Knize A.A. *Laying out and Treatment of Sample Plots on Drained Plantations*. Leningrad, LenNILKh Publ., 1974. 56 p.].

8. Синькевич С.М. Влияние разреживания и удобрения на качество древесины в средневозрастном сосняке // Сосново-лиственные насаждения Карелии и Мурманской области. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1981. С. 115–122. [Sin'kevich S.M. The Effect of Thinning and Fertilization on the Wood Quality in a Middle-Aged Pine Forest. *Pine Deciduous Stands in Karelia and Murmansk Region*. Petrozavodsk, Karel'skiy filial AN SSSR Publ., 1981, pp. 115–122].

9. Смирнов А.А. Влияние комплексного ухода на форму ствола и плотность древесины // Строение, свойства и качества древесины–2004: тр. IV Междунар. симп. Т. 1. СПб.: СПбГЛТА, 2004. С. 131–133. [Smirnov A.A. The Effect of Complex Care on the Trunk Shape and the Wood Density. *Wood Structure, Properties and Quality – 2004: Proceedings of the 4th International Symposium*. Vol. 1. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2004, pp. 131–133].

10. Тамби А.А., Юркова О.В., Куницкая О.А., Степанищева М.В. Исследования влияния физических свойств и строения древесины сосны на ее прочность // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 4(36). С. 157–161. [Tambi A.A., Yurkova O.V., Kunitskaya O.A., Stepanishcheva M.V. Research of the Influence of the Physical Properties and Structure of Pine Wood on Its Strength. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies.], 2017, no. 4(36), pp. 157–161]. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-157-161

11. Тараканов А.М., Шлендева Н.А. Методические указания по контролю качества и эффективности лесосушки при лесоустройстве. Архангельск: АИЛиЛХ, 1991. 29 с. [Tarakanov A.M., Shlendeveva N.A. *Methodology Guidelines for Quality Control and Efficiency of Forest Drainage in Forest Management*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1991. 29 p.].

12. Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A. Models for Predicting Wood Density Variation in Scots Pine. *Forestry*, 2014, vol. 87, iss. 3, pp. 449–458. DOI: [10.1093/forestry/cpu005](https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005)

13. Beets P.N., Gilchrist K., Jeffreys M.P. Wood Density of Radiate Pine: Effect of Nitrogen Supply. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 145, iss. 3, pp. 173–180. DOI: [10.1016/S0378-1127\(00\)00405-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00405-9)

14. Bouriaud O., Teodosiu M., Kirdeyanov A.V., Wirth C. Influence of Wood Density in Tree-Ring-Based Annual Productivity Assessments and Its Errors in Norway Spruce. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, iss. 20, pp. 6205–6217. DOI: [10.5194/bg-12-6205-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-6205-2015)
15. Dobner Jr. M., Huss J., Tomazello Filho M. Wood Density of Loblolly Pine Trees as Affected by Crown Thinning and Harvest Age in Southern Brazil. *Wood Science and Technology*, 2018, vol. 52, iss. 2, pp. 465–485. DOI: [10.1007/s00226-017-0983-9](https://doi.org/10.1007/s00226-017-0983-9)
16. Guller B., Isik K., Cetinay S. Variations in the Radial Growth and Wood Density Components in Relation to Cambial Age in 30-Year-Old *Pinus brutia* Ten. at Two Test Sites. *Trees*, 2012, vol. 26, iss. 3, pp. 975–986. DOI: [10.1007/s00468-011-0675-2](https://doi.org/10.1007/s00468-011-0675-2)
17. Jyske T. *The Effects of Thinning and Fertilization on Wood and Tracheid Properties of Norway Spruce (Picea abies) – The Results of Long-Term Experiments*. Dissertationes Forestales 55. Helsinki, 2008. 59 p. DOI: [10.14214/df.55](https://doi.org/10.14214/df.55)
18. Kamala F.D., Sakagami H., Oda K., Matsumura J. Wood Density and Growth Ring Structure of *Pinus patula* Planted in Malawi, Africa. *IAWA Journal*, 2013, vol. 34, iss. 1, pp. 61–70. DOI: [10.1163/22941932-00000006](https://doi.org/10.1163/22941932-00000006)
19. Nyakuengama J.G., Downes G.M., Ng J. Growth and Wood Density Responses to Later-Age Fertilizer Application in *Pinus radiata*. *IAWA Journal*, 2002, vol. 23, iss. 4, pp. 431–448.
20. Peltola H., Gort J., Pulkkinen P., Gerendiaian A.Z., Karppinen J., Ikonen V.-P. Differences in Growth and Wood Density Traits in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Genetic Entries Grown at Different Spacing and Sites. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 3, pp. 339–354. DOI: [10.14214/sf.192](https://doi.org/10.14214/sf.192)
21. Sattler D.F., Finlay C., Stewart J.D. Annual Ring Density for Lodgepole Pine as Derived from Models for Earlywood Density, Latewood Density and Latewood Proportion. *Forestry*, 2014, vol. 88, iss. 5, pp. 622–632. DOI: [10.1093/forestry/cpv030](https://doi.org/10.1093/forestry/cpv030)
22. Valinger E. Effects of Thinning and Nitrogen Fertilization on Growth of Scots Pine Trees: Total Annual Biomass Increment, Needle Efficiency, and Aboveground Allocation of Biomass Increment. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, vol. 23(8), pp. 1639–1644. DOI: [10.1139/x93-204](https://doi.org/10.1139/x93-204)
23. Valinger E., Elfving B., Mörling T. Twelve-Year Growth Response of Pine to Thinning and Nitrogen Fertilisation. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 134, iss. 1-3, pp. 45–53. DOI: [10.1016/S0378-1127\(99\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00244-3)

THE DENSITY OF PINE WOOD IN DRAINED SHRUB-SPHAGNUM PINE FORESTS

O.N. Tyukavina, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

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

The density of wood is a key indicator of its quality. It is necessary to identify the factors affecting the density of wood for its effective and rational use. Knowledge of the features of wood formation in various forest growing conditions will allow to provide its well-targeted production for industrial use. Determination of pine wood density was carried out in the drained shrub-sphagnum pine forests of the Arkhangelsk forestry. Linear sample plots (20 m wide) were laid out near the drainage channel and in the interchannel space at a distance of 40 m from the channel. The distance between drainage channels is 100 m. Wood cores were selected at a height of 1.3 m on the trunk shady side and divided into parts 5 mm long. The conventional wood density was determined by the method of maximum humidity of the samples with a relatively small volume. The conventional wood density of pine in the drained

shrub-sphagnum pine forests varied in the range from 0.390 g/cm³ to 0.697 g/cm³; near the drainage channel it was less in comparison with the interchannel space. The distance from the drainage channel in high-density plantations does not affect the conventional wood density. The density of pine wood in middle-aged plantations increases with increasing stand density. In mature and over-mature stands changes in the stand density do not affect the conventional wood density. The limiting values of the conventional wood density of pine are 0.486 g/cm³ with age increase and 0.532 g/cm³ with stand density increase. There is a tendency to increase the wood density with a decrease in the annual ring width. A significant correlation between the density of pine wood and the percentage of late wood was detected in middle-aged pine forests. A decrease in the wood density of the middle part of the trunk radius was found.

For citation: Tyukavina O.N. The Density of Pine Wood in Drained Shrub-Sphagnum Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 73–80. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-73-80

Keywords: drained shrubs-sphagnum pine forests, conventional wood density, stand density, hydromelioration, percentage of late wood.

Поступила 22.03.19 / Received on March 22, 2019



УДК 634.0.372:629.733.34

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-81-100

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ВНЕШНЕГО КОНТУРА ЛЕСОСЕК ПРИ ИХ РАЗРАБОТКЕ АЭРОСТАТНО-КАНАТНЫМИ СИСТЕМАМИ

А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

П.Б. Рябухин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136, г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, PRyabukhin@mail.khstu.ru

В настоящее время в лесной отрасли остро встает вопрос внедрения в лесозаготовительный процесс технологий, отвечающих современным экологическим требованиям. К таким технологиям можно отнести воздушный транспорт, в частности аэростатные установки, внедрение которых требует дополнительных исследований в области влияния погодных и ландшафтных условий на процесс эксплуатации. В статье представлены результаты теоретических и практических исследований, направленных на улучшение функционирования аэростатно-канатных систем трелевки при обработке лесных участков различной конфигурации. Установлено, что влияние ветровой нагрузки является основным критическим фактором, который оказывает отрицательное воздействие как на аэростат, так и на тягово-возвратные канаты. Авторами разработаны методика и компьютерная программа для определения размеров внешнего контура эксплуатационного лесного участка, позволяющие устанавливать наземные лебедки или контурные блоки канатной системы на расстоянии, обеспечивающее доступ грузозахватного механизма в ранее недоступные точки лесного участка. Результаты работы программы могут быть представлены в табличном и графическом виде, что позволяет манипулировать нагрузками в канатах и одновременно находить габаритные размеры внешних контуров участка. Разработанный алгоритм для определения оптимальных размеров внешнего контура лесозаготовительного участка дает возможность обеспечить распределение нагрузок между тремя тягово-возвратными канатами аэростатно-канатной системы, что повысит управляемость и устойчивость системы в целом, а соответственно, гарантирует доступность грузозахватного механизма в любой точке обрабатываемого лесозаготовительного участка за счет устранения нерабочих зон.

Для цитирования: Абузов А.В., Рябухин П.Б. Методика определения размеров внешнего контура лесосек при их разработке аэростатно-канатными системами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 81–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-81-100

Ключевые слова: аэростатная трелевка, аэростатно-канатная система, натяжение каната, контур лесосеки, периметр лесосеки.

Введение

В ходе проводимых исследований был выполнен анализ опубликованных за предыдущие годы отечественных и зарубежных научно-практических работ в области аэростатных транспортных систем, предназначенных для разработки

лесосек на труднодоступных территориях со сложными технологическими условиями.

Были изучены исследования отечественных авторов (Буткина В.Д., Бойко Ю.С., Гарькуши В.Н., Козловского В.Б., Матвеева Э.Н., Родионова В.И., Стрельникова Д.В., Цветкова А.А., Ярцева И.В. и др.), зарубежных ученых (Brian L. Tuor, Daniel Y. Guimier, Dykstra D.P., Frank Greulich, Robert B. Avery) и отчеты таких организаций, как МПНСУ «Центротехмонтаж», ЦНИИМЭ, Воздухоплавательный центр «Авгурь», ДЦВ «Аэрос», Aerial Crane Systems, Goodyear Aerospace Corp., Skyhook Interprises Ltd., на основании которых определено современное состояние в области научных исследований, посвященных изучению конструктивных и технологических параметров аэростатно-канатных систем (АКС), влияющих на эффективность их применения.

Анализ показал, что большинство работ в данной области морально устарели в силу того, что исследуемые в них АКС в настоящее время не конкурентоспособны по сравнению с современными канатными и наземными видами лесозаготовительного транспорта [4–7, 16–20]. В силу отсутствия в лесозаготовительных операциях прошлых лет таких процессов и механизмов, которые способны проводить воздушную заготовку древесины с вертикальным изъятием древостоя, исследований, связанных с точностью наведения грузозахватного механизма и, соответственно, с его доступностью в определенных точках лесосеки сложной конфигурации, нет.

Так, анализ научных источников [1, 3] показал, что лесозаготовительный процесс с использованием трехлинейной АКС осуществляется на лесосеках, имеющих треугольный контур различной формы. Выявлено, что при транспортировке древесины вдоль периметра рабочего треугольника в тягово-возвратных канатах возникают максимальные усилия, что приводит к небезопасному функционированию системы. Установлено, что в зависимости от направления и силы ветра один или два каната АКС могут быть ослаблены и на определенное время выключены из работы. Это приводит к ситуации, когда грузовая подвеска с грузозахватным механизмом (ГЗМ) смещается от линии периметра рабочего треугольника и становится неуправляемой. Что в свою очередь ведет к образованию недоступной зоны на площади обрабатываемого участка и исключает возможность заготовки леса с использованием ГЗМ.

Соответственно, чтобы обеспечить доступность ГЗМ в любой точке периметра рабочего участка, а также управляемость системы с помощью всех трех канатов, необходимо выполнить смещение наземных лебедок или контурных блоков, располагающихся в углах рабочего треугольника, на оптимальное расстояние, тем самым обозначив внешний контур разрабатываемого лесного участка.

Исходя из перечисленного выше, требуется разработать методику, которая позволит определить размеры недоступной зоны и, соответственно, периметр внешнего контура лесного участка, обеспечив тем самым эффективную эксплуатацию АКС.

Объекты и методы исследования

Для составления алгоритма методики, позволяющей определить размеры периметра внешнего контура и, соответственно, показатели недоступной зоны, обратимся к исследованиям [2, 8–15], где представлены основные расчетные

схемы и уравнения, с помощью которых можно определить усилия в канатах для любой точки эксплуатируемого участка.

Основная расчетная схема для определения усилий натяжения канатов приведена на рис. 1.

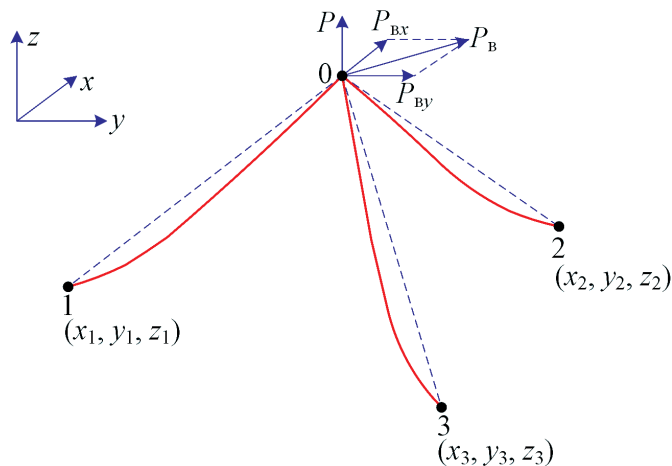


Рис. 1. Основная расчетная схема

Fig. 1. The main calculation scheme

Предполагается, что известны следующие параметры: координаты точек 0, 1, 2, 3; подъемная сила P и ветровая нагрузка $P_{\text{в}}$.

Отрезки (канаты) $i0$ (т. е. отрезки 10, 20, 30) будем рассматривать как вектор $\vec{v}_{i0}$ с началом в т. i и концом в т. 0.

Вектор $\vec{v}_{i0}$ имеет соответствующие координаты точек 0 и i :

$$\vec{v}_{i0} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_i \\ y_0 - y_i \\ z_0 - z_i \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Длину вектора $\vec{v}_{i0}$ определим как

$$l_{i0} = \sqrt{\vec{v}_{i0}^T \vec{v}_{i0}}. \quad (2)$$

Направляющие косинусы вектора $\vec{v}_{i0}$:

$$\vec{c}_{i0} = \frac{1}{l_{i0}} \vec{v}_{i0}, \quad (3)$$

Компонентами вектора $\vec{c}_{i0}$ также являются косинусы углов β_{i0}^x , β_{i0}^y , β_{i0}^z (это соответственно углы между прямой $i0$ и осями x , y , z).

Для определения усилий рассмотрим отдельно узел 0. При этом спроектируем все силы на оси x , y , z , обозначив выполнение условий равновесия узла 0:

$$[C]\vec{S} = \vec{P}, \quad (4)$$

где $[C] = [\vec{c}_{10} \ \vec{c}_{20} \ \vec{c}_{30}]$ – матрица направляющих косинусов;

$$\vec{S}^T = \{S_{01} \ S_{02} \ S_{03}\};$$

$$\vec{P}^T = \left\{ P_{\text{вх}} \quad P_{\text{вы}} \quad P - \sum_i V_{i0}^6 \right\}, \quad (5)$$

$\vec{S}$ – наклонная составляющая усилий; $\vec{P}$ – подъемная сила аэростата; V_{i0}^6 – составляющая для нагрузки V_{0i} .

В итоге будем иметь систему трех уравнений относительно трех неизвестных S_{01} , S_{02} , S_{03} , при решении которой получим соответствующие усилия.

В результате расчета [2] усилий для нити $i0$ создается ситуация, изображенная на рис. 2.

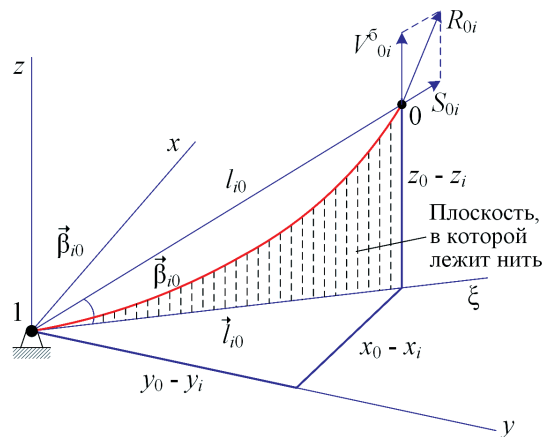


Рис. 2. Общая расчетная схема для определения вертикальной и горизонтальной составляющих реакции R_{0i}

Fig. 2. General calculation scheme for determination of the vertical and horizontal parts of the reaction R_{0i}

Рассмотрим плоскость $z\xi$, в которой находится нить $i0$.

Определим вертикальную V_{0i} и горизонтальную H_{0i} составляющие реакции R_{0i} в точке подвеса, используя схему, представленную на рис. 3.

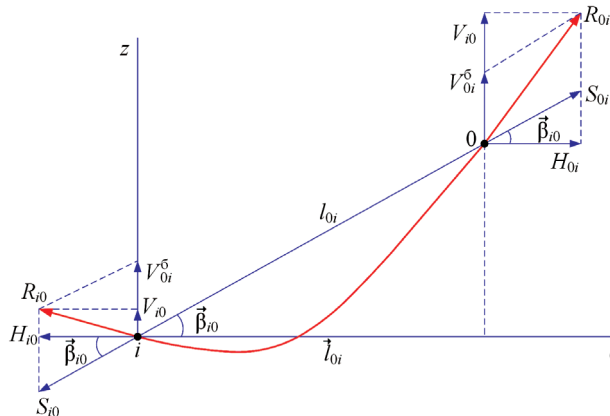


Рис. 3. Подробная расчетная схема для определения вертикальной V_{0i} и горизонтальной H_{0i} составляющих реакции R_{0i}

Fig. 3. Detailed calculation scheme for determination of the vertical V_{0i} and horizontal parts H_{0i} of the reaction R_{0i}

Горизонтальная и вертикальная составляющие нагрузки, образованной реакцией R_{0i} :

$$H_{0i} = S_{0i} \cos \bar{\beta}_{i0}; \quad (6)$$

$$V_{0i} = V_{0i}^6 + S_{0i} \sin \bar{\beta}_{i0}. \quad (7)$$

Соответственно, сила натяжения каната $i0$ в точке подвеса – т. 0:

$$\begin{aligned} R_{0i} &= \sqrt{H_{0i}^2 + V_{0i}^2} = \sqrt{S_{0i}^2 \cos^2 \bar{\beta}_{i0} + (V_{0i}^6 + S_{0i} \sin \bar{\beta}_{i0})^2} = \\ &= \sqrt{S_{0i}^2 \cos^2 \bar{\beta}_{i0} + (V_{0i}^6)^2 + 2S_{0i}V_{0i}^6 \sin \bar{\beta}_{i0} + S_{0i}^2 \sin^2 \bar{\beta}_{i0}} = \\ &= \sqrt{S_{0i}^2 + (V_{0i}^6)^2 + 2S_{0i}V_{0i}^6 \sin \bar{\beta}_{i0}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Дальнейшие расчеты по определению усилий в канатах АКС в различных точках рабочего участка проведем согласно следующему алгоритму.

1. По заданным координатам точек 0, 1, 2, 3 найдем геометрические параметры системы:

$$\text{векторы } \vec{v}_{i0} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_i \\ y_0 - y_i \\ z_0 - z_i \end{Bmatrix}, \text{ соединяющие точки } i = 1, 2, 3 \text{ с т. } 0;$$

$$\text{длины } l_{i0} = \sqrt{\vec{v}_{i0}^T \vec{v}_{i0}};$$

$$\text{направляющие косинусы } \vec{c}_{i0} = \frac{1}{l_{i0}} \vec{v}_{i0} \text{ этих векторов к осям } x, y, z;$$

$$\text{проекции длин } \vec{l}_{i0} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \text{ на горизонтальную плоскость;}$$

$$\text{направляющие косинусы } \cos \bar{\beta}_{i0} = \frac{\vec{l}_{i0}}{l_{i0}} \text{ к горизонтальной плоскости.}$$

2. Сформируем грузовой вектор:

$$\vec{P}^T = \begin{Bmatrix} P_{\text{вх}} & P_{\text{вы}} & P - \sum_i V_{i0}^6 \end{Bmatrix},$$

где $P_{\text{вх}} = P_x \cos \theta_x$; $P_{\text{вы}} = P_y \sin \theta_y$; θ – угол между направлением ветровой нагрузки

и осью; $V_{i0}^6 = \frac{l_{i0} g_{i0}}{2}$.

3. Сформируем систему уравнений (4): $[\vec{c}_{10} \quad \vec{c}_{20} \quad \vec{c}_{30}] \vec{S} = \vec{P}$, решая которую, найдем $\vec{S}^T = \{S_{01} \quad S_{02} \quad S_{03}\}$.

4. Если все $S_{i0} \geq 0$ (все канаты растянуты или, по крайней мере, не сжаты), то определим R_{0i} по формуле (8):

$$R_{0i} = \sqrt{S_{0i}^2 + (V_{0i}^6)^2 + 2S_{0i}V_{0i}^6 \sin \bar{\beta}_{i0}}.$$

Если в узле 0 действует только подъемная сила P и при этом точка подвеса находится внутри треугольника 123, то усилия во всех канатах будут растягивающими.

Согласно проведенным исследованиям [2, 3], экстремальные значения усилий в канатах возникают при перемещении точки подвеса по периметру треугольника с вершинами 1, 2, 3. При достаточно большой высоте подвеса максимальные усилия в канатах возникают при расположении точки подвеса над вершинами указанного треугольника. При уменьшении высоты положение точки подвеса, обеспечивающей возникновение экстремальных усилий в канатах, оказывается на сторонах треугольника.

Следовательно, алгоритм определения максимального значения усилия в канате состоит в нахождении максимальных усилий при перемещении точки подвеса по периметру треугольника. Поэтому для расчета канатов надо рассмотреть три случая перемещения точки подвеса вдоль сторон треугольника 123.

Для удобства расчета примем обозначения для любой из сторон периметра треугольника ij . Тогда в случае движения точки подвеса по стороне ij ($i, j = 1, 2, 3, i \neq j$) будут возникать усилия только в двух канатах $i0, j0$. При этом усилие в третьем канате $k0$ ($k = 1, 2, 3, k \neq i, j$) будет равно нулю. На рис. 4 показаны «рабочие» плоскости, в которых лежит система сил $P, S_{0i} \geq 0, S_{0j} \geq 0$. Эти плоскости выделены красным цветом.

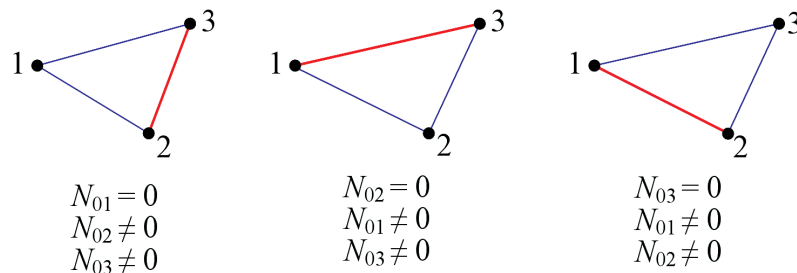


Рис. 4. Рабочие плоскости при перемещении точки подвеса по периметру треугольника 123 (N – номер каната, который не работает)

Fig. 4. Working plains when moving the suspension point along the perimeter of triangle 123 (N – no. of the cable that doesn't work)

При расположении точки подвеса над т. i усилия $S_{0i} = P$; $S_{0j} = S_{0k} = 0$.

5. Если одно из усилий $S_{0i} < 0$, то следует учесть неспособность каната работать на сжатие (выключение связи из работы). Отметим, что выключение связи возможно только при ветровой нагрузке P_v .

Рассмотрим случай одновременного действия подъемной силы P и ветровой нагрузки P_v . Отметим, что самая критическая ситуация от ветровой нагрузки реализуется в следующих случаях:

- а) точка подвеса находится над одной из сторон треугольника 123 (в данном случае будут работать только два каната из трех);
- б) ветровая нагрузка направлена внутрь треугольника (в данном случае канат, не работающий при отсутствии ветра, не будет работать и при его наличии в силу своей неспособности воспринять сжимающее усилие).

В такой ситуации рассматриваемая система представляет собой механизм, который, повернувшись относительно прямой ij , окажется в одной плоскости с силой P^* (рис. 5).

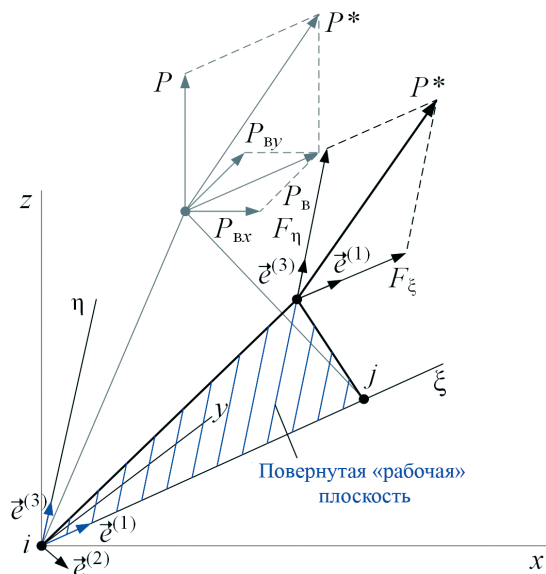


Рис. 5. Расчетная схема для определения силы P^* в смещенном положении

Fig. 5. Calculation scheme for determining force P^* in a shifted position

На рис. 5 отражены: рабочая плоскость $\xi\eta$ и компоненты грузового вектора, где орт $\vec{e}^{(2)}$ перпендикулярен рабочей плоскости, а орты $\vec{e}^{(1)}$ и $\vec{e}^{(3)}$ лежат в рабочей плоскости.

Исходя из расчетной схемы определим силу P^* :

$$P^* = \sqrt{\left(P - \sum_i V_{i0}^6\right)^2 + P_B^2} = \sqrt{\left(P - \sum_i V_{i0}^6\right)^2 + P_{Bx}^2 + P_{By}^2}. \quad (9)$$

Для определения компонентов силы P^* , действующих в указанной (рабочей) плоскости, осуществим следующую последовательность действий.

1. Выпишем компоненты первого орта повернутой системы координат как компоненты направляющего вектора стороны ij :

$$\vec{e}^{(1)} = \frac{1}{l_{ij}} \begin{Bmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \\ z_j - z_i \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

где проекция длины каната на рабочую плоскость,

$$l_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}. \quad (11)$$

2. Запишем уравнение плоскости, проходящей через точки i, j параллельно вектору:

$$\vec{P}^* = \left\{ P - \sum_i V_{i0}^6 \quad P_{Bx} \quad P_{By} \right\}^T = \left\{ P_z \quad P_{Bx} \quad P_{By} \right\}^T. \quad (12)$$

Введем уравнение

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (13)$$

где

$$A = y_i(z_j - z_i - P_z) + (y_j - y_i)(P_z - z_i) - P_{by}(2z_i - z_j); \quad (14)$$

$$B = z_i(x_j - x_i - P_{bx}) + (z_j - z_i)(P_{bx} - x_i) + P_z(2x_i - x_j); \quad (15)$$

$$C = x_i(y_j - y_i - P_{by}) + (x_j - x_i)(P_{by} - y_i) + P_{bx}(2y_i - y_j); \quad (16)$$

$$D = y_i[(y_j - y_i)P_z - (z_j - z_i)P_{bx}] + (y_j - y_i)(P_{bx}z_i - P_zx_i) + \\ + P_{by}[x_i(z_j - z_i) - z_i(x_j - x_i)]. \quad (17)$$

3. Запишем компоненты второго орта, перпендикулярного полученной плоскости:

$$\vec{e}^{(2)} = -\text{sign}(D) \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix}. \quad (18)$$

4. Запишем компоненты третьего орта, перпендикулярного плоскостям $\vec{e}_1$, $\vec{e}_2$ и лежащего в рабочей плоскости:

$$\vec{e}^{(3)} = \begin{Bmatrix} e_2^{(1)}e_3^{(2)} - e_3^{(1)}e_2^{(2)} \\ e_3^{(1)}e_1^{(2)} - e_1^{(1)}e_3^{(2)} \\ e_1^{(1)}e_2^{(2)} - e_2^{(1)}e_1^{(2)} \end{Bmatrix}. \quad (19)$$

5. Найдем компоненты грузового вектора $\vec{F}$ в новой системе координат $\xi\eta$ (с ортами $\vec{e}_1$, $\vec{e}_2$, $\vec{e}_3$) из системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} \vec{e}^{(1)} & \vec{e}^{(2)} & \vec{e}^{(3)} \end{bmatrix} \vec{F} = \vec{P}^*. \quad (20)$$

Необходимо отметить, что согласно расчетной схеме (рис. 5) F_ξ , F_η лежат в плоскости $\xi\eta$ и параллельны осям ξ , η . Кроме того, компонента силы в направлении $\vec{e}^{(2)}$ равна 0, что может послужить контролем правильности вычислений.

Таким образом, в случае выключения одной связи (каната) задача сводится к плоской, расчетная схема которой показана на рис. 6.

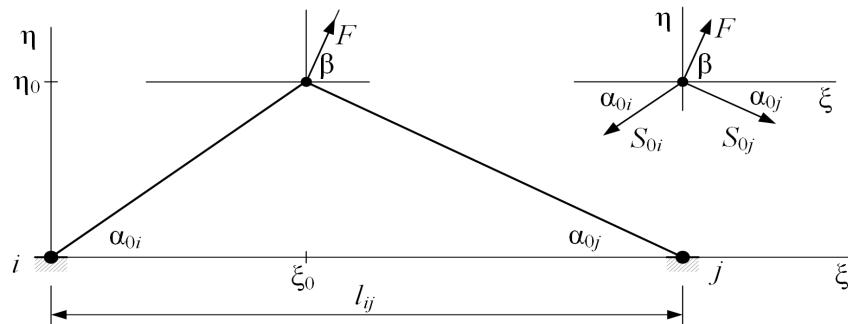


Рис. 6. Расчетная схема для определения усилий

Fig. 6. Calculation scheme for determination of the forces

6. Определим направляющие косинусы сторон $0i$, $0j$ (рабочая плоскость повернута) относительно осей ξ , η :

$$\cos \alpha_{0i} = -\frac{l_{0j}^2 - l_{0i}^2 - l_{ij}^2}{2l_{0i}l_{ij}}; \quad (21)$$

$$\cos \alpha_{0j} = -\frac{l_{0i}^2 - l_{0j}^2 - l_{ij}^2}{2l_{0j}l_{ij}}. \quad (22)$$

7. Система уравнений равновесия узла 0 в случае действия ветровой нагрузки имеет следующий вид:

$$\begin{cases} -S_{0i} \cos \alpha_{0i} + S_{0j} \cos \alpha_{0j} + F_{\xi} = 0; \\ -S_{0i} \sin \alpha_{0i} - S_{0j} \sin \alpha_{0j} + F_{\eta} = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Решая систему уравнений (23), получим

$$S_{0i} = \frac{F_{\eta} \cos \alpha_{0j} + F_{\xi} \sin \alpha_{0j}}{\Delta}; \quad S_{0j} = \frac{F_{\eta} \cos \alpha_{0i} - F_{\xi} \sin \alpha_{0i}}{\Delta}, \quad (24)$$

где

$$\Delta = \cos \alpha_{0i} \sin \alpha_{0j} + \cos \alpha_{0j} \sin \alpha_{0i}. \quad (25)$$

По результатам решения системы уравнений (23) следует учитывать способность канатов работать только на растяжение, т. е., если $S_{0i} < 0$, то $S_{0i} = 0$ и $S_{0j} = F = \sqrt{F_{\xi}^2 + F_{\eta}^2} = \sqrt{P_z^2 + P_b^2}$ (рис. 7, а). И, наоборот, если $S_{0j} < 0$, то $S_{0j} = 0$ и $S_{0i} = \sqrt{P_z^2 + P_b^2}$ (рис. 7, б).

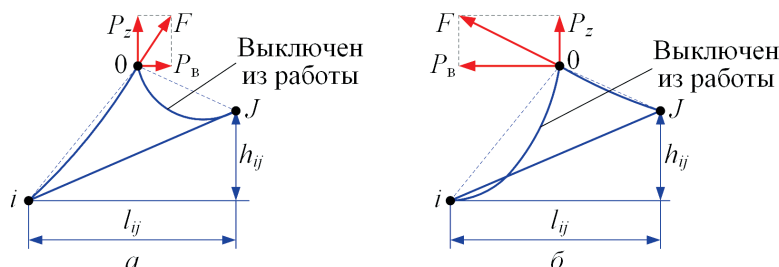


Рис. 7. Расчетная схема в случае работы одного каната из трех при направлении ветрового потока вверх (а) и вниз (б) относительно склона

Fig. 7. Calculation scheme in the case of one cable out of three working up (a) and down (б) towards the slope when directing the wind stream

После определения S_{01} , S_{02} , S_{03} усилия натяжения канатов в точке подвеса найдем по формуле (8).

Согласно разработанному алгоритму и исходным данным при испытаниях МТА-500 [3] выполним расчет нагрузок для канатов АКС по всей площади рабочего участка. При этом выберем максимальные показатели ветровой нагрузки $P_b = 20200$ Н, учитывая его положительное направление по оси x .

Для задания положения точки подвеса в плоскости x_0 используем принцип координат, где координаты x_0 , y_0 точки подвеса определяются по следующим формулам:

$$x_0 = L_1 x_1 + L_2 x_2 + L_3 x_3; \quad (26)$$

$$y_0 = L_1 y_1 + L_2 y_2 + L_3 y_3. \quad (27)$$

В итоге было рассмотрено 77 положений точки подвеса, показанных на рис. 8 разноцветными кружками (синий, красный, зеленый) и пронумерованных от 0 до 77.

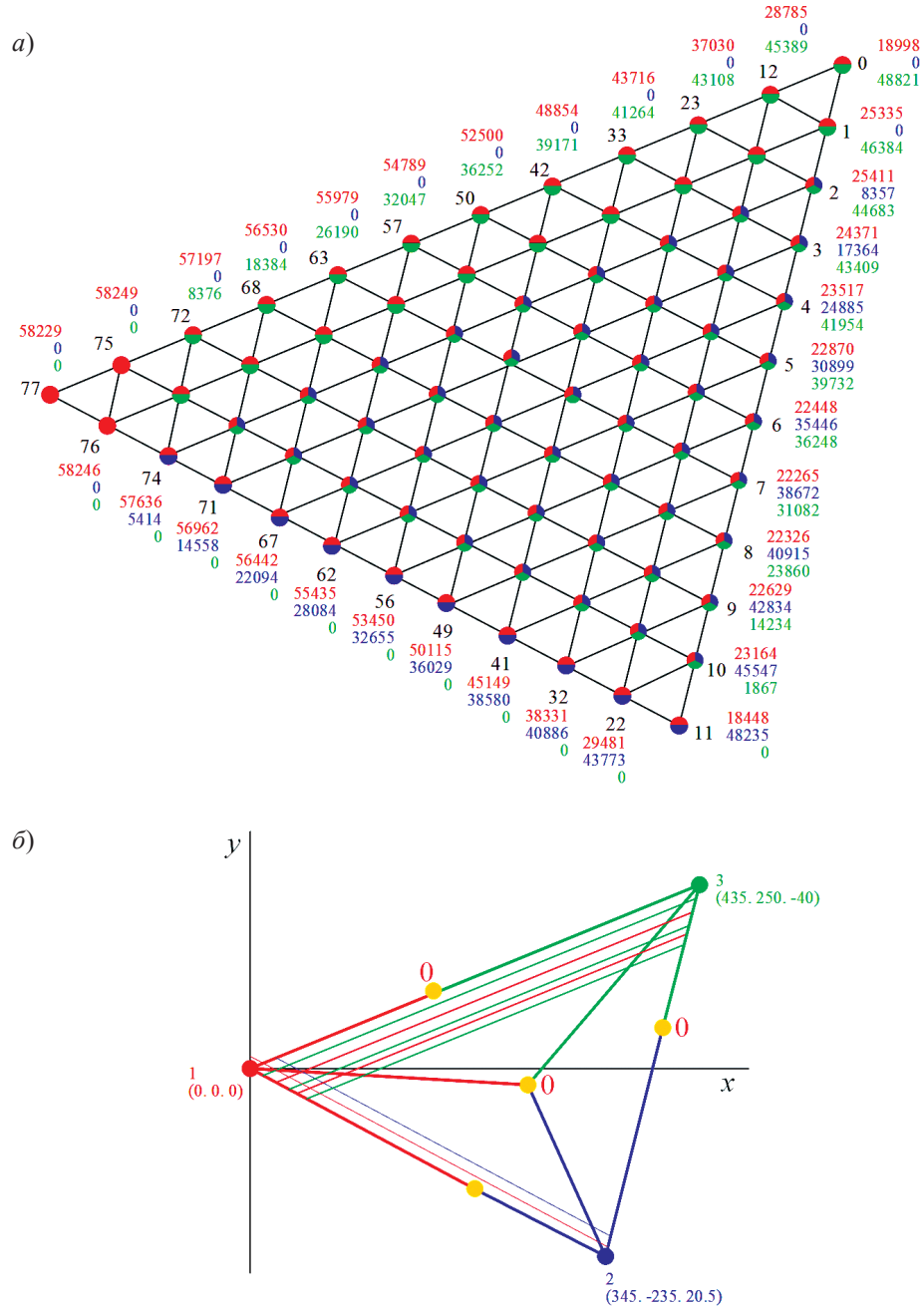


Рис. 8. Результаты расчетов тестового примера с учетом ветровой нагрузки: а – точки положения подвеса, отражающие взаимодействие канатов 01, 02, 03; б – проекция взаимодействия канатов (подъемная сила $P = 55\,090$ Н; ветровая нагрузка $P_w = 20\,200$ Н; высота точки подвеса $h = z_0 = 190$ м)

Fig. 8. The calculation results of the test case with allowances made for the wind load: а – suspension points reflecting the interaction of cables 01, 02, 03; б – projection of the cable interaction (lifting force $P = 55\,090$ N; wind load $P_w = 20\,200$ N; height of the suspension point $h = z_0 = 190$ m)

В полученных результатах координаты L_1, L_2 имеют значения от 0 до 1 с шагом 1/11. При этом

$$L_2 \leq 1 - L_1; \quad L_1 + L_2 + L_3 = 1.$$

Значения получившихся усилий показаны рядом с точками положения подвеса и выделены цветом (рис. 8, а), соответствующим цвету канатов 01, 02, 03 (рис. 8, б).

Рассмотрим следующие характерные ситуации.

При расположении точки подвеса над окрестностью лебедки 1 (точки 75, 76, 77 на рис. 8, а) работает только канат 01 (соответствующие кружки выделены красным цветом).

При движении точки подвеса по стороне 13 (рис. 8, б) и параллельной ей линии, соединяющей точки 1 и 76 (рис. 8, а), канат 02 выключен из работы, а внешнюю нагрузку воспринимают канаты 01 и 03 (соответствующие кружки выделены красным и зеленым цветами, а также красно-зеленой штриховкой).

При движении точки подвеса по стороне 12 уже канат 03 выключен из работы и внешнюю нагрузку воспринимают канаты 01 и 02 (соответствующие кружки выделены красным и синим цветами и штриховкой).

Во всех остальных случаях работают все три каната (соответствующие кружки выделены красным, зеленым и синим цветами).

Максимальное усилие в канате 01 наблюдается при расположении точки подвеса над т. 75, в канате 02 – над т. 11, в канате 03 – над т. 0 (соответствующие точки и значения усилий выделены жирным шрифтом).

При этом необходимо учитывать, что с увеличением длины подвески и, соответственно, высоты точки подвеса z_0 усилия в канатах АКС снижаются. Однако это отрицательно влияет на амплитуду колебаний грузовой подвески и ГЗМ, приводя к максимальным отклонениям от точки захвата груза. В связи с этим целесообразно проводить расчеты, позволяющие определять предельное увеличение длины подвески и высоты точки подвеса.

При работе одного каната усилие

$$S_{0i}^{\max} = S_{0i} |_{\xi_0=0} = S_{0i} |_{\xi_0=l} = \sqrt{P_z^2 + P_b^2}.$$

Таким образом, минимальное усилие, которое должен воспринимать канат, $F_{\text{пр}} = \sqrt{P_z^2 + P_b^2}$. При малой высоте подвески η_0 усилия в канатах могут оказаться больше $F_{\text{пр}}$. Поэтому определим такое значение η_0 , при котором усилия во всех канатах не больше $F_{\text{пр}}$.

Для этого построим серию графиков: $S_{0i} = S_{0i}(\xi_0, \eta_0)$; $S_{0j} = S_{0j}(\xi_0, \eta_0)$. График зависимости высоты точки подвеса η_0 (такой, что $S = F_{\text{пр}}$) от ее положения ξ_0 при $\beta = 90^\circ$ показан на рис. 9.

Далее, на рис. 10, приведен пример графического изложения результатов при заданных $l = l_{ij} = 100$ м и $\beta = 90^\circ$, где видно, что усилия в канатах можно регулировать высотой точки подвеса η_0 и всегда можно выбрать такую высоту, при которой усилия в канатах будут не больше $F_{\text{пр}}$.

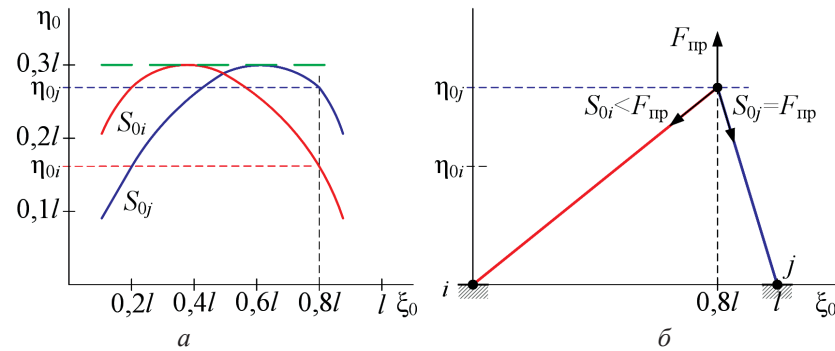


Рис. 9. Зависимость высоты точки подвеса η_0 (такой, что $S = F_{np}$) от ее положения ξ_0 при $\beta = 90^\circ$: a – при движении каната вдоль стороны $0i$ и $0j$; b – усилия S_{0j} и S_{0i} соответствуют сторонам $0i$ и $0j$

Fig. 9. The dependence of the suspension point height η_0 (such as $S = F_{np}$) on its position ξ_0 at $\beta = 90^\circ$: a – when the cable moves along the sides $0i$ and $0j$; b – the forces S_{0j} and S_{0i} correspond to the sides $0i$ and $0j$

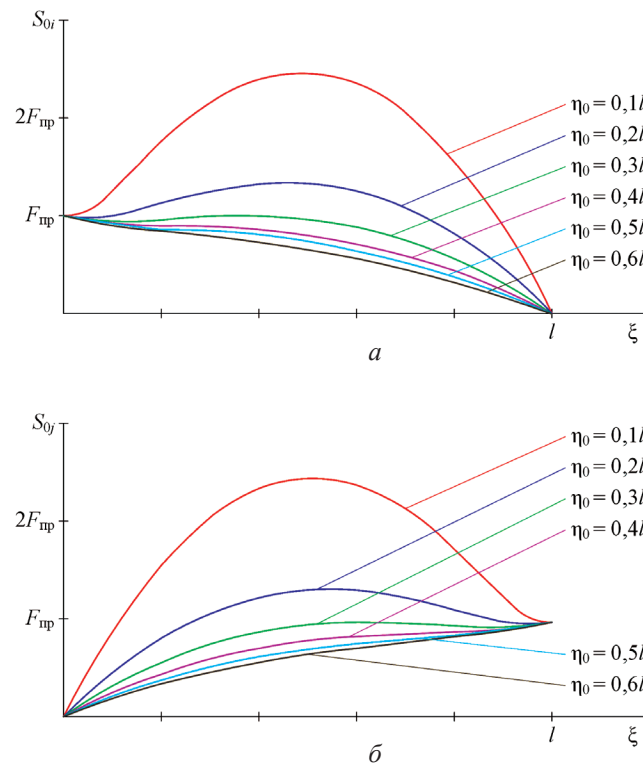


Рис. 10. Зависимость усилий в канатах от расположения точки подвеса при $\beta = 90^\circ$: a – сторона $0i$; b – сторона $0j$

Fig. 10. The dependence of the forces in the cables on the location of the suspension point at $\beta = 90^\circ$: a – side $0i$; b – side $0j$

Таким образом, для определения высоты точки подвеса следует:

1. Найти $\eta_0^{\max}$, при которой усилия в канатах меньше F_{np} , меняя положение ξ_0 точки подвеса и ветровую нагрузку.
2. Принять высоту точки подвеса больше $\eta_0^{\max}$, что обеспечит с запасом условия $S_{0i} \leq F_{np}$, $S_{0j} \leq F_{np}$.

В ситуации, когда требуется найти высоту точки подвеса для трехмерного случая, выполним увеличение высоты точки подвеса с некоторым (заранее заданным) шагом, меняя направление ветра и расположение точки подвеса. При этом определим высоту точки подвеса z_0 , при которой усилия во всех

канатах не превышают $F_{пр}$. Допускаемая высота подвеса будет больше либо равна максимальной, установленной в п. 1.

В результате выполнения п. 1, получим три поверхности. Проведем горизонтальную плоскость в уровне z_0^{max} , касающуюся в верхней точке поверхности, расположенной выше остальных (см. верхнюю пунктирную линию на рис. 9, а). Тогда минимально допустимая высота точки подвеса $z_0 \geq z_0^{max}$.

Ниже приведем описание алгоритма реализации программы, позволяющей определять зависимость усилий в канатах от расположения точки подвеса.

Предварительно зададим:

$$z^{min} = \min \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} - \text{минимальная высота точки подвеса (начальное приближение);}$$

жение);

Δh – шаг увеличения высоты точки подвеса (чем меньше шаг, тем точнее результат);

$\Delta \alpha$ – шаг изменения угла направления ветра $\alpha = 0, \Delta \alpha, 2 \Delta \alpha, 3 \Delta \alpha, \dots, 2\pi$ (чем меньше шаг, тем точнее результат);

P_b – максимальная ветровая нагрузка;

P – подъемная сила;

n – число дискретных значений L_1 – координаты (чем больше n , тем точнее результат).

При задании $F_{пр}$ следует принять ветровую нагрузку максимальной.

1. Цикл по z_0 .

1.1. $z_0 := z^{min}$.

2. Цикл по направлению ветровой нагрузки.

2.1. $\alpha := 0$; $P_{bx} = P_b \cos \alpha$; $P_{by} = P_b \sin \alpha$.

2.2. $P_{bx} = P_b \cos \alpha$; $P_{by} = P_b \sin \alpha$.

3. Циклы по местоположению подвески.

3.1. $L_1 := 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, 1$; $L_2 := 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, 1 - L_1$; $L_3 := 1 - L_1 - L_2$.

3.2. Определение координат x_0, y_0 текущего положения точки подвеса.

3.3. Определение усилий R_{01}, R_{02}, R_{03} по алгоритму, описанному выше.

3.4. Определение максимального усилия R^{max} .

2.3. Если $\alpha < 2\pi$, то $\alpha := \alpha + \Delta \alpha$ и переход к п. 2.2.

1.2. Если $R^{max} > F_{пр}$, то $z_0 = z_0 + \Delta h$ и переход к п. 2.

Иначе ВЫВОД z_0 и STOP.

Зная предельные параметры длины грузовой подвески и распределение нагрузок в канатах АКС по всей площади рабочего участка, приступим к определению размеров недоступной зоны и, соответственно, внешних контуров эксплуатационного участка.

В присутствии ветровой нагрузки, направленной в сторону лесосеки, усилие в одном из канатов (или даже в двух) оказывается равным 0, исходя из этого система работающих канатов (см. рабочую плоскость на рис. 5) поворачивается так, что оказывается параллельной силе P^* . В экстремальном случае,

когда ветровая нагрузка перпендикулярна стороне ij , плоскость $ij0$ оказывается наклоненной к горизонтальной плоскости на угол $\beta = \arctg \frac{P}{P_B}$, определяя тем самым основную расчетную схему согласно рис. 11.

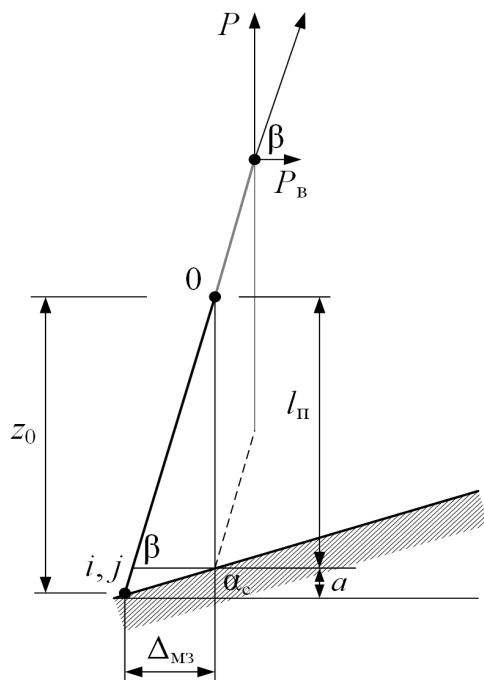


Рис. 11. Расчетная схема для определения размеров недоступной зоны $\Delta_{мз}$: $l_{п}$ – длина грузовой подвески; α_c – угол наклона поверхности деляны (локальный угол склона); $\Delta_{мз}$ – размер недоступной зоны
 Fig. 11. Calculation scheme for determination of sizes of the inaccessible zone $\Delta_{мз}$: $l_{п}$ – suspension length; α_c – angle of surface inclination of the plot (slope local angle); $\Delta_{мз}$ – size of the inaccessible zone

Полагаем длину грузовой подвески заданной. Натягивая канаты (канат), опустим точку подвеса так, чтобы подвеска с ГЗМ коснулась склона.

Из рис. 11 ясно, что $\operatorname{tg} \beta = \frac{P}{P_B} = \frac{z_0}{\Delta_{мз}}$; $\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{a}{\Delta_{мз}}$.

Тогда размер $a = z_0 - l_{п} = \Delta_{мз} \operatorname{tg} \beta - l_{п}$, с другой стороны – $a = \Delta_{мз} \operatorname{tg} \alpha_c$. Следовательно, $\Delta_{мз} \operatorname{tg} \alpha_c = \Delta_{мз} \operatorname{tg} \beta - l_{п}$.

Откуда размер недоступной зоны

$$\Delta_{мз} = \frac{l_{п}}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha_c}. \quad (28)$$

Отметим, что $\Delta_{мз} = \Delta_{мз}^{\max}$, если ветровая нагрузка направлена в сторону $\alpha_c^{\max}$.

При известном положении деляны и особенностях рельефа (характерные локальные углы склона) следует подсчитать размеры $\Delta_{мз}$ и установить лебедки так, чтобы территория деляны не попадала в недоступную зону (рис. 12).

Остановимся на этом подробнее. Предположим, что максимальная величина $\Delta_{мз}$ оказалась на стороне 13. Определим расстояние d от противоположной вершины треугольника до указанной стороны.

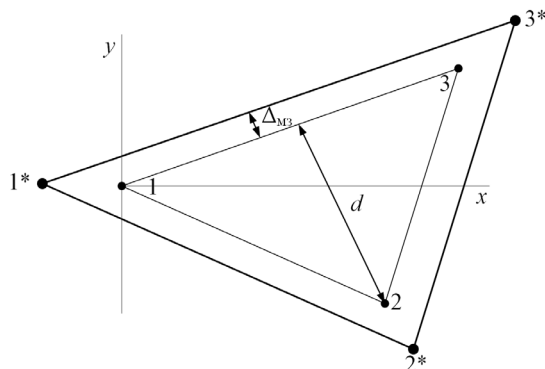


Рис. 12. Расчетная схема для определения точек установки лебедок

Fig. 12. Calculation scheme for determination of the setting points of winches

Зададим направляющий вектор стороны 13:

$$v_{13} = \begin{pmatrix} |x_3 - x_1| \\ |y_3 - y_1| \\ |z_3 - z_1| \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Найдем векторное произведение:

$$v_{12} = v_{13} \times \begin{pmatrix} |x_2 - x_1| \\ |y_2 - y_1| \\ |z_2 - z_1| \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Соответственно, искомая величина

$$d = \frac{\sqrt{v_{12}^T v_{12}}}{\sqrt{v_{13}^T v_{13}}}. \quad (31)$$

Далее, согласно расчетным схемам на рис. 11 и 12, определим отношение

$$\gamma = \frac{d + \frac{\Delta_{M3}}{\cos \alpha_c}}{d}. \quad (32)$$

Используя расчетную схему на рис. 12, найдем координаты точек 1^* , 2^* , 3^* :

$$x_i^* = x_i - (x_c - x_i)(\gamma - 1); \quad (33)$$

$$y_i^* = y_i - (y_c - y_i)(\gamma - 1), \quad (i = 1, 2, 3), \quad (34)$$

где

$$x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}; \quad y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}. \quad (35)$$

Координаты z_i^* определим из уравнения плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$, проходящей через точки 1, 2, 3:

$$z_i^* = -\frac{1}{C}(Ax_i^* + By_i^* + D). \quad (36)$$

Тем самым оказываются установленными координаты лебедок $1^*(x_1^*, y_1^*, z_1^*)$, $2^*(x_2^*, y_2^*, z_2^*)$, $3^*(x_3^*, y_3^*, z_3^*)$.

Приведем *пример расчета* для участка с ситуацией, рассмотренной выше и представленной ранее на рис. 9. Пусть максимальная ветровая нагрузка $P_B = 20\,200\text{ Н}$ перпендикулярна стороне 13. Подъемная сила $P = 55\,090\text{ Н}$. Максимальный локальный угол склона на стороне 13 примем $\alpha_c = 30^\circ$, длину подвески – $l_{\Pi} = 150\text{ м}$. Тогда

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\beta &= \frac{P}{P_B} = 2,727; \Delta_{\text{мз}} = \frac{l_{\Pi}}{\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha_c} \approx 70\text{ м}; v_{13} = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 435 \\ 250 \\ -40 \end{pmatrix}; \\ v_{12} &= v_{13} \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 435 \\ 250 \\ -40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 345 \\ -235 \\ 20,5 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 435 & 250 & -40 \\ 345 & -235 & 20,5 \end{vmatrix} = \\ &= i \begin{vmatrix} 250 & -40 \\ -235 & 20,5 \end{vmatrix} - j \begin{vmatrix} 435 & -40 \\ 345 & 20,5 \end{vmatrix} + k \begin{vmatrix} 435 & 250 \\ 345 & -235 \end{vmatrix} = -4275i - 22717,5j - 188475k. \end{aligned}$$

Найдем расстояние от вершины 2 треугольника 123 до стороны 13:

$$d = \frac{\sqrt{v_{12}^T v_{12}}}{\sqrt{v_{13}^T v_{13}}} = \frac{\sqrt{\begin{pmatrix} -4275 & -22715,5 & 188475 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -4275 \\ -22715,5 \\ 188475 \end{pmatrix}}}{\sqrt{\begin{pmatrix} 435 & 250 & -40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 435 \\ 250 \\ -40 \end{pmatrix}}} = \frac{189\,887}{503,3} = 377,3\text{ м}.$$

С учетом коэффициента пропорционального увеличения имеем:

$$\gamma = \frac{d + \frac{\Delta_{\text{мз}}}{\cos\alpha_c}}{d} = \frac{377,3 + \frac{70}{\cos 30^\circ}}{377,3} = 1,21.$$

Положение центра тяжести треугольника на горизонтальной плоскости:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} = \frac{0 + 345 + 435}{3} = 260\text{ м}; \\ y_c &= \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} = \frac{0 + (-235) + 250}{3} = 5\text{ м}. \end{aligned}$$

Координаты x, y лебедок:

$$x_1^* = x_1 - (x_c - x_1)(\gamma - 1) = 0 - (260 - 0)(1,21 - 1) = -55,00\text{ м};$$

$$y_1^* = y_1 - (y_c - y_1)(\gamma - 1) = 0 - (5 - 0)(1,21 - 1) = -1,06 \text{ м};$$

$$x_2^* = x_2 - (x_c - x_2)(\gamma - 1) = 345 - (260 - 345)(1,21 - 1) = 362,98 \text{ м};$$

$$y_2^* = y_2 - (y_c - y_2)(\gamma - 1) = -235 - (5 - (-235))(1,21 - 1) = -285,77 \text{ м};$$

$$x_3^* = x_3 - (x_c - x_3)(\gamma - 1) = 435 - (260 - 435)(1,21 - 1) = 472,02 \text{ м};$$

$$y_3^* = y_3 - (y_c - y_3)(\gamma - 1) = 250 - (5 - 250)(1,21 - 1) = 301,83 \text{ м}.$$

Уравнение плоскости, проходящей через точки 1, 2, 3:

$$Ax + By + Cz + D = 4275x + 22717,5y + 188475z + 0 = 0.$$

Координаты z лебедек:

$$z_1^* = -\frac{1}{C}(Ax_1^* + By_1^* + D) = -\frac{1}{188475}(4275 \cdot (-55,00) + 22717,5 \cdot (-1,06) + 0) = 1,38 \text{ м};$$

$$z_2^* = -\frac{1}{C}(Ax_2^* + By_2^* + D) = -\frac{1}{188475}(4275 \cdot 362,98 + 22717,5 \cdot (-285,77) + 0) = 26,21 \text{ м};$$

$$z_3^* = -\frac{1}{C}(Ax_3^* + By_3^* + D) = -\frac{1}{188475}(4275 \cdot 472,02 + 22717,5 \cdot 301,83 + 0) = -47,09 \text{ м}.$$

В итоге имеем такие координаты точек расположения лебедек $1^*(x_1^*, y_1^*, z_1^*)$, $2^*(x_2^*, y_2^*, z_2^*)$, $3^*(x_3^*, y_3^*, z_3^*)$, что контур рабочего участка с вершинами $1(x_1, y_1, z_1)$, $2(x_2, y_2, z_2)$, $3(x_3, y_3, z_3)$ лежит вне пределов недоступной зоны.

Заключение

Разработанный алгоритм для определения оптимальных размеров внешнего контура лесоэксплуатационного участка позволяет: обеспечить распределение нагрузок между тремя тягово-возвратными канатами АКС, тем самым повысить управляемость и устойчивость системы в целом, а соответственно, гарантировать доступность грузозахватного механизма в любой точке обрабатываемого лесоэксплуатационного участка за счет устранения нерабочих зон.

Предложенная методика расчета была преобразована в компьютерную программу, которая учитывает влияющие факторы: температуру воздуха, высоту нахождения аэростата над уровнем моря, направление и скорость ветрового потока, рельефные условия на обрабатываемом участке, длину грузового каната, расстояние трелевки, геометрические размеры участка. Результаты работы программы могут быть приведены как в табличном, так и в графическом виде, представляя обрабатываемый участок с последовательностью критических точек и возможной корректировкой правильного размещения лебедек или контурных блоков, что дает возможность манипулировать нагрузками в канатах и одновременно определять оптимальные внешние контуры участка.

Полученные результаты позволяют повысить эффективность использования и достичь лучшей производительности аэростатно-канатных систем за счет точности наведения грузозахватного механизма и минимизации нагрузок на тягово-возвратные канаты аэростатной трелевочной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В. Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2013. № 1(93). С. 5–9. [Abuzov A.V. Technical and Design Features of the Modern Aero Statelty Rope System of Delivery of Wood. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 1(93), pp. 5–9].
2. Абузов А.В. Методика определения усилий, возникающих в канатах трехлинейной аэростатно-канатной транспортной системы // Лесотехн. журн. 2014. № 3. С. 140–153. [Abuzov A.V. Method of Determining the Forces Arising in the Ropes of Trilinear Balloon-Cable Transport System. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 3(15), pp. 140–153]. DOI: [10.12737/6278](https://doi.org/10.12737/6278)
3. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 199 с. [Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Balloon Transport for Mountain Logging in the Far East*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p.].
4. Буткин В.Д. Аэростатно-канатные транспортные системы для открытых горных работ // Горн. журн. № 6. 1998. С. 56–57. [Butkin V.D. Balloon Cable Transport Systems for Surface Mining. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 1998, no. 6, pp. 56–57].
5. Волков Е.С., Плютов Ю.А. Результаты испытаний гравитационной аэростатно-канатной транспортной установки // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докл. VIII междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Екатеринбург: УГТУ, 2010. С. 20–22. [Volkov E.S., Plyutov Yu.A. Test Results of Gravitational Balloon Cable Transport Installation. *Technological Equipment for the Mining and Oil and Gas Industry: Collection of Reports of the 8th International Science and Technology Conference. Readings in Memory of V.R. Kubachek*. Yekaterinburg, USTU Publ., 2010, pp. 20–22].
6. Козловский В.Б., Худоленко О.В., Деревянко В.С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздуш. трансп., 2007. 480 с. [Kozlovsky V.B., Khudolenko O.V., Derevyanko V.S. *Balloon Aircrafts for Economic Sectors*. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2007. 480 p.].
7. Луценко Е.В., Кравец А.Д., Рябухин П.Б. Новая технология использования аэростатно-канатных систем // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. Вып. 25. Брянск: БГИТА, 2010. С. 163–166. [Lutsenko E.V., Kravets A.D., Ryabukhin P.B. A New Technology of Using Balloon Cable Systems. *Current Issues of the Forest Complex. Collection of Academic Papers Further to the International Science and Technology Conference*. Bryansk, BGITA Publ., 2010, iss. 25, pp. 163–166].
8. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях». Ч. 1, 2. Химки: ЦНИИМЭ, 1985. 189 с. [Research Report “Study of the Possibilities of Using Aircrafts for Logging in Mountains”. Parts 1, 2. Khimki, TsNIIME Publ., 1985. 189 p.].
9. Отчет об испытаниях аэростата-крана ЭПАК-1. М.: МПНСУ «Центротехмонтаж», 1977. 50 с. [Test Report of the Aerostat Crane EPAC-1. Moscow, MPNSU Tsentrotekhmontazh Publ., 1977. 50 p.].
10. Родионов В.И., Скобей В.В. Статический расчет тягово-удерживающих канатов аэростатно-трелевочной установки (АТУП) // Тр. ЦНИИМЭ. М., 1966. № 75. С. 113–126. [Rodionov V.I., Skobey V.V. Static Analysis of Tether Line Cables of a Balloon Logging System. *Academic Papers of the Central Research and Design Institute of Mechanization and Energy of the Forest Industry*. Moscow, 1966, no. 75, pp. 113–126].

11. Сухинин В.Н. Определение некоторых параметров аэростатной трелевочной установки // Тр. Краснодар. политехн. ин-та. 1970. № 22. С. 85–95. [Sukhinin V.N. Determination of Some Parameters of a Balloon Logging System. *Academic Papers of the Krasnodar Polytechnic Institute*. 1970, no. 22, pp. 85–95].
12. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2040. DOI: [10.2514/1.43332](https://doi.org/10.2514/1.43332)
13. Avery R.B. *Mathematical Model for Determining the Position and Line Tensions for a Tethered Logging Balloon*. Corvallis, OR, Oregon State University, 1984. 78 p.
14. Avery R.B. Pendulum-Swing Balloon Logging: Developing and Applying a Static Lift Prediction Model. *Forest Products Journal*, 1986, vol. 36(3), pp. 17–22.
15. *Balloon Logging Systems. Phase I – Analytical Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 110 p.
16. *Balloon Logging Systems. Phase II – Logistics Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 171 p.
17. Graeter W.F. *Tethered Balloon Transport Systems: A Proposal*. MS Thesis. Monterey, CA, Naval Postgraduate School, 1978. 229 p.
18. Lambert C. *Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System*. PhD Thesis. Monreal, Canada, McGill University, 2006. 164 p.
19. Lambert C., Nahon M. An Aerostat Positioning System with Cable Control. *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6–11, 2008*. Seoul, Korea, 2008, pp. 779–784. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.2912
20. Lambert M.B., Hoke D., Bergstrom G. Lighter-Than-Air Logging under Multiple-Tethered Ground Control. *Proceeding of the International Mountain Logging and Eighth Pacific Northwest Skyline Symposium, Bellevue, Washington, December 14–16, 1992*. Bellevue, WA, 1992. pp. 108–120.

METHODOLOGY FOR SIZING THE EXTERNAL BORDERS OF CUTTING AREAS WHEN THEIR DEVELOPMENT BY BALLOON CABLE SYSTEMS

A.V. Abuzov, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

P.B. Ryabukhin, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, P.Ryabukhin@mail.khstu.ru

Currently, the issue of introducing technologies that meet modern environmental requirements into the logging process is put into sharp relief in the forest industry. Such technologies can include air transport, in particular balloon installations, the introduction of which requires further research relating to the influence of weather and landscape conditions on the operation process. The article presents the results of practical and theoretical studies aimed at improving the functionality of balloon logging systems while processing forest areas of different configuration. It was found that the wind load influence is the crucial factor, which adversely affects the balloon as well as haulback line cables. We have developed a methodology and a computer program for determining the dimensions of the external borders of the operational forest area, which allow to install ground winches or border units of the cable system at a distance that provides access to previously inaccessible points of the forest area for the load-gripping mechanism. The output of the program can be represented in the tabular and the graphical forms, which makes it possible to manipulate the loads in the cables and, simultaneously, find the overall dimensions of the external borders of the site. The developed

algorithm for determining the optimal dimensions of the external borders of the forest exploitation site allows to provide load distribution between the three haulback line cables of the balloon cable system. This will increase the handling and stability of the entire system, and, respectively, ensure the availability of the load gripping mechanism at any point of the processed forest exploitation site by eliminating non-operating zones.

For citation: Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Methodology for Sizing the External Borders of Cutting Areas when Their Development by Balloon Cable Systems. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 81–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-81-100

Keywords: balloon logging, balloon cable system, cable tension, borders of a cutting area, perimeter of a cutting area.

Поступила 21.06.19 / Received on June 21, 2019

УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ПОЧВОГРУНТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ

С.Е. Рудов¹, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

В.Я. Шапиро², д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

О.А. Куницкая³, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

О.И. Григорьева², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva_o@list.ru

³Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Заготовка древесины в лесах криолитозоны становится все более актуальной для Российской Федерации, что связано с истощением доступных запасов спелых эксплуатационных лесов в южной и центральной Сибири, Бурятии, Хабаровском крае при одновременном развитии деревообрабатывающих предприятий в Дальневосточном федеральном округе. При эксплуатации современных лесных машин, в частности колесных форвардеров, особую актуальность приобретают вопросы их эффективности, в первую очередь проходимости и технологической производительности, в конкретных производственных и геотехнических условиях. Эти обстоятельства в сочетании с необходимостью минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигают проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному волоку в разряд наиболее актуальных. Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах. В первом случае в массиве почвогрунта в достаточно большом объеме присутствует лед, оказывающий существенное влияние на повышение его несущей способности под действием начальной вертикальной нагрузки трелевочной системы. Во втором случае при оттаивании мерзлого почвогрунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем ослабевают природные связи между твердыми частицами, а его физико-механические свойства утрачивают исходные значения. Форвардер образует колею в непосредственной зоне контакта колеса с почвогрунтом. Чем больше размер этой зоны, тем большие усилия передаются на почвогрунт для реализации необходимой тяги. Разработанная нами математическая модель расчета параметров процесса разрушения массива оттаивающего почвогрунта на границе с зоной мерзлоты позволяет на стадии проектных решений производить оценку предполагаемых значений глубины образованной колеи с учетом технических возможностей форвардеров и их маневрирования в конкретных производственных условиях.

Для цитирования: Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов

при воздействии трелевочной системы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117.
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117

Ключевые слова: мерзлый почвогрунт, лесозаготовка, трелевочная система, уплотнение и деформация почвогрунта.

Введение

Вредное воздействие лесных машин на экосистемы лесосек через уплотнение и деформацию почвогрунтов широко известно [8, 11, 12, 15–17, 19, 20]. Леса криолитозоны являются особо ранимыми. Они произрастают в характерных суровых природных условиях, отличаются небольшим годичным приростом и крайне бедной биотой плодородного слоя почвогрунта [3].

При эксплуатации современных лесных машин, в частности колесных форвардеров, особую актуальность приобретают вопросы их эффективности, в первую очередь проходимости и технологической производительности, в конкретных производственных и геотехнических условиях. Эти обстоятельства в сочетании с необходимостью минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигают проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному волоку в разряд наиболее актуальных.

Результаты исследований [4] свидетельствуют, что однократный проход трелевочной системы даже при невысоком среднем давлении на грунт (не более 47 кПа) приводит к отдельным разрывам сплошного массива, двукратный – разрушает до 30 % объема контактного слоя, а трехкратный – до 80 %. Для конкретного почвогрунта предел прочности на растяжение (σ_p) в среднем в 5–10 раз меньше предела прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$) и в 2–5 раз меньше предела прочности на сдвиг ($\sigma_{сд}$).

Это обусловлено тем, что при растяжении за счет разрыва структурных связей развиваются необратимые предельные деформации, тогда как при сжатии и сдвиге некоторая часть структурных связей оказывает сопротивление внешней нагрузке, массив почвогрунта может деформироваться, не разрушаясь. В связи с этим растягивающие напряжения являются одним из существенных факторов разрушения массива почвогрунта с образованием в нем трещин разрыва.

Цель исследования – разработать математическую модель расчета параметров процесса разрушения массива оттаивающего почвогрунта на границе с зоной мерзлоты, которая позволит на стадии проектных решений производить оценку глубины образованной колеи с учетом технических возможностей форвардеров и их маневрирования в конкретных производственных условиях.

Объекты и методы исследования

Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах.

В первом случае в массиве почвогрунта в достаточно большом объеме присутствует лед, оказывающий существенное влияние на повышение несущей способности почвогрунта под действием начальной вертикальной нагрузки (q_0 , кПа) трелевочной системы. Во втором случае при оттаивании мерзлого

почвогрунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем ослабевают природные связи между твердыми частицами, а физико-механические свойства почвогрунта утрачивают исходные значения.

При этом, если действующие напряжения приведут к образованию трещин разрыва, то свободная вода будет интенсивно их заполнять вплоть до границы с мерзлым грунтом, практически нулевая водопроницаемость которого обусловит наличие воды на границе с оттаивающим почвогрунтом, что вызовет повышение его общей влажности (W), снижение сцепления (C) и угла внутреннего трения (φ), т. е. и несущей способности в целом. Этот вывод подтверждается данными исследований [7], результаты которых представлены в табл. 1

Таблица 1

Характеристика грунтов оттаявших и талых на границе оттаивания

Грунт	$W, \%$	Оттаивающий грунт		Талый грунт	
		$C, \text{кПа}$	$\varphi, \dots^\circ$	$C, \text{кПа}$	$\varphi, \dots^\circ$
Песок	8	10	34	2	30
	17	8	32	1	28
	32	4	23	0	17
Супесь	15	21	19	16	17
	17	14	17	8	15
	23	7	16	5	11
Суглинок	15	20	24	16	22
	20	17	21	12	18
	28	8	17	4	12
Глина	20	30	15	22	16
	29	20	13	14	12
	44	11	12	6	10

Как видно из табл. 1, если угол φ в массиве почвогрунта и на границе с мерзлотой изменяется незначительно (отличие не более 7...13 %), то сцепление для песков снижается в 5 раз, для остальных видов грунта – в среднем на 25...35 %.

Технологические требования по ограничению грузоподъемности форвардера и снижению усилий сопротивления его движению обуславливают максимально допустимую глубину колеи (h_k), которая после первого прохода не должна превышать заданного значения $h_k \leq 0,10$ м. Если в мерзлых почвогрунтах это ограничение в большинстве случаев выполняется, то в оттаивающих почвогрунтах наблюдается существенное превышение данного показателя: $h_k = 0,25...0,30$ м и более.

Форвардер образует колею в непосредственной зоне контакта колеса с почвогрунтом. Чем больше размер этой зоны, тем большие усилия передаются на почвогрунт для реализации необходимой тяги.

Горизонтальное усилие подачи можно использовать для того, чтобы преодолеть усилие сопротивления движению и реализовать необходимую тягу. Максимальная тяга и обусловленная этим сила поверхностного трения оказывают влияние на сопротивление грунта сдвигу τ , которое зависит от действующей нормальной (вертикальной) нагрузки q , сцепления C и угла φ в соответствии с обобщенным уравнением Кулона–Мора:

$$\tau = C + q \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

Считаем, что глубина зоны оттаивания H , м. За ее пределами мерзлый почвогрунт представляет собой весьма твердое водонепроницаемое основание. Очевидно, что физико-механические свойства почвогрунта в пределах и за пределами этой зоны существенно отличаются друг от друга. Интегральной характеристикой этого отличия может служить величина модуля общей деформации (E , МПа).

В работе [13] для трех категорий почвогрунтов в достаточно широком диапазоне изменений их физико-механических свойств получены корреляционные соотношения между параметрами C , φ , H и E :

$$C = 10,774E^{0,7737}; \quad \varphi = 13,669E^{0,1818}; \quad H = 0,4714E^{-0,479}. \quad (2)$$

При этом для слабых почвогрунтов (первая категория) принимаем $E = 0,4$ МПа, для средних (вторая категория) – $E = 1,0$ МПа, для крепких (третья категория) – $E = 3,0$ МПа. Показатели E для мерзлых грунтов существенно отличаются от этих значений в большую сторону. Так, по данным [1] для мерзлой пылеватой супеси при внешнем давлении $q_0 = 100...700$ кПа и влажности $W = 28...29$ % величина модуля E зависит от температуры T : для $T = -0,3$ °C модуль $E = 5,7...8,2$ МПа; для $T = -1,4$ °C – $9,2...18,5$ МПа; для $T = -3,6$ °C – $14,7...24,0$ МПа. При таких значениях E сцепление C увеличивается до 100 кПа и более, а глубина H становится менее 0,10 м.

Анализ представленных в [1] графических данных свидетельствует о существенном влиянии влажности на характеристики упругих свойств мерзлого почвогрунта: при $W = 10...30$ % модуль упругости E_y возрастает, после чего в результате перенасыщения почвогрунта влагой происходит резкое его снижение на 40...50 %. Модуль общей деформации E также испытывает на себе подобное влияние параметра W . Отмечается, что мерзлые грунты существенно отличаются от талых и оттаивающих грунтов именно по значениям модулей E_y и E , когда несущая способность грунта превысит прочность создаваемых в них фундаментов.

Как следует из (1), предельное сопротивление почвогрунта сдвигу зависит от нормального давления, т. е. от внешней нагрузки на почвогрунт, которую создает трелевочная система, при этом диапазон ее грузоподъемности в общем случае является случайной величиной, определяемой параметрами пачки леса [11].

В табл. 2 приведены характеристики некоторых форвардеров с указанием достигаемых начальных значений действующей нормальной (вертикальной) нагрузки q_0 под колесными парами, которые будем принимать за соответствующие штампы 1 и 2.

Таблица 2

Характеристики трелевочных систем и их давление на грунт

Трелевочная система	Нагрузка (масса) P , т	Давление q_0 , кПа	
		Штамп 1 / число колесных пар	Штамп 2 / число колесных пар
I. 4-колесная	15	68 / 1	80 / 1
II. 6-колесная	16	72 / 1	40 + 40; 27 / 3
III. 8-колесная	19	35 / 2	58 / 2
IV. 10-колесная	20	35 / 2	37 / 3

Эксплуатация 8–10-колесных трелевочных систем с использованием гусениц при $P = 19...20$ т создает давление $q_0 = 35...37$ кПа, что более чем в 2 раза

меньше действующих давлений $q_0 = 68 \dots 80$ кПа при применении 4–6-колесных систем без гусениц. Надо отметить, что наличие последних в 6-колесной системе снижает давление с 40 до 27 кПа, т. е. на 33 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценим сопротивление грунта на сдвиг τ в зависимости от начальных давлений q_0 с учетом влажности W .

Поскольку сопротивление сдвигу τ является одним из критериев разрушения массива, а с учетом соотношения (1) и данных табл. 1 это величина переменная, то по мере увеличения глубины колеи и ее приближения к границе с мерзлым почвогрунтом представляет интерес дать обобщенную количественную оценку влияния W на величину τ .

С этой целью данные табл. 1 для двух видов мерзлых грунтов (супеси и суглинка) представим в безразмерном виде, где за базу отсчета (масштабную единицу) примем данные при минимальной влажности $W = 15$ %.

Результаты расчетов отражены на рис. 1, где на оси абсцисс – относительная влажность $\bar{W}$, на оси ординат – относительное сцепление $\bar{C}$ (кривая 1) и относительный угол $\bar{\varphi}$ (кривая 2) для всей совокупности данных как внутри оттаивающего массива, так и на его границе с мерзлым грунтом.

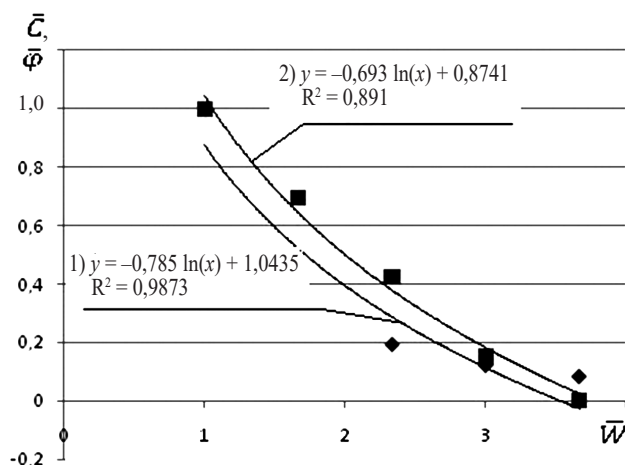


Рис. 1. Изменение сцепления $\bar{C}$ и угла $\bar{\varphi}$ с ростом влажности $\bar{W}$ почвогрунта: 1 – $\bar{C}(\bar{W})$; 2 – $\bar{\varphi}(\bar{W})$

Fig. 1. The change in relative adhesion ($\bar{C}$) and relative angle of internal friction ($\bar{\varphi}$) with rising relative humidity ($\bar{W}$) of soil: 1 – $\bar{C}(\bar{W})$; 2 – $\bar{\varphi}(\bar{W})$

Анализ рис. 1 показал, что поведение графиков безразмерных величин $\bar{C}(\bar{W})$ и $\bar{\varphi}(\bar{W})$ совпадает. Это дает возможность производить адекватные расчеты в абсолютных единицах. Переход к абсолютным значениям W , C и φ с учетом начальных давлений q_0 позволил получить графические зависимости снижения предела прочности τ с ростом влажности W (рис. 2), которые с высокой достоверностью описываются экспоненциальными зависимостями:

$$\tau = k_1 e^{-k_2 W}. \quad (3)$$

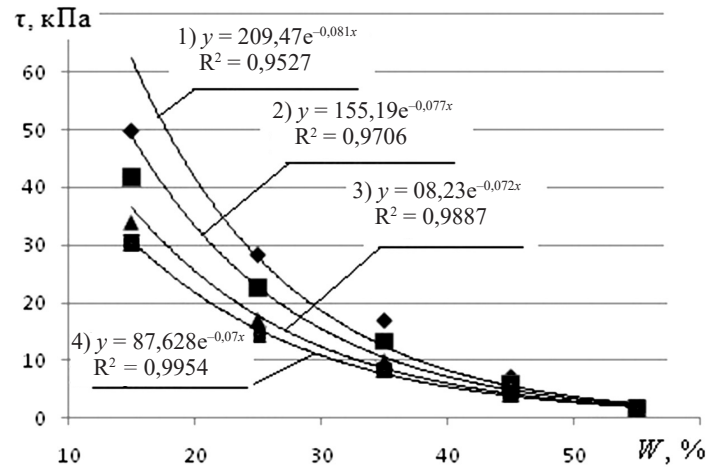


Рис. 2. Зависимость предела прочности τ от влажности W при начальном давлении q_0 : 1 – 80 кПа; 2 – 58 кПа; 3 – 37 кПа; 4 – 27 кПа

Fig. 2. The dependence of shear resistance (τ) on humidity (W) at initial vertical load (q_0): 1 – 80 kPa; 2 – 58 kPa; 3 – 37 kPa; 4 – 27 kPa

Как видно из рис. 2, с высокой достоверностью ($R^2 \geq 0,95$) для коэффициентов k_i , входящих в (3), можно принять:

$$k_1 = 2,2q_0 + 30,64; \quad k_2 \approx 0,075, \quad (4)$$

что позволяет производить расчет τ как функции двух переменных – q_0 и W :

$$\tau = (2,2q_0 + 30,64)e^{-0,075W}. \quad (5)$$

На рис. 3 представлен график двумерной функции $\tau = \tau(W, q_0)$.

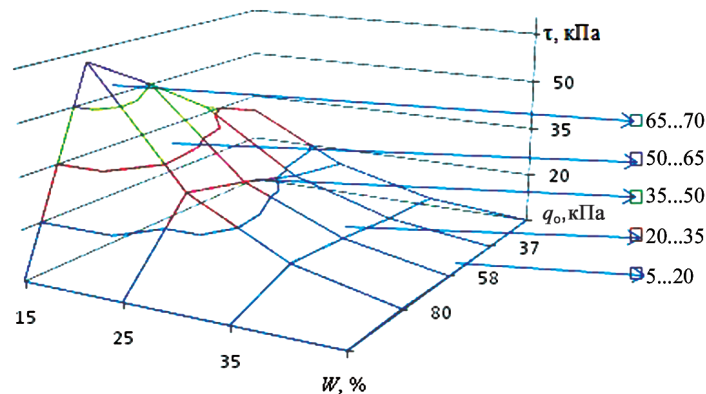


Рис. 3. Зависимость предела прочности τ от влажности W и начального давления q_0

Fig. 3. The dependence of shear resistance (τ) on humidity (W) and initial vertical load (q_0)

Анализ данных показал, что при максимально возможном давлении $q_0 = 80$ кПа повышение W в 3 раза (с 15 до 45 %) приводит к снижению предела прочности τ более чем на порядок (с 67,0 до 5,6 кПа), что существенно влияет на процесс разрушения массива и формирование колеи. Под действием нагрузки P на поверхности почвогрунта образуется контактная площадка радиусом a , м, с площадью контакта $s = \pi a^2$ и глубиной контактного сближения h_0 .

Основываясь на положениях [6], определим параметры a и h_0 :

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{4E}}; \quad h_0 = a^2/R, \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуассона; R – радиус колеса, м.

Процесс деформирования грунта от действия внешнего давления q_0 под нагрузкой P происходит в пространственной декартовой системе координат $Oxyz$, где на произвольной элементарной площадке массива действует тензор напряжений, компоненты которого определяются как

$$\sigma = -q_0 \psi_z(r, z) = -q_0 \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}; \quad \sigma_x = \alpha \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z; \quad \sigma_y = q_0 \psi_y(r, z),$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; u – положительный корень квадратного уравнения $\frac{r^2}{a^2 + u} + \frac{z^2}{u} = 1$; α – коэффициент бокового распора; $\psi_z(r, z)$, $\psi_y(r, z)$ и $\psi_{yz}(r, z)$ – функции двух переменных, или функции координат:

$$\begin{aligned} \psi_y(r, z) &= \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2 + z^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} + \frac{z}{\sqrt{u}} \times \\ &\times \left[\frac{(1-\nu)u}{a^2 + u} + (1+\nu) \arctg \left(\frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \right] \tau_y = \\ &= -q_0 \psi_{yz}(r, z) = -q_0 \frac{a \sqrt{u} z^2 (r^2 + z^2)}{(u + a^2)(u^2 + a^2 z^2)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выполним на основе (7) в зоне грунта непосредственно под штампом 1 расчеты по определению компонент тензора напряжений σ_x , σ_y , σ_z при следующих исходных данных: $P = 9$ т; $q_0 = 58$ кПа; $E = 1,0$ МПа; $W = 35$ %; $\nu = 0,35$.

Для этих данных соотношения (2)–(6) дают: $a = 0,175$ м; $h_0 = 0,068$ м; $H = 0,47$ м; $C = 10,774$ кПа; $\varphi = 13,67^\circ$; $\tau = 24,88$ кПа; $\sigma_p \approx \tau/2 = 12,44$ кПа.

В главных осях напряжения (главные) принимаются из условия

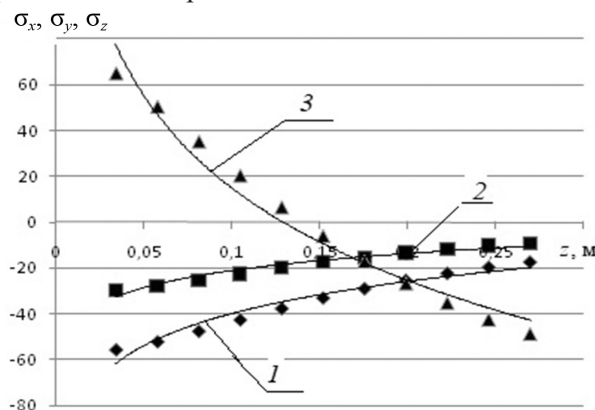
$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (8)$$

касательные напряжения при этом отсутствуют.

На рис. 4 в соответствии с условием (8) представлены графики зависимости главных напряжений от вертикальной координаты z .

Рис. 4. Изменение главных напряжений σ_x , σ_y , σ_z , с ростом вертикальной координаты z : 1 – $\sigma_1 = \sigma_y$; 2 – $\sigma_2 = \sigma_z$; 3 – $\sigma_3 = \sigma_x$

Fig. 4. The change in principal stresses with increasing vertical coordinate: 1 – $\sigma_1 = \sigma_y$; 2 – $\sigma_2 = \sigma_z$; 3 – $\sigma_3 = \sigma_x$ (where σ – strength limit)



Как следует из рис. 4, главное напряжение σ_3 является знакопеременным (напряжение σ_1 – однозначное!), причем в зоне массива почвогрунта, вблизи поверхности контакта со штампом ($z = h_p \leq 0,128$ м), развиваются положительные (растягивающие) напряжения, значительно превышающие предел прочности на разрыв σ_p . Выполнение критерия разрушения в этой зоне приведет к образованию трещин разрыва.

За пределами зоны разрыва уровень растягивающих напряжений недостаточен для разрушения почвогрунта, однако отрицательные (сжимающие) напряжения σ_2 и σ_3 приводят к возникновению максимальных касательных напряжений:

$$\tau_c = 0,5(\sigma_2 - \sigma_3), \quad (9)$$

которые могут превысить предел прочности на сдвиг τ , тем самым определив глубину зоны h_c , которую можно считать наиболее вероятной глубиной колеи от действия штампа 1.

Дифференцированный подход при выявлении механизма разрушения сплошной среды, в частности массива древесины, развит в работе [2]. Принципы такого подхода могут быть использованы и при изучении деформирования почвогрунтов с соответствующими упругопластическими и прочностными показателями.

В момент маневрирования форвардера и его отклонения от заданного направления движения на угол θ деформирование почвогрунта происходит под действием тензора напряжения с компонентами:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_1; & \sigma_z &= 0,5(\sigma_2 + \sigma_3) + 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)\cos 2\theta; \\ \sigma_x &= 0,5(\sigma_2 + \sigma_3) - 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)\cos 2\theta; & \tau_{zx} &= 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)\sin 2\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

Из соотношений (10) следует, что при $\theta = 0$ компоненты тензора напряжений являются главными:

$$\sigma_y = \sigma_1; \quad \sigma_z = \sigma_2; \quad \sigma_x = \sigma_3; \quad \tau_{zx} = 0. \quad (11)$$

Таким образом, критерием разрушения массива почвогрунта является выполнение условий в зонах разрушения

$$\begin{aligned} \text{разрывом: } \sigma_y &> \sigma_p; \\ \text{сдвигом: } \tau_\Sigma &= \tau_c + \tau_{zx} > \tau, \end{aligned} \quad (12)$$

где τ_Σ – суммарные касательные напряжения.

Наряду с модулем общей деформации E упругопластические свойства почвогрунтов характеризуются и коэффициентом Пуассона ν .

Принимая во внимание, что коэффициент ν оказывает влияние как на компоненты тензора напряжений, так и на контактные параметры взаимодействия штампа с массивом почвогрунта, оценим зависимость ν от влажности W .

По данным [9], указанное влияние для мерзлых и оттаивающих грунтов (песков, супесей, суглинка и глины) хорошо описывается экспоненциальной зависимостью, в диапазоне $W = 15...35$ % эта зависимость (при $R^2 = 0,9729$) имеет вид

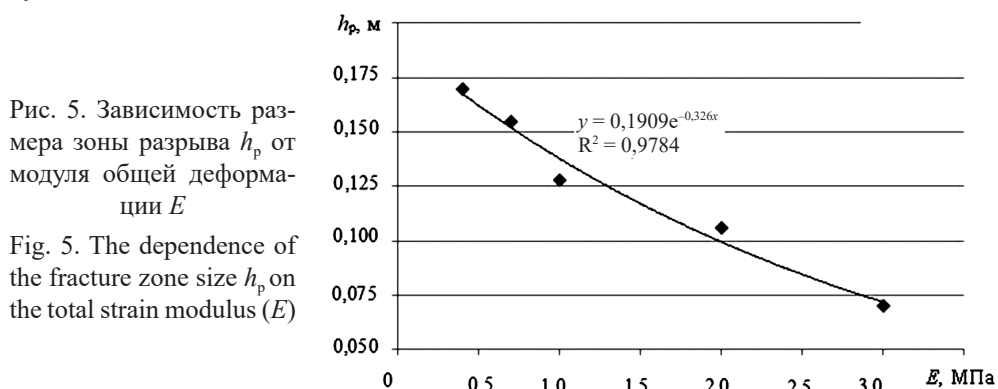
$$\nu = 0,0887e^{0,0442W}. \quad (13)$$

При значениях $W > 35$ % коэффициент Пуассона ограничен сверху величиной предела $\nu = 0,5$, зависимость $\nu(W)$ принимает следующий вид:

$$\nu = 0,2234 \ln W - 0,4463. \quad (14)$$

Таким образом, при высокой влажности $v \rightarrow 0,5$, т. е. коэффициент бокового распора $\alpha = v/(1-v)$, связывающий компоненты вертикальных σ_z и горизонтальных σ_x сжимающих напряжений, стремится к 1. Это значит, что массив грунта находится в состоянии квазинесжимаемой жидкости и только в поверхностной зоне испытывает максимальные растягивающие напряжения, приводящие к разрыву.

Как показали расчеты, величина зоны разрыва h_p существенно зависит от модуля общей деформации E , тогда как параметры влажности и начальной нагрузки оказывают слабое влияние на h_p (относительные изменения не превышают 8...10 % при $P = 19...12$ т и $W = 35...15$ %). На рис. 5 приведена зависимость h_p от E при $P = 19$ т, $q_0 = 58$ кПа, $W = 35$ %, $v = 0,35$.



Как видно из графика на рис. 5, в грунтах с модулем $E \leq 2,0$ МПа зона разрыва превышает максимально допустимую глубину колеи, равную 0,1 м, и увеличивается по мере снижения модуля E .

Расчеты по определению зоны разрушения сдвигом свидетельствуют об определенной зависимости h_c от нагрузки P , угла поворота рамы θ и влажности W .

На рис. 6 приведены графики функций h_c от угла θ при $W = 35$ % и трех видах нагрузки P .

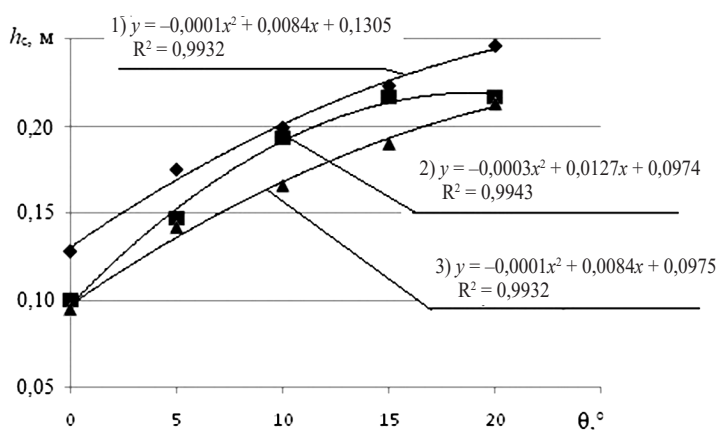


Рис. 6. Зависимость размера зоны разрушения сдвигом h_c от угла поворота θ при различной нагрузке P : 1 – 19 т; 2 – 15 т; 3 – 12 т

Fig. 6. The dependence of the share fracture zone size h_c on the angle of rotation at different loads (P): 1 – 19 т; 2 – 15 т; 3 – 12 т

При движении форвардера в заданном направлении маневры с углом поворота θ до 10° являются вполне естественными, однако в ряде случаев $\theta = 15...20^\circ$ и более. Максимально возможное значение $\theta = 42...44^\circ$. Это оказывает негативное воздействие на массив почвогрунта, о чем свидетельствуют результаты исследований [14].

Приведенные на рис. 6 данные для почвогрунтов с высоким содержанием влаги ($W = 35\%$ и более) показывают, что размер зоны разрушения выдержать в пределах $h_c \leq 0,1$ м затруднительно даже при снижении нагрузки до 12 т.

Проанализируем зависимость $h_c(W)$ при допустимых углах $\theta = 10^\circ$, нагрузках $P = 12$ и 19 т, $E = 1,0$ МПа (рис. 7).

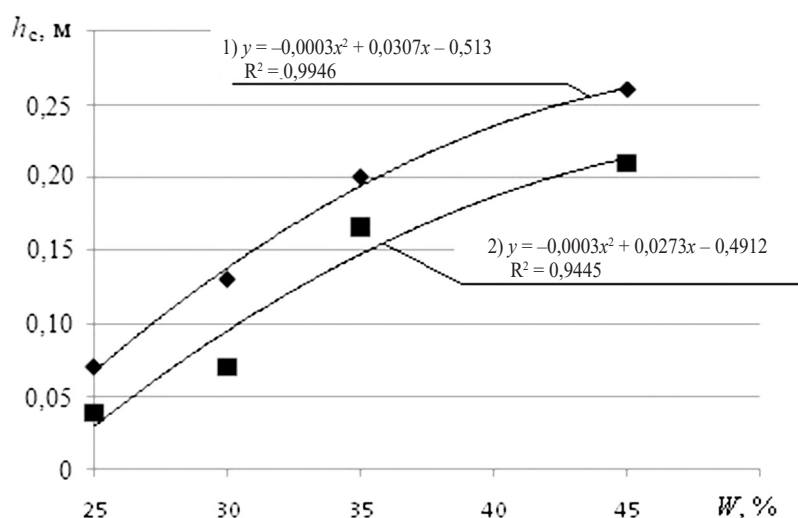


Рис. 7. Зависимость размера зоны разрушения сдвигом h_c от влажности W при различной нагрузке P : 1 – 19 т; 2 – 12 т

Fig. 7. The dependence of the zone depth (h_c) on humidity (W) at different loads (P): 1 – 19 t; 2 – 12 t

При движении форвардера по почвогрунтам с $W = 25...30\%$ выдержать ограничение по глубине колеи практически не удастся при относительно больших нагрузках ($P = 19$ т). С ростом W до $35...45\%$ глубина колеи в этих условиях достигает 0,25 м. Снижение нагрузки до 12 т позволяет выдерживать ограничение по глубине колеи и в более влажных почвогрунтах ($W \leq 30\%$).

Учитывая характер изменения напряжений с ростом глубины колеи, их соотношения в главных напряжениях и принятые критерии разрушения (формулы (5) – (10)), будем иметь глубину колеи после действия штампа 1:

$$h_k = a \sqrt{q_0 \frac{(1-\alpha)(1+\sin 2\theta)}{2\tau}}, \quad (15)$$

где τ определяется в соответствии с (5).

На рис. 8 представлены зависимости $h_k(E)$ при трех значениях $q_0 = 35$; 58 и 80 кПа.

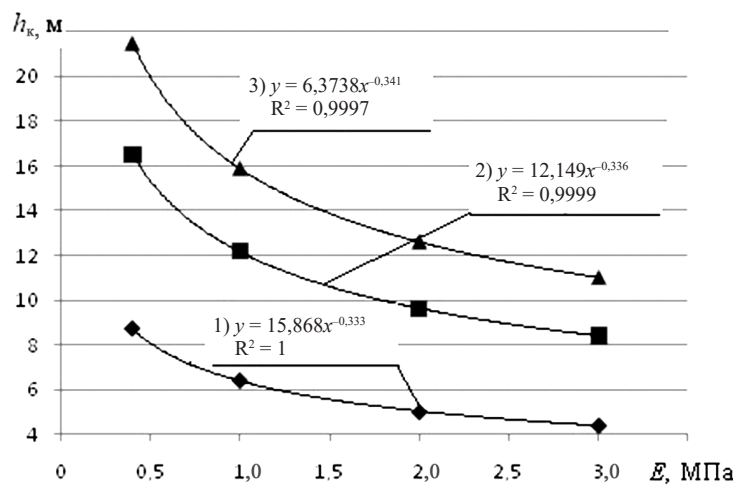


Рис. 8. Зависимости глубины колеи h_k от модуля E при различных значениях начальной вертикальной нагрузки q_0 : 1 – 35 кПа; 2 – 58 кПа; 3 – 80 кПа

Fig. 8. The dependence of the rut depth (h_k) on the total strain modulus (E) at different values of the initial vertical load (q_0): 1 – 35 kPa; 2 – 58 kPa; 3 – 80 kPa

Можно заключить, что для широкого диапазона изменения q_0 величина $h_k \sim \sqrt[3]{E}$, причем коэффициент пропорциональности логарифмически зависит от q_0 :

$$h_k = 11,5 \ln q_0 - 34,5.$$

Таким образом, влажность, модуль деформации и начальное давление трелевочной системы на грунт являются основными природно-климатическими и технологическими факторами, влияющими на процесс образования колеи определенной глубины.

Поскольку величина модуля деформации E зависит от влажности W , последний показатель существенно влияет на процесс деформирования массива почвогрунта.

Этот вывод получен и при изучении процессов статического деформирования древесины различной влажности [2, 5], что подчеркивает инвариантность механизма влияния данного показателя на процесс разрушения массива сплошной среды различной природы при достижении критических нагрузок.

От действия статического давления в массиве насыщенного влагой оттаявшего почвогрунта под штампом 1 будут активизированы процессы фильтрации воды за пределами зоны разрушения, т. е. глубже образованной колеи. Действие штампа 1 можно считать мгновенным. При скорости движения форвардера, например, 2,5 км/ч и расстоянии между штампами 2 м, время начала действия штампа 2 не превысит $\Delta t_{\phi} = 3$ с. Однако этого времени достаточно, чтобы определенный объем воды переместился в направлении границы зоны мерзлоты.

Рассмотрим модель Дарси линейной фильтрации жидкости под действием вертикального текущего давления q в направлении $z = h$:

$$v_h = - \frac{k}{\gamma} \frac{\partial q}{\partial h}, \quad (16)$$

где k – коэффициент фильтрации, м/с; γ – удельный вес жидкости.

Значения коэффициента фильтрации принимаем по данным табл. 3, полученным в соответствии с ГОСТ 25100–2011 «Грунты. Классификация».

Таблица 3

Коэффициент фильтрации грунтов

Грунт	k , м/с
Песок:	
пылеватый	$(0,6...6,0)10^{-5}$
мелкозернистый	$(1,2...3,0)10^{-4}$
среднезернистый	$(2,5...6,0)10^{-4}$
крупнозернистый	$(4,0...8,5)10^{-4}$
Супесь	$(0,1...1,2)10^{-5}$
Суглинок	$(0,05...0,5)10^{-5}$
Глина	$<10^{-5}$

В качестве частной производной $\frac{\partial q}{\partial h}$ примем отношение перепада давления (величина отрицательная) на участке зоны разрушения h_c к размеру самого участка. Тогда за единицу времени (t_ϕ , с) объем жидкости V_j в пределах площади пятна контакта s переместится вниз и составит:

$$V_j = - \frac{\pi k}{\gamma} \frac{\partial q}{\partial h} a^2 \frac{1}{1 + h_c / a}. \quad (17)$$

Отнеся соответствующий объем V_j за период времени Δt_ϕ к объему воды V_c в зоне грунта глубиной $H - h_c$, получим дополнительный объем жидкости (λ , %), поступающей в почвогрунт из зоны разрушения глубиной h_c в зону оттаивания глубиной $H - h_c$. Общая влажность при этом увеличится на λ . Такой подход использован в работе [19] при исследовании процессов обезвоживания модифицированных материалов.

Расчеты для оттаивающей супеси с минимально возможным коэффициентом фильтрации $k = 10^{-6}$ м/с показали, что при $E = 0,4$ МПа повышение q_0 от 35 до 80 кПа при прочих равных условиях приводит к увеличению W от 2 до 4 %, т. е. фактором фильтрации в этом случае можно пренебречь.

Однако в более прочных почвогрунтах, при $E = 1,0$ МПа, показатели влажности растут более существенно и прирост W достигает 8 % при $q_0 \geq 58$ кПа. В крепких почвогрунтах, при $E = 3,0$ МПа, во всем диапазоне изменения q_0 прирост $W = 8,2...18,8$ %, что существенно влияет на снижение прочности массива и увеличение глубины колеи при воздействии штампа 2.

Рассмотрим подробнее процесс перемещения воды к зоне мерзлоты под действием внешней нагрузки. Связанная высокоплотная (до 1200...1400 кг/м³) вода, занимающая 40 % и более от общего объема, под действием статических нагрузок практически не уплотняется. При градиенте в направлении роста координаты z обеспечить перемещение этой воды достаточно трудно, поскольку до 95 % связанной воды остается в исходном состоянии. Уместно отметить, что такая вода переходит в лед при достаточно низких температурах замерзания: $-4...-6$ °С.

Свободная вода состоит из гравитационной и капиллярной составляющих. Последняя замерзает при температурах, близких к значениям температу-

ры замерзания связанной воды. Процесс перехода гравитационной воды в лед происходит при любых отрицательных температурах ($\leq 0^\circ\text{C}$).

Пусть начальное распределение свободной и связанной воды в единице объема грунта определяется соответствующими компонентами вектора

$$\vec{v}_0 = (\omega_1, \omega_2); \quad \omega_1 + \omega_2 = 1. \quad (18)$$

В квадратной (размерность 2×2) матрице переходных состояний P_c принимаем $p_{11} = 1 - \lambda/100$, а $p_{22} = 0,95$, т. е. матрица переходных состояний будет иметь следующий вид:

$$P_c = \begin{pmatrix} 1 - \lambda/100 & \lambda/100 \\ 0,05 & 0,95 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Тогда, согласно теории Маркова и принципов ее приложений, развитых в работе [10], умножение вектора $\vec{v}_0$ на матрицу P_c определяет вектор $\vec{v}_1$ – распределение состояния воды после первого цикла воздействия (прохода первой колесной пары форвардера). Таким образом, умножение вектора (18) на матрицу (19) дает вектор нового состояния воды.

Как показали расчеты, при использовании форвардеров с низким давлением в шинах ($q_0 \leq 39$ кПа) и, в частности, при исходном состоянии $\vec{v}_0 = (0,6; 0,4)$ результат первого перехода приводит к вектору $\vec{v}_1 = (0,58; 0,42)$, т. е. относительное изменение не выше 5 % и процессом фильтрации можно пренебречь. При использовании форвардеров с высоким давлением на почвогрунт ($q_0 \leq 80$ кПа) количественными изменениями компонент (ω_1, ω_2) пренебрегать нельзя, и учет увеличения влажности является значимым фактором. Этот вывод подтверждается данными табл. 4, где приведены результаты расчетов влияния влажности W на глубину образованной в грунте колеи как результат суммирования глубин от штампов 1 (h_{k1}) и 2 (h_{k2}) для четырех (но с модификациями их – 5) типов (I–IV) транспортных систем (см. табл. 2) при фиксированных значениях $E = 1$ МПа, среднем угле маневрирования $\theta = 10^\circ$ и $H = 0,47$ м.

Таблица 4

Расчетные значения глубины колеи (см, или 10^{-2} м)
для разных форвардеров

$W, \%$	I			II-к			II-г			III			IV		
	h_{c1}	h_{c2}	h_k	h_{c1}	h_{c2}	h_k	h_{c1}	h_{c2}	h_k	h_{c1}	h_{c2}	h_k	h_{c1}	h_{c2}	h_k
30	11	14	25	12	15	27	12	1	13	3	11	14	3	6	9
35	15	19	36	17	26	43	16	8	24	10	15	25	9	11	20
40	18	22	40	21	26	47	19	12	31	13	20	33	13	15	28
45	21	26	47	24	23	47	22	14	36	16	22	38	16	17	33

При использовании 6-колесного форвардера рассчитаны два варианта, когда вторая и третья колесные пары (без гусениц каждая) независимо создают давление в 40 кПа (тип II-к) и с гусеницами – колесные пары считаются единым штампом, создающим при увеличенной площади контакта давление $q_0 = 27$ кПа (тип II-г).

На рис. 9 приведена зависимость относительной (по отношению к $H = 0,47$ м) глубины колеи h_k от влажности W для тех же четырех типов форвардеров.

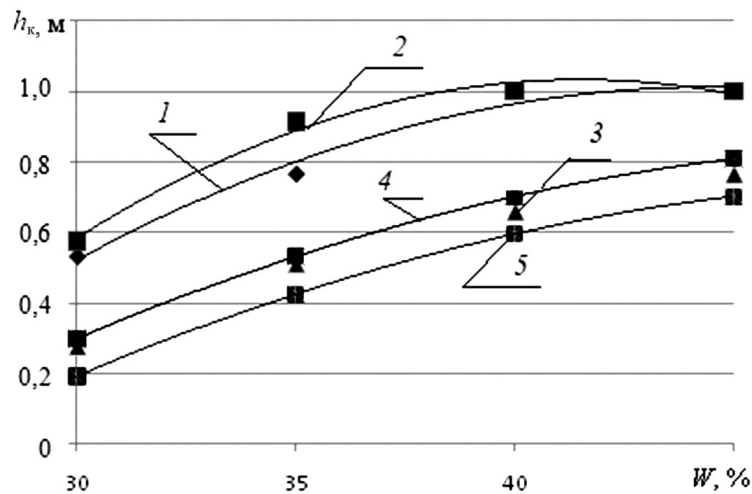


Рис. 9. Влияние влажности W оттаявшего грунта на глубину h_k колеи относительно глубины зоны мерзлоты для разных форвардеров (нумерация кривых соответствует номеру системы из табл. 4): 1 – I; 2 – II-к; 3 – II-г; 4 – III; 5 – IV

Fig. 9. The effect of moisture W of the thawed soil at the rut depth h_k relative to the depth of the permafrost zone for forwarder types (curve numbering corresponds to the type number of the system from Table 4): 1 – I; 2 – II-к; 3 – II-г; 4 – III; 5 – IV

По мере прохода трелевочной системы по одному и тому же волоку, отмеченные особенности будут циклично воспроизводиться в режиме как статических, так и динамических нагрузок [18].

Выводы

1. Использование трелевочных систем с высоким давлением в шинах (рис. 9, типы I, II, кривые 1, 2) на оттаявших почвогрунтах повышенной влажности (35 % и более) увеличивает глубину колеи до значений (0,8...1,0) H (относительно глубины H), т. е. практически до границы с зоной мерзлоты. Это позволяет сделать вывод о низкой эффективности использования указанных типов систем в данных природно-климатических условиях.

2. Применение систем с низким давлением в шинах (тип II-г–IV) существенно снижает глубину колеи, особенно в почвогрунтах, влажность которых не превышает 30 %. В этом случае величина h_k близка к нормативным ограничениям, равным 0,1 м, и использование этих систем следует признать эффективным в данных условиях.

3. Разработанная математическая модель расчета параметров процесса разрушения массива оттаивающего почвогрунта на границе с зоной мерзлоты позволяет на стадии проектных решений произвести оценку предполагаемых значений глубины образованной колеи с учетом технических возможностей форвардеров и их маневрирования в конкретных производственных условиях.

4. При классификации участков лесозаготовок по параметру влажности возможно устанавливать допустимые диапазоны эффективной эксплуатации различных типов трелевочных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на Крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с. [Velli Yu.Ya., Dokuchayev V.V., Fedorov N.F. *Buildings and Structures in the Far North*. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1963. 492 p.]
2. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2008. № 6. С. 129–133. [Gazizov A.M., Shapiro V.J., Grigorev I.V. Agency of Moisture on Evolution of Process of Destruction of a Bark at Rotor Disbark. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 6, pp. 129–133].
3. Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьев И.В. Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // Forest Engineering: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Якутск, 30–31 мая 2018 г. Якутск: Изд. дом СВФУ. 2018. С. 72–75. [Grigoreva O.I., Grigorev M.F., Grigorev I.V. Analysis of Natural Reforestation in the Alekseevsky Forestry of the Sakha Republic (Yakutia). *Forest Engineering: Proceedings of Science and Practical Conference with International Participation, Yakutsk, May 30–31, 2018*. Yakutsk, NEFU Publ., 2018, pp. 72–75].
4. Котляренко В.И. Основные направления повышения проходимости колесных машин М.: МГИУ, 2008. 285 с. [Kotlyarenko V.I. *The Main Directions of Improving the Mobility of Wheeled Vehicles*. Moscow, MSIU Publ., 2008. 285 p.]
5. Кунитская О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2012. № 4. С. 110–115. [Kunitskaja O.A., Shapiro V.J., Burmistrova S.S., Grigorev I.V. Model of Processes and Dehydration of the Impregnated Wood Materials. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 4, pp. 110–115].
6. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 с. [Morozov E.M., Zernin M.V. *Contact Problem of Fracture Mechanics*. Moscow, LIBROKOM Publ., 2010. 544 p.]
7. Роман Л.Т., Царапов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С., Мотенко Р.Г., Черкасов А.М., Штейн А.И., Костюсов А.И. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: Унив. кн., 2018. 188 с. [Roman L.T., Tsarapov M.N., Kotov P.I., Volokhov S.S., Motenko R.G., Cherkasov A.M., Shteyn A.I., Kostousov A.I. *A Handbook for Determination of the Physical and Mechanical Properties of Freezing through, Frozen and Thawing Dispersive Soils*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2018. 188 p.]
8. Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Безгина Ю.Н. Развитие техники и технологий лесозаготовок на Урале // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 2. С. 81–90. [Terinov N.N., Gerts E.F., Bezgina Yu.N. Development of Logging Technology in the Urals. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 2, pp. 81–90]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.2.81](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.2.81), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f46/terinov.pdf>
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с. [Tsytovich N.A. *Mechanics of Frozen Soils*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p.]
10. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности ПИФов // Экономическое развитие и практика: материалы Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 05–07 апреля 2007 г.). СПб.: Образоват. центр экономики и менеджмента, 2007. С. 79–81. [Shapiro V.Ya., Shapiro N.A. The Use of Markov Chains for the Efficiency Forecast of Mutual Funds. *Economic Development and Practice: Proceedings of the International Scientific Conference (Saint Petersburg, April 5–7, 2007)*. Saint Petersburg, Obrazovatel'nyy tsentr ekonomiki i menedzhmenta Publ., 2007, pp. 79–81].

11. Шегельман И.Р., Будник П.В. Особенности оценки расчетной рейсовой нагрузки на antecedentной стадии проектирования бесчokerной трелевочной системы на основе машинного эксперимента // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 82–96. [Shegelman I.R., Budnik P.V. Features of Calculated Truck Load Estimation at Antecedent Design Stage of Chokerless Skidding System Based on Computer Experiment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 82–96]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.3.82](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.82), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5ee/82_96.pdf
12. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 7–12.
13. Cerato A.B., Lutenegeger A.J. Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, vol. 29, iss. 6, pp. 507–516. DOI: [10.1520/GTJ100312](https://doi.org/10.1520/GTJ100312)
14. Ding L., Yang H., Gao H., Li N., Deng Z., Guo J., Li N. Terramechanics-Based Modeling of Sinkage and Moment for *in-situ* Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, vol. 116, pp. 14–33. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011)
15. Grigorev M., Grigoreva A., Grigorev I., Kunickaya O., Stepanova D., Savvinova M., Sidorov M., Tomashevskaya E., Burtseva I., Zakharova O. Experimental Findings in Forest Soil Mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2018, vol. 12, iss. 2, pp. 277–287.
16. Han S.-K., Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Johnson L.R. Soil Compaction Associated with Cut-to-Length and Whole-Tree Harvesting of a Coniferous Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 39(5), pp. 976–989. DOI: [10.1139/X09-027](https://doi.org/10.1139/X09-027)
17. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. DOI: [10.26480/jmerd.02.2018.22.27](https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27)
18. Khitrov E.G., Andronov A.V. Bearing Flootation of Forest Machines (Theoretical Calculation). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 695, art. 012020. DOI: [10.1088/1757-899X/695/1/012020](https://doi.org/10.1088/1757-899X/695/1/012020)
19. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E.-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49(7), pp. 743–751. DOI: [10.1139/cjfr-2018-0385](https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0385)
20. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil Compaction Impact and Modelling. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, vol. 33, pp. 291–309. DOI: [10.1007/s13593-011-0071-8](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8)

THE STUDY OF THE DESTRUCTION PROCESS OF FROZEN AND THAWING SOILS EXPOSED TO THE SKIDDING SYSTEM

S.E. Rudov¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

V.Ya. Shapiro², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

I.V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

O.A. Kunitskaya³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

O.I. Grigoreva², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

¹Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva_o@list.ru

³Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Wood logging in the forests of the cryolithozone is growing more urgent for the Russian Federation due to the depletion of available reserves of mature commercial forests in southern and Central Siberia, the Republic of Buryatia, and Khabarovsk Krai, while the development of woodworking enterprises in the Far Eastern Federal District. During the operation of modern forest machines, for instance wheeled forwarders, the issues of their efficiency, first of all, mobility and technological productivity in the specific production and geotechnical conditions are now becoming ever more relevant. These circumstances together with the necessity to minimize the anthropogenic load on the environment put forward the problem of optimizing the number of passes of the skidding system by one run into the most pressing ones. Special conditions for the operation of skidding systems take place in logging operations on frozen and thawing soils. In the first case, there is a sufficiently large volume of ice in the soil massif. The ice has a great impact on increasing the bearing capacity of the soil under the influence of the initial vertical load of the skidding system. In the second case, frozen soil is oversaturated with water when thawing; therefore, the natural bonds between the solid particles grow weak, and the physical and mechanical properties of the soil lose their original values. The forwarder forms a rut in the immediate area of contact of the wheel with the soil. The larger the size of the area, the higher the force transferred to the soil for implementation of the necessary traction. We have developed the mathematical model of calculation of parameters of the destruction process of the thawing soil massif on the border with the permafrost zone. The model allows to make an assessment of hypothetical values of depth of the formed rut including engineering capabilities of forwarders and their maneuvering in the work environment at the design stage.

For citation: Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 101–117. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117

Keywords: frozen soil, logging, skidding system, soil compaction, soil deformation.

Поступила 01.04.19 / Received on April 1, 2019



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.8-1/-9

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-118-128

SOLVING THE PROBLEM OF REDUCING THE INFLUENCE OF LATERAL FORCE ON THE SAW BLADE STABILITY

M.A. Blokhin, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9537-0917>

D.A. Podlesny, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-6585>

O.A. Rodionov, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7603-3413>

Bauman Moscow State Technical University, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail: hornet10@yandex.ru

The accuracy of the thickness of lumber is one of the most important indicators of sawing. It is inextricably linked with saw stabilization in the plane of the greatest stiffness. The aim of the study is to eliminate the influence of lateral force on the saw blade and the thickness of the resulting lumber. The issue of eliminating the influence of lateral force in frame sawing and sawing on band saws belongs to the constructive decision in combination with the analytical one according to classical methods. Therefore, the most important issue in the development of a new machine is to identify the presence of a huge range of frequencies of natural and parametric oscillations of saw blades. Previously, these frequencies could not be analytically found to the full extent and, respectively, the tuning out the machine operating frequencies of the possible oscillation frequencies of saw blades could not be carried out. Due to the complexity and the science intensity of the problem solving, it is not conceivable without modern numerical methods of calculation. Among them are the finite element method, modern software of NX and ANSYS, as well as other original programs. One of such methods, which allow to reduce the influence of lateral force, is determination of stability of the plane form of bending by the Euler's method. The technical solution presented by a fundamentally new saw block with a circular translational motion of the blades reduce dramatically the impact of lateral force on the accuracy of sawing in conjunction with a number of other advantages. At the same time, the issue of ensuring the dynamic stability of the blades both when sawing and at idling speed is solved. It is necessary to point out that with circular translational motion the tooth side cutting edges are under alternating load when scraping over the cut surface. Therefore, the tooth cutting element is a subject of increased strength requirements. The angles of their sharpening were adjusted in order to preserve the integrity of the corners of the teeth tips. The possibility of strengthening the teeth lateral cutting edges of saw blades made of steels of different grades was investigated. The reasons of wear and corrosion, both the elements of the saw module and its operating part (blade teeth) were studied and it was decided to supply the teeth with a hard alloy of the stellite type as the most optimal. However, this provision requires additional targeted field tests. Preliminary calculations showed that the daily productivity of a machine with circular translational motion of the blades (model M2005) in comparison with saw frames increases by 2–4 times; in comparison with band saw equipment of any class by 3–6 times; and in comparison with the circular saw equipment (for small and medium enterprises) by 2–4 times. Analyzing the design scheme and the dynamics of the saw modules, it is possible to find a number of advantages of the multi-saw unit presented as part of the machine. The simplicity and reliability of the design allows us

to hope for high functional characteristics. Among those we should highlight the following: increasing the accuracy of sawn products due to the rigidity of short blades, increasing the productivity, improving the quality of treated surfaces, as well as reducing the energy consumption, relatively light weight and dynamic balance of the main units with increased mobility of equipment and the absence of a massive foundation.

For citation: Blokhin M.A., Podlesny D.A., Rodionov O.A. Solving the Problem of Reducing the Influence of Lateral Force on the Saw Blade Stability. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 118–128. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-118-128

Keywords: saw module, saw block, oscillation frequency, dynamic stability, lateral force, thickness variation.

Introduction

Issues of improving the accuracy in frame sawing and sawing on band saws are considered in the works [8–10] of native and foreign experts. In this case, the required accuracy is inextricably linked with ensuring the stability of the blade (saw) in the plane of its greatest stiffness. The principal design scheme for ensuring the blade stability is presented in Fig. 1.

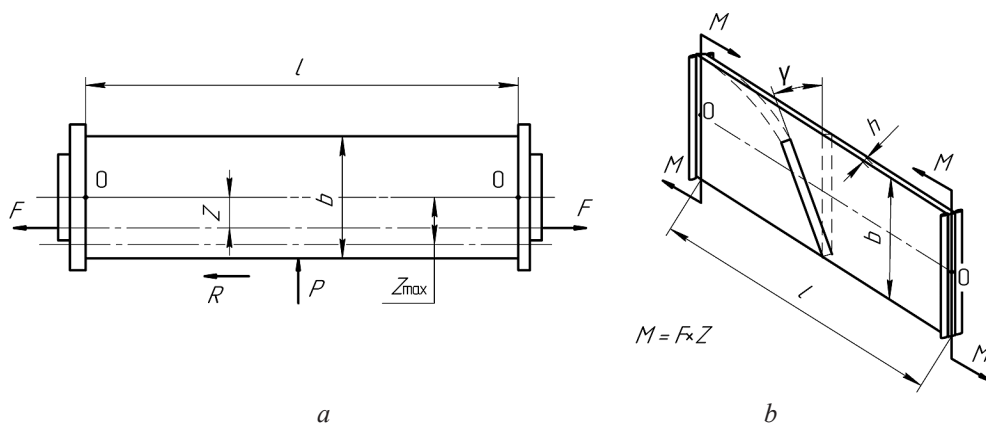


Fig. 1. The design scheme of the blade stabilization: *a* – the scheme of accepted design; *b* – the scheme of stability loss of the blade under the influence of the moment of force bend to the blade's ends (F – the force of the blade tension; R – the cutting force; P – the force opposing the feed motion of the blade along the predetermined path; Z – the eccentricity of the blade tension; $Z_{\max}$ – the maximum possible eccentricity of tension; b – blade width; h – blade thickness; γ – the angle of the blade exit from its plane; M – the force moment of the eccentric tension; O–O – the median line of the blade

The main reasons of lateral forces during sawing in the plane of the least stiffness may be (Fig. 2): out-of-squareness of the front face of the teeth to the saw blade, asymmetry of teeth broadening, installation inaccuracy of saws in horizontal and vertical positions, movement inaccuracy of saws, inaccuracy in feeding the sawing material, structural features of wood, and others [14, 15, 17, 18].

As a result of errors in preparation, installation, movement of saws and feed of the sawing material between the resultant horizontal force P_r and the feed direction at a speed of V_p there is a possible angle of meeting θ . In the presence of the meeting angle θ , the resultant of the horizontal force P_r is decomposed into the force acting on the saw in the plane of its greatest stiffness ($P = P_r \cos \theta$) and the lateral force ($Q = P_r \sin \theta$).

Lateral force acts on the saw in the plane of its least stiffness and has a decisive influence on the accuracy of sawing.

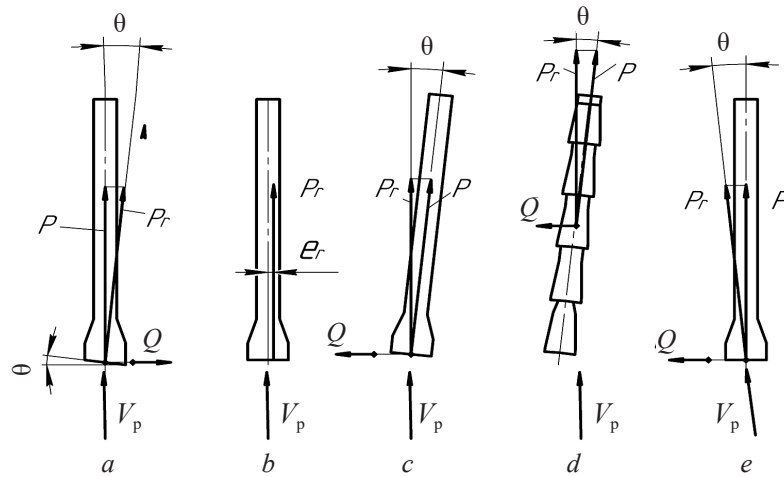


Fig. 2. Reasons for occurrence of lateral forces during sawing: *a* – out-of-squareness of the front face of teeth to the saw blade; *b* – asymmetry of teeth broadening; *c* – installation inaccuracy of the saws in the horizontal position; *d* – installation inaccuracy of the saws in the vertical position and movement inaccuracy of the saws; *e* – inaccuracy in feeding the sawing material

Reducing the influence of lateral force on the accuracy of sawing by classical methods, in frame sawing and band sawing machines, is practically impossible [20]. It should be noted that the stretching line of the saw with a force F is characterized by an eccentricity Z , which is always less than $Z_{\max}$. Calculations using the finite element method (FEM) [4] show that in real operating sawing devices the value of $Z_{\max} \leq 0.2b$, otherwise the back edge of the saw loses stability [3], which leads to saw wandering and increased (unallowable) thickness variation of lumber with simultaneous overheating of the tool.

However, high accuracy with simultaneous increase of productivity of sawing by group (battery) method can be achieved under the condition when $Z > 0.5b + h_z$ (where h_z is the height of the tooth of the saw blade). In this case, the lateral force, as perturbing, is beyond the point of application of the resultant force P_r . In other words, the line of the tensile force of the blade must be in front of its teeth, which corresponds to the line of application of force, advancing the cutting blade along a given trajectory at a speed of V_p . Thus, the condition of the working movement of the band saw blades is provided in the negative feedback mode with the guarantee of the condition of its necessary stability, which is the purpose of the study and further calculation.

Since the 1950s some developers and inventors of the sawmill equipment have found solutions of the above issue in the creation of the saw block (Fig. 3) with circular translational motion of saw blades [1, 2, 5–7, 16, 19]. The issue of development, manufacture and testing of the mentioned equipment has quite long history and engineers and woodworkers realizing the prospects of such a design tried to recreate this in practice. As it turned out, this is not a simple design scheme [11–13]. Attempts to create it ended in failure without the necessary scientific support. It should be said that the problem of transmission of circular translational motion in the mechanism of such saw block (Fig. 3) with the help of elements with unidirectional stiffness (saw blades) does not have a strict mathematical solution.

Objects and methods of research

Therefore, the most important, in the development of the saw block of the new machine, was the determination of a significant spectrum of frequencies of natural and parametric oscillations of the saw blades. Previously, these frequencies could not be analytically found to the full extent and, respectively, the tuning out the machine operating frequencies of the possible oscillation frequencies of saw blades could not be carried out. It must be reiterated that, owing to the novelty, complexity of tasks and scientific intensity of the problem, its solution is impossible without applying the most modern numerical calculation methods. Among them – FEM, modern software products of NX and ANSYS, as well as the original software.

One of such methods, which allowed to reduce the influence of lateral force, is determination of stability of the plane form of bending by the Euler's method.

The solution of this urgent problem, taking into account the above, was carried out by the scientists and designers of the Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia) in the development of prototypes of a fundamentally new multi-saw block with circular translational motion of the saw blades [3].

Results and discussion

On the schematic design of a multi-saw block.

The presented technical solution (Fig. 3) covered by patents for the invention [5] and successfully passed out the preliminary international patent examination according to the Patent Cooperation Treaty (PCT) system (PCT/RU, 99/00102 from 08.06.2000).

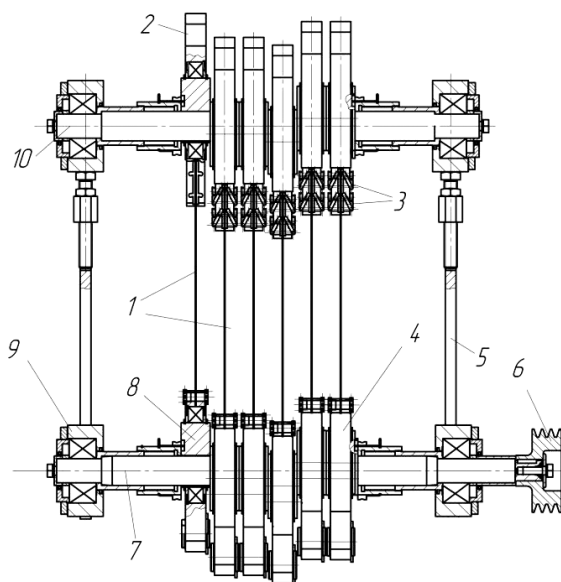


Fig. 3. Saw block with circular translational motion of the blades: 1 – saw blades; 2 – the upper hinge joint with the elements of movable fixation of the saw blade and correction mass; 3 – elastic elements; 4 – the lower hinge joint with the clamping elements of the saw blades and correction mass; 5 – side structure, 6 – pulley of the lower shaft of the saw block; 7 – lower shaft; 8 – top (eccentric); 9 – bearing supports of the shafts; 10 – upper shaft

The central link of the saw block is a dynamically balanced saw module shown in Fig. 4a. Dimensional and mass characteristics of all six saw modules of the saw block are identical. Correction masses 8 and 9 placed in the hinge joints 1 and 5 minimize the negative bending moments in the saw blade 4 arising from the rotation of the shafts 10 and 11 of the saw block. Fastening of a blade (blades) is carried out

by the fasteners 6 and 7, and also by the fingers 2 and the elastic elements 3. In this case, up to 3 and more blades can be simultaneously installed in each saw module. The corresponding angular arrangement of the saw modules, relative to each other on the shafts 10 and 11 of the saw block (Fig. 3, positions 7 and 10) provides dynamic balancing of inertial forces of the whole saw block. Thus, the force influencing the bearing supports of the shafts 9 and the side structures 5 (Fig. 3) arises only from the weight of the saw block and the tension forces (F) of the blades.

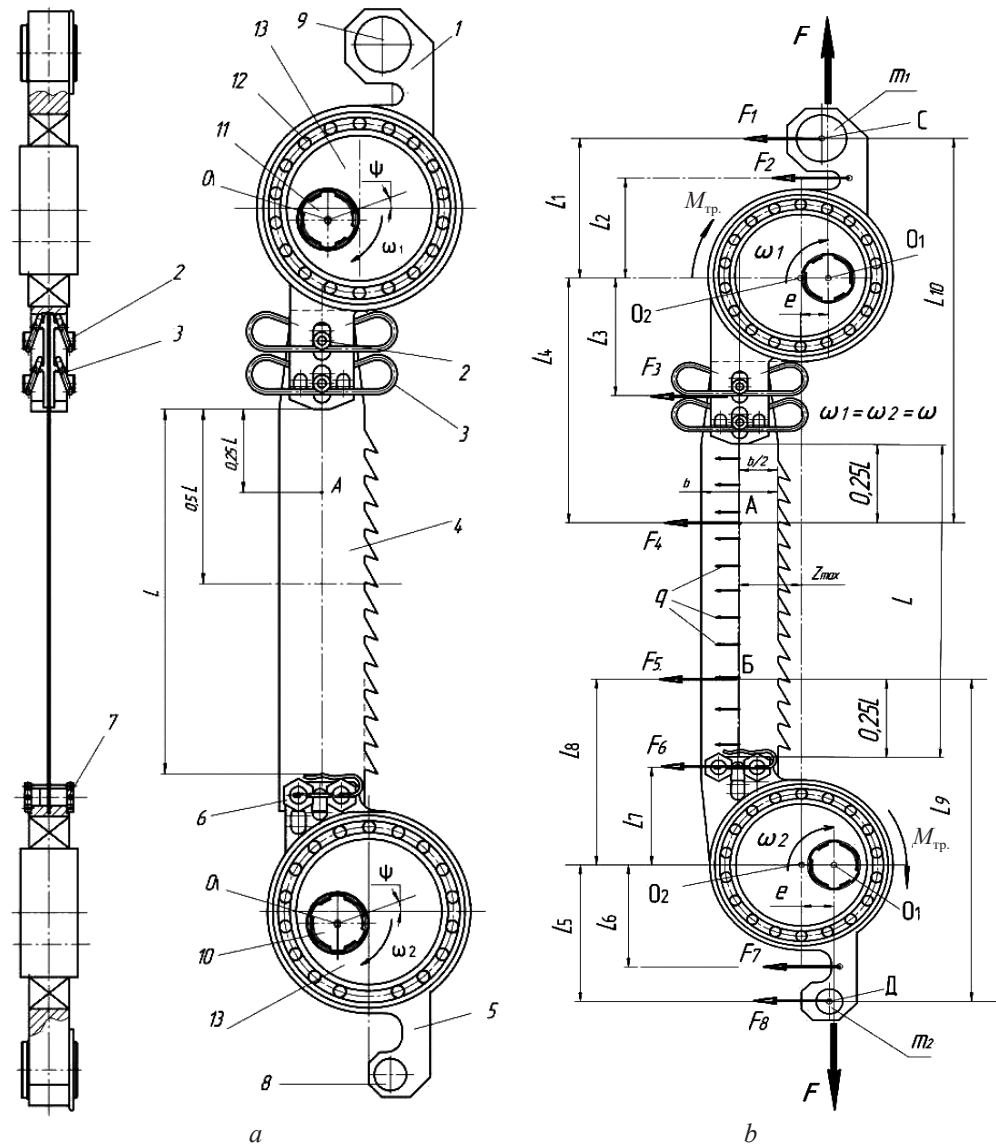


Fig. 4. The saw module of the saw block with circular translational motion of the blades: *a* – angular position of the saw module with the parameter Ψ (angle of rotation of the tops in relation to the point O_1 of the shafts of the saw module); *b* – the scheme of the acting forces in the saw module when it rotates with a frequency ω ; 1 – upper hinge; 2 – finger; 3 – elastic element; 4 – blade; 5 – lower hinge; 6 and 7 – fasteners; 8 – correction mass of the lower hinge joint; 9 – correction mass of the upper hinge joint; 10 – lower shaft; 11 – upper shaft; 12 – bearing; 13 – lower top and upper top (eccentrics) (q – distributed load of inertial forces of the blade)

The main role in ensuring the dynamic stability of the blades as part of the saw module is performed by the correction masses of the upper and lower hinges. During the rotational movement of the saw module, the inertial forces of the correction masses F_1 and F_8 (Fig. 4b) relative to the points of rotation of the hinge joints O_2 balance the inertial forces F_4 and F_5 arising in the saw blade, which ensures the preservation of the geometry of the saw blade. In this case, the points of the reduced masses of the hinges with the elements of fasteners of the saw blades without correction masses are also at points O_2 (O_2 – the axis of rotation of the bearings 12).

We consider the kinematics and dynamics of the saw module in order to calculate and ensure the working motion of the blades of saw modules in the negative feedback mode.

The following conditions are accepted. The lower and upper eccentrics (tops) 13 with the O_2 centres are rigidly connected with the lower and upper shafts. The blade is rigidly connected with the fastening nodes of the upper and lower hinges. The length of the blade is represented by the value L with the mass m_p . The distance from the centre O_2 to the eccentrics of shafts (point O_1) is equal to the eccentricity of rotation of the saw modules e , where O_1 is the axis of rotation of the saw block.

When considering the kinematics of the system (saw module), the hypothesis of small deformation is accepted, and the considered saw module is considered absolutely rigid. The lower eccentric 13 rotates around the axis of the lower shaft with a constant angular velocity ω . The movement from the lower shaft is transmitted directly through the blade to the upper shaft 11, at the angles of rotation of the eccentrics within $90^\circ < \Psi < 270^\circ$, i.e. within the angles of working motion when cutting. The saw module performs a so-called circular translational motion, in which all its points move along similar trajectories with equal speeds and accelerations. The inertial forces q of the blade are represented by two components given at the points A and B .

To ensure the required stiffness, the blade is pre-stretched by the force F applied by the shafts with eccentricity e in relation to the centres of rotation of the eccentrics, as well as eccentricity $Z_{\max}$, applied by the eccentrics in relation to the central axis of the blade (Fig. 4b). Thus, in the extreme positions of the saw module, during its rotation, the values of the eccentricities of the blade tension Z change. At $\Psi = 0^\circ$, the total eccentricity $Z = Z_{\max} - e$, and at $\Psi = 180^\circ$, the total eccentricity $Z = Z_{\max} + e$.

Analytical solution.

Since the bending moment $M_F = F \times Z$ acts on the blade, the left-most position of the saw module at $\Psi = 180^\circ$ is adopted, when considering the conditions of maintaining the flat shape of the blade (when the value of M_F is maximum).

In order to determine the limit values of the saw module total eccentricity Z limited by the loss of stability of the blade under the influence of moments of inertia of all its parts and the tension force F , the analysis of the dependence of Z on the factors stabilizing and ensuring the stability of the blade.

In accordance with the condition of maintaining the flat shape of the saw blade, which is under the influence of extracentral stretching [1], the maximum (critical) moment of M_{cr} is determined:

$$M_{cr} = \pi / \ell (EJGJ)^{1/2}, \quad (1)$$

where E – the modulus of elasticity, with $G = E/2(1 + \mu)$, $\mu = 0.3$; $EJ = E[h^3b/12]$ – the stiffness of the blade to bend in a direction perpendicular to the plane of action of

external moments; $GJ_t = [E/2(1+\mu)] \beta h^3 b$ – torsional stiffness, $\beta = 0.33$ – a function of the ratio b/h , b – the width of the blade, h – the thickness of the blade; $J_t = \beta h^3$.

Then:

$$M_{cr} = \pi/\ell \{E[h^3 b/12] [E/2(1+\mu)] \beta h^3 b\}^{1/2}. \quad (2)$$

For a blade (plate) with the pinched ends, the preservation of the geometry can be provided under the following condition $2M_{cr} > \Sigma M_{pm}$, where ΣM_{pm} – the sum of the moments of the acting inertial forces in the saw module when it rotates with an angular velocity ω .

Let's consider the interaction of forces and moments for the upper part of the saw module (Fig. 4b), limited to half the free length of the blade ($0.5L$). For the upper part of the saw module the total bending moment of the blade is determined by the dependence:

$$M = M_{bcm} - M_{trv} - M_{bcmp} + M_F, \quad (3)$$

where M_{bcm} – moment of inertia of the upper corrective mass, $M_{bcm} = m_1 e \omega^2 L_1$; m_1 – the value of the upper correction mass, which provides balancing $1/2$ of the upper part of the free length of the saw blade L ; e – eccentricity of circular translational motion of the saw module; ω – rotation frequency of the saw module; L_1 – value of the shoulder of the acting force of inertia of the upper correction mass m_1 to the centre of the bearing of the upper hinge joint (point O_2); M_{trv} – the resulting moment of friction from the tension force of the blade and the inertial forces of the upper hinge joint changing in direction during rotational motion, $M_{trv} = (m_{wh} e \omega^2 d_p/2 + F) f_{tr}$; m_{wh} – the mass of the upper hinge joint taking into account the masses of the nodes of the movable fastening of the blade and the correction mass m_1 ; $m_1 = (0.5 m_n e \omega^2 L_4)/L_1$ – from the stabilization condition $1/2$ of the free length of the blade; L_4 – value of the shoulder of the acting inertia force of the upper half of the mass m_p to the centre of the bearing of the upper hinge joint (point O_2); d_p – the diameter of the bearing; F – load on the bearing from the blade tension force; f_{tr} – reduced bearing friction coefficient; M_{bcmp} – moment of inertia forces is given top mass free length of the blade, stabilized by the correction mass m_1 , $M_{bcmp} = 0.5 m_p e \omega^2 L_4$; m_p – the mass of the free length of the blade; M_F – the moment of tension of the blade, $M_F = F(Z_{max} + e)$; Z_{max} – maximum eccentricity of the blade tension, which varies in time and depends on the spatial (angular) location of the saw module.

It should be noted that the centre of mass of the upper hinge, taking into account the fastening unit of the movable fixation of the blade, is located in the centre of the bearing of the upper hinge joint (point O_2).

Determination of dimensional and weight parameters of the saw module ensuring the preservation of the geometry of the blade was carried out under the condition of equilibrium of the moments of forces for the upper part of the saw module:

$$M_{cr} = F(Z + e) - M_{bcm} - M_{tr}. \quad (4)$$

At the same time, the values of the friction moments of the upper and lower hinge joints differ due to the difference in the values of their masses. For the purpose of simplification of calculations it is offered to consider in calculations M_{tr} value as

$$M_{tr} = [(m_{wh} - m_{nsh}) g^{-1} 4 \pi^2 e n_{kop}^2 d_p/2 + F] f_{tr}, \quad (5)$$

where m_{nsh} – the mass of the lower hinge joint taking into account the masses of the blade attachment units and the correction mass m_2 ; n_{kop} – acceptable speed ($2\ 500\ \text{min}^{-1}$), previously entered into the formula for determining M_{cr} , $n_{kop} = 41.66\ \text{s}^{-1}$.

It is necessary to take into account the limitation of rotation speeds of saw modules of $3\,000\text{ min}^{-1}$, since the maximum operating frequency of the selected bearings with grease does not exceed 3000 min^{-1} (bearing No. 92124, GOST 3478–79, durability 15 000–20 000 hours).

Based on the condition:

$$F(Z_{\max} + e) - (M_{\text{tm}} - M_{\text{trb}}) = M_{\text{cr}}, \text{ and } (M_{\text{tm}} - M_{\text{trb}}) = \Delta M_{\text{tr}},$$

then,

$$Z_{\max} = (M_{\text{cr}} - Fe + \Delta M_{\text{tr}})/F, \quad (6)$$

which corresponds to:

$$Z_{\max} = (M_{\text{cr}} + \Delta M_{\text{tr}})/F - e.$$

The calculations determining the dependence of the maximum eccentricity of the saw blade tension on the value of its tension force are carried out. The results of the calculations of the adopted design of the saw module are presented in the table.

Values of the maximum eccentricity of the saw blade tension depending on the value of its tension force

L	$Z_{\max}$ at various values of F , N						
	500	550	600	700	750	800	900
0.25 m	0.100	0.091	0.081	0.060	0.059	0.054	0.045
0.35 m	0.066	0.056	0.050	0.039	0.034	0.030	0.024

The values m_1 and m_2 , as well as L_9 and L_{10} can be variable, and their interdependencies are determined by arithmetic operations from the equilibrium condition of the dynamic system (saw module, Fig. 4b), where m_2 – the value of the lower correction mass of stabilization $\frac{1}{2}$ of the free part of the saw blade.

Since $L_8 0.5 m_p = L_5 0.5 m_2$, and $L_4 0.5 m_p = L_1 0.5 m_p$, it is possible to determine the value of the correcting mass of the lower part of the saw module as:

$$m_2 = m_1 L_1 L_8 (L_5 L_4)^{-1}.$$

The analysis of the results of the calculations for ensuring the elimination of the influence of the lateral force on the saw blade with the condition of the working movement of the band saw blades in the negative feedback mode showed for this design of saw modules the necessity of the following conditions:

the tension force of the blade is provided within $F = 500 \dots 800\text{ N}$ at the free length of the blade $L = 0.25\text{ m}$, the width of the supporting structure of the saw $b = 80\text{ mm}$, the thickness $S = 1.4 \dots 1.5\text{ mm}$ and the height of the teeth $h_z = 15\text{ mm}$.

the tension force of the blade with the free length of the blade $L = 0.35\text{ m}$ should be in the range of $500 \dots 550\text{ N}$.

the rigidity and stability of the blades allows to use of blades made of band.

Conclusion

As it was shown by preliminary calculations, the increase in the daily productivity of the machine with a circular translational motion of the blades (model M2005) in comparison with saw frames increases by 2–4 times; in comparison with band saw equipment of any class by 3–6 times; in comparison with the circular saw equipment (for small and medium enterprises) by 2–4 times.

Analyzing the design scheme and the dynamics of the saw modules, it is possible to note a number of advantages of the multi-saw unit presented as part of the machine. The simplicity and reliability of the design allows us to hope for high functional characteristics, among which we should highlight the following: increasing the accuracy of sawn products due to the rigidity of short blades, increasing productivity, improving the quality of the treated surfaces, as well as reducing energy consumption, relatively light weight and dynamic balance of the main units with increased mobility of equipment and the absence of a massive foundation.

It should be said that thanks to the inventions of the scientists of BMSTU (Moscow) and the recommendations of scientists of NArFU (Arkhangelsk), a fundamentally new scheme of positioning of the saw frame blades without the direct participation of the machine operator in the program control mode was developed. The design of the saw block, shown in Fig. 3, allows its modernization by introducing electromechanical drives for provision software control (robot mode) of the sawing process in order to increase the utilization rate of business wood and reduce labor costs.

At present, the design documentation of the letter “O” has been corrected and prepared for the serial production of the basic model of a multi-saw machine with a circular translational motion of the blades.

REFERENCES

1. А. с. № 146019 СССР, МПК В27В 15/04. Устройство для распиловки древесины: № 734164/25-8: заявл. 09.06.1961; опубл. 1962 / Барташевич Ю.К. [Bartashevich Yu.K. *Device for Sawing Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. 146019, 1962].
2. А. с. № 370026 СССР, МПК В27В 3/00. Лесопильная рама: № 1711986/29-33: заявл. 09.11.71; опубл. 1973 / Дерягин Р.В., Зязин В.В., Шишигин В.И. [Deryagin R.V., Zyazin V.V., Shishigin V.I. *Sawing Frame*. Certificate of Authorship USSR, no. 370026, 1973].
3. Блохин М.А. Исследование, разработка и создание лесопильного оборудования с круговым поступательным движением пильных полотен: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2015. 313 с. [Blokhin M.A. *Research, Development and Creation of Sawmill Equipment with Circular Translational Motion of Saw Blades*: Dr. Eng. Sci. Diss. Moscow, 2015. 313 p.]
4. Валиашивили Н.В., Гаврюшин С.С. Сопротивление материалов и конструкций. М.: Юрайт, 2017. 429 с. [Valiashvili N.V., Gavryushin S.S. *Resistance of Materials and Constructions*. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 429 p.]
5. Патент № 1771443 СССР, МПК В27В 3/00. Лесопильная рама: № 4732392/15: заявл. 03.07.1989; опубл. 23.10.1992. / Буйнов Р.И. [Bujnov R.I. *Saw Frame*. Patent SU, no. SU 1771443 A3, 1992].
6. Патент № 2131806 Российская Федерация, МПК В27В 3/00, В27В 3/12, В28D 1/06. Пильный модуль, пильный блок и устройство для распиловки: № 98106906/13: заявл. 20.04.1998; опубл. 20.06.1999 / Блохин М.А. [Blokhin M.A. *Sawing Module, Sawing Unit and Sawing Apparatus*. Patent RF, no. RU 2131806 C1, 1999].
7. Патент № 2687035 Российская Федерация. МПК В27В 3/00. Многопильный блок с электромеханическим позиционированием пильных модулей: № 2018110263: заявл. 23.03.2018; опубл. 06.05.2019 / Блохин М.А., Гаврюшин С.С. [Blokhin M.A., Gavryushin S.S. *Multi Sawing Unit with Electromechanical Positioning of Saw Modules*. Patent RF, no. RU 2687035 C1, 2019].
8. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И. Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках: моногр. Архангельск: АГТУ, 2009.

380 с. [Prokof'yev G.F., Ivankin I.I. *Efficiency Improvement of Wood Sawing on Saw Frames and Bandsaw Machines*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2009. 380 p.].

9. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И., Казанцев В.А. Повышение качества пиления древесины на лесопильных рамах: моногр. Архангельск: АГТУ, 2007. 192 с. [Prokof'yev G.F., Ivankin I.I., Kazantsev V.A. *Improving the Quality of Wood Sawing on Saw Frames*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 192 p.].

10. Прокофьев Г.Ф., Микловцик Н.Ю. Основы прикладных научных исследований при создании новой техники: моногр. Архангельск: САФУ, 2014. 171 с. [Prokof'yev G.F., Miklovtsik N.Yu. *Fundamentals of Applied Scientific Research in the Creation of New Technology*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2014. 171 p.].

11. ASTM Standard G119. Standard Guide for Determining Amount of Synergism between Wear and Corrosion. *Annual Book of ASTM Standards. Vol. 03.02: Corrosion of Metals; Wear and Erosion*. West Conshohocken, PA, ASTM, 2001.

12. Bayer R.G. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. New York, CRC Press, 2004. 416 p.

13. *Characterization of Corrosion Products on Steel Surfaces*. Ed. by Y. Waseda, S. Suzuki. Berlin, Springer, 2006. 297 p. DOI: [10.1007/978-3-540-35178-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35178-8)

14. Darmawan W., Rahayu I.S., Tanaka C., Marchal R. Chemical and Mechanical Wearing of High Speed Steel and Tungsten Carbide Tools by Tropical Woods. *Journal of Tropical Forest Science*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 255–260.

15. El-Batahy A.M., Ramadan A.R., Moussa A.-R. Laser Surface Hardening of Tool Steels – Experimental and Numerical Analysis. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 146–153. DOI: [10.4236/jsemt.2013.32019](https://doi.org/10.4236/jsemt.2013.32019)

16. Huvi R., Heikki V. *Tasapainoitettu raamisaha* [Balanced Frame Saw]. Patent FI, no. FI 25783 A, 1952.

17. Landolt D. *Corrosion and Surface Chemistry of Metals*. Switzerland, EPFL Press, 2007. 400 p.

18. Lee J.-H., Jang J.-H., Joo B.-D., Son Y.-M., Moon Y.H. Laser Surface Hardening of AISI H13 Tool Steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19, iss. 4, pp. 917–920. DOI: [10.1016/S1003-6326\(08\)60377-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60377-5)

19. McGehee J.W. *Reciprocating Gang Saw*. Patent US, no. 3,929,048. 1975.

20. Mizutani A., Tsuge K., Matsubara K., Ito A. *Band Saw Having Adjustable Blade Guide*. Patent US, no. US 2012/0055312 A1, 2012.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ БОКОВОЙ СИЛЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПИЛЬНОГО ПОЛОТНА

М.А. Блохин, д-р техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9537-0917>

Д.А. Подлесный, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-6585>

О.А. Родионов, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7603-3413>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005; e-mail: hornet10@yandex.ru

Точность толщины пиломатериалов является одним из самых важных показателей пиления. Она неразрывно связана с обеспечением устойчивости пилы в плоскости ее наибольшей жесткости. Цель исследования – устранение влияния боковой силы на пильное полотно и разнотолщинность получаемого пиломатериала. Классическими методами, при рамном пилении и пилении на ленточнопильных станках, задача устранения влияния боковой силы относится к конструктивному решению в совокупности с аналитическим. Поэтому важно при разработке нового станка выявить наличие огромного

спектра частот собственных и параметрических колебаний пильных полотен. Ранее эти частоты не могли быть найдены аналитически в полном объеме и, соответственно, не могла быть осуществлена отстройка рабочих частот станка от возможных частот колебаний пильных полотен. В силу сложности и наукоемкости решение этой проблемы невозможно без применения современных численных методов расчета. К ним относятся: метод конечных элементов, программные продукты NX и ANSYS и другие оригинальные программы. Одним из методов, который позволяет снизить влияние боковой силы, является определение «устойчивости плоской формы изгиба по Л. Эйлеру». Техническое решение, представленное принципиально новым пильным блоком с круговым поступательным движением полотен, значительно снижает влияние боковой силы на точность пиления в совокупности с рядом иных достоинств. Одновременно с этим решается задача обеспечения динамической устойчивости полотен как при пилении, так и в режиме холостого хода. Необходимо отметить, что при круговом поступательном движении боковые режущие кромки зубьев испытывают знакопеременную нагрузку, скобля по поверхности пропила. Поэтому к прочностным характеристикам режущего элемента зуба предъявляются повышенные требования. Для сохранения целостности уголков кончиков зубьев были скорректированы углы их заострения. Проведено исследование возможности упрочнения боковых режущих кромок зубьев пильных полотен, изготовленных из сталей различных марок. В ходе изучения причин износа и коррозии элементов пильного модуля и его рабочей части (зубьев полотна) принято решение о снабжении зубьев твердым сплавом типа «стеллит». Однако это требует проведения дополнительных натурных испытаний. Предварительные расчеты показали, что суточная производительность станка с круговым поступательным движением полотен (модель М2005) по сравнению с лесопильными рамами увеличивается в 2–4 раза, с ленточно-пильным оборудованием любого класса – в 3–6 раз, с круглопильным оборудованием (для малых и средних предприятий) – в 2–4 раза. Анализ конструктивной схемы многопильного блока и динамики движения пильных модулей выявил ряд достоинств. Простота и надежность конструкции позволяет надеяться на высокие функциональные характеристики, среди которых следует особо отметить рост производительности оборудования, повышение точности пилопродукции за счет жесткости коротких полотен, улучшение качества обработанных поверхностей пиломатериалов, снижение энергопотребления, относительно малый вес, динамическую сбалансированность основных узлов при повышенной мобильности оборудования и отсутствии массивного фундамента.

Для цитирования: Blokhin M.A., Podlesny D.A., Rodionov O.A. Solving the Problem of Reducing the Influence of Lateral Force on the Saw Blade Stability // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С.118–128. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-118-128

Ключевые слова: пильный модуль, пильный блок, частота колебаний, динамическая устойчивость, боковая сила, разнотолщинность.

Поступила 28.06.19 / Received on June 28, 2019

УДК 674.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-129-145

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ PLA

И.К. Говядин, асп.; *ResearcherID:* [AAF-5782-2019](https://orcid.org/0000-0002-0143-1916),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-1916>

А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [I-9432-2016](https://orcid.org/0000-0001-7914-8056),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-8056>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;

e-mail: govyaadin812@gmail.com, a.n.chubinsky@gmail.com

Представлены результаты исследования древесно-полимерной нити для печати методом послойного наплавления. 3D-печать, используемая при изготовлении изделий со сложными геометрическими формами, может быть составной частью производства малых архитектурных форм, мебельного декора, детских игрушек. Аддитивные технологии позволяют перейти на безотходное производство, а также применять возобновляемое биологическое сырье. Использование древесно-полимерных композитов для инкрустации мебели позволяет снизить себестоимость готового изделия. В ходе эксперимента на одношнековом экструдере были изготовлены нити диаметром 1,7 мм из смеси наполнитель (древесная мука)/связующее (полилактид). Установлено, что наполнитель равномерно распределен по объему связующего в виде частиц сферической либо удлиненной формы с размерами от 0,2 до 1,2 мкм. Размер зон с повышенной концентрацией частиц наполнителя изменяется от 2,7 до 9,8 мкм. Обнаружены пустоты произвольной формы (с размерами от 9,5 до 32,5 мкм) в срезах древесно-полимерной нити, полученных перпендикулярно ее длине. Исследование срезов нити в режиме «скрещенных николей» показало мозаичный характер двулучепреломления. Размер агрегатов с интенсивным двулучепреломлением из сферических частиц изменяется от 4,5 до 55,1 мкм. Вероятно, частицы древесной муки являются зародышами для кристаллизации связующего (полилактида), что проявляется в возникновении этих зон. Изучение вязкости древесно-полимерного композита от температуры показало, что в сравнении с полилактидными (PLA) нитями существенных отличий не обнаружено. Установлены температуры стеклования (58,19 °C) и начала плавления (214,00 °C), что подтверждает схожесть нитей из древесно-полимерного композита с нитями PLA. Результаты испытаний на водопоглощение свидетельствуют, что в исследуемых образцах массовая доля воды значительно увеличивается с ростом содержания наполнителя в материале и высоты напечатанного слоя. Измерение краевого угла смачивания образцов показало, что водно-дисперсионные лаки частично смачивают поверхность древесно-полимерного композита, создавая условия адгезионного взаимодействия. По прочности при разрыве и модулю упругости при растяжении (при 100 % плотности заполнения) образцы из древесно-полимерной композиции уступают нитям из PLA, но имеют лучшие показатели по сравнению с образцами из ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) пластика. Тепловизионное исследование позволило зафиксировать быстрое снижение температуры слоев модели от уровней, возникающих на выходе из сопла, до значений средней зоны модели и разделить термические зоны на три уровня, а также подтвердило схожесть с образцами из PLA-нити.

Для цитирования: Говядин И.К., Чубинский А.Н. Исследование свойств древесно-полимерного композита на основе PLA // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 129–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-129-145

Ключевые слова: древесно-полимерная композиция, FDM-печать, древесная мука, полилактид, древесно-полимерная нить для FDM-печати, свойства древесно-полимерной нити.

Введение

Технологии 3D-печати стремительно развиваются. 3D-принтеры становятся все более доступными и применяются в различных отраслях [14, 20]. Наиболее востребованным является моделирование методом наплавки (FDM) [20], благодаря использованию различных материалов, ассортимент которых вырос.

Одна из существенных проблем синтетических полимерных материалов, используемых в 3D-печати для послойного наплавления, – высокая стойкость к физико-химическому и биологическому разложению. В последнее десятилетие проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды и растущей осведомленностью об ограниченных ресурсах, побудили научное сообщество изучать и оптимизировать возобновляемые альтернативы традиционным пластмассам из нефти. Биопластики полностью или частично получают из возобновляемых ресурсов – они обладают уникальным преимуществом по сравнению с обычными пластмассами. При этом снижается зависимость от невозобновляемого сырья, такого как сырая нефть, и сокращаются выбросы парниковых газов [5, 8, 18, 22]. Биопластики в основном производятся из сельскохозяйственного сырья, т. е. растений, богатых углеводами (кукуруза, сахарный тростник) [8, 18]. Но такие пластики довольно дороги, и одним из возможных путей снижения их цены является использование в качестве наполнителя дешевых продуктов, например древесной муки. Преимущество древесно-полимерной продукции заключается в том, что готовые изделия получают из отходов производства. Отсутствие эмиссии вредных веществ расширяет область их применения, позволяя использовать в помещениях с повышенными санитарно-гигиеническими требованиями (лечебные учреждения, детские сады, школы). Способность к повторному формированию при FDM-печати и довольно легкое придание любой геометрической формы с последующим сохранением ее после охлаждения делают этот материал пригодным для создания сложных архитектурных форм. Получаемый материал характеризуется высокой шуруподоудерживающей способностью, прост в обработке, для которой используются тоже оборудование и инструмент, что и при обработке древесных изделий.

Для принятия решения о применении древесно-полимерного композита (ДПК) при изготовлении какой-либо продукции необходимо знать его физико-механические свойства в зависимости от соотношения пластика и наполнителя в готовом продукте.

Объекты и методы исследования

Расходный материал для формирования изделий методом FDM-печати получали на шнековом экструдере собственной разработки [2]. Древесно-полимерную нить изготавливали, используя гранулы полилактида (PLA) (табл. 1) и древесную муку из древесины хвойных пород (марка 120, ГОСТ 16361–87).

Таблица 1

Характеристика PLA [19]

Показатель	Метод испытаний	Единицы измерений	Эталонное значение
Внешний вид	Визуальный	–	Полупрозрачный
Плотность	GB/T1033–1986	г/см ³	1,25±0,05
Температура плавления	GB/T19466.3–2004	°C	175...179
Температура стеклования	GB/T19466.3–2004	°C	> 55
Прочность на растяжение	GB/T1040–1992	МПа	≥ 60
Относительное удлинение при разрыве	GB/T1040–1992	%	≥ 5
Прочность на изгиб	GB/T1040–1992	МПа	≥ 90
Испытание на ударную вязкость по Изоду	GB/T1043–1992	кДж/м ²	≥ 3,5

В экструдер загружали компоненты с определенным соотношением древесной муки и полимерного связующего и получали нить диаметром 1,7 мм [1]. Выходящая из экструдера нить перед процедурой намотки поступала в специальные ванны, которые обеспечивали ее постепенное и равномерное охлаждение.

Для проведения экспериментов изготавливали нити с различным соотношением полилактида и древесной муки. В качестве контрольных образцов использовали нити из PLA и ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) пластиков.

Морфологию нити изучали методом оптической микроскопии на аналитическом комплексе, включающем оптический микроскоп Leica DM-2500, цветную цифровую камеру DFC-420, специализированную компьютерную станцию и программное обеспечение Leica Application Suite.

Объектами исследования являлись: срезы параллельно и перпендикулярно длине исходной древесно-полимерной нити, выполненные с помощью ультрамикротомы Leica SM 1510S; нитевидные фрагменты изделия-композита. Срезы и фрагменты просвечивали в диапазоне длин волн от 200 до 1200 нм в режимах: «светлое поле» в естественном и поляризованном свете, «фазовый контраст» и «скрещенные николи».

Вязкость древесно-полимерной нити в сравнении с нитью из PLA определяли при температуре 80...200 °C согласно ГОСТ Р 57950–2017; скорость нагрева – 5 °C/мин; деформация – 7 %; частота деформации – 1 Гц.

Образцы печатали на 3D-принтере собственной разработки на основе Duet 2. При печати нитью с большим содержанием древесных волокон имело место закупоривание выходного отверстия печатающей головки, поэтому для образцов с содержанием древесной муки 20 и 30 % использовали сопла с диаметром выходного отверстия 0,2 и 0,4 мм соответственно, с содержанием муки 40 % – с диаметром 0,6 мм. Скорость печати для всех образцов составляла 50 мм/с, температура печати – 210 °C. Подготовку печатной модели осуществляли в программе Ultimaker Cura (version 4.2.1).

Отношение заполненного пространства ко всему внутреннему объему детали при формировании изделий методом FDM-печати называют плотностью заполнения. Образы, напечатанные из древесно-полимерной нити, имели раз-

ный показатель плотности заполнения. Контур модели – это стенка, отделяющая внешнее пространство от внутреннего. Так как модели для печати обычно имеют замкнутый объем, то, когда печать закончена, внутреннее пространство полностью скрыто. Модели с разной плотностью заполнения (20...100 %) представлены на рис. 1.

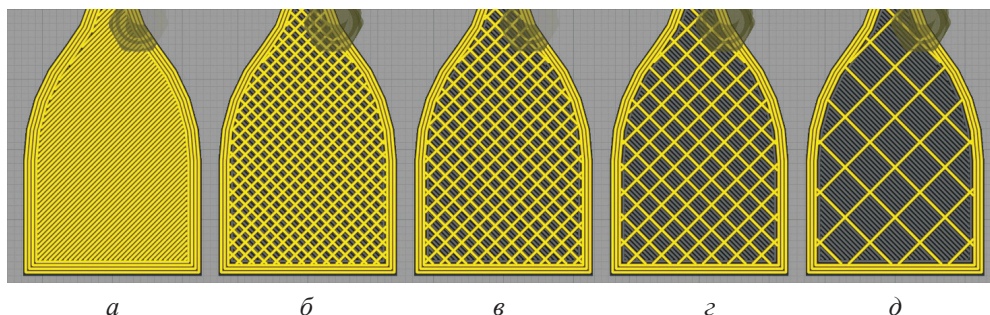


Рис. 1. Плотность заполнения образцов для механических испытаний, %: а – 100; б – 80; в – 60; г – 40; д – 20

Fig. 1. Filling density of the samples for mechanical tests, %: а – 100; б – 80; в – 60; г – 40; д – 20

Исследования с применением дифференциальной сканирующей калориметрии проводили на приборе Perkin Elmer DSK-8500. Условия испытания: предварительное охлаждение образца до температуры 0 °С; выдержка его при данной температуре в течение 1 мин; постепенный нагрев образца от 0 до 200 °С; скорость нагрева 10 °С/мин.

Для проведения физико-механических испытаний напечатаны стандартные образцы (лопатки) типа 1 по ГОСТ 11262–80 (рис. 2) в количестве 10 шт. для каждого вида ДПК с разными содержанием древесной муки и плотностью заполнения.

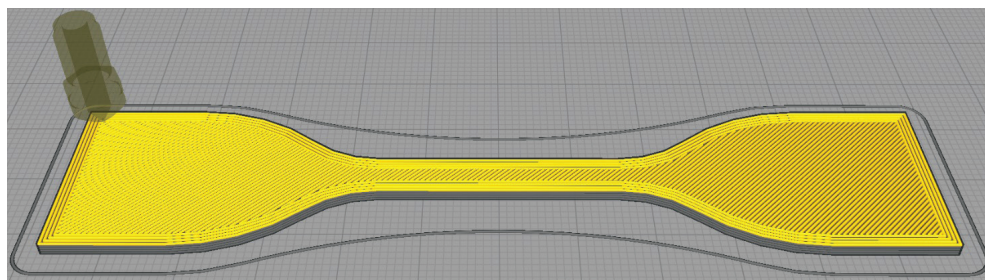


Рис. 2. Стандартные образцы (лопатки) типа 1 по ГОСТ 11262–80

Fig. 2. Standard samples (blades) of type 1 defined in the state standard GOST 11262–80

Прочность при разрыве определяли по ГОСТ 11262–80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», модуль упругости при растяжении – по ГОСТ 9550–81 «Пластмассы. Метод определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе». Испытания на прочность проводили на универсальной испытательной машине RTM-1T (фирма «ORIENTEC Co», Япония) при температуре 25 °С, относительной влажности окружающей среды 24 %, скорости перемещения подвижного захвата разрывной машины 50 мм/мин, на растяжение – при скорости 1 мм/мин.

Для определения водопоглощения (адсорбции воды), а также массы воды, поглощенной образцом при погружении в воду, использовали ГОСТ 4650–2014 (ISO 62:2008) «Пластмассы. Методы определения водопоглощения».

Испытуемые образцы погружали в дистиллированную воду при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение установленного периода времени. Массу воды, поглощенную каждым испытуемым образцом, вычисляли по разности между массой образца до и после испытания, выраженной в процентах по отношению к начальной массе. При этом использовали: весы лабораторные, производящие взвешивание в миллиграммах с точностью до первого десятичного знака; сушильный шкаф с принудительной циркуляцией воздуха; контейнеры, содержащие дистиллированную воду, оснащенные средствами нагревания, которые обеспечивали поддержание заданной температуры; эксикатор.

Для устранения факторов, способных повлиять на показатели поглощения воды, поверхности образцов перед испытаниями очищали с помощью специального средства, не изменяющего их свойства, затем образцы тщательно просушивали при температуре $(50,0 \pm 2,0)^\circ\text{C}$ в течение 24 ч, охлаждали при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и взвешивали, фиксируя результат взвешивания в миллиграммах с точностью до первого десятичного знака.

Эксперимент проводили на 3 образцах в форме диска диаметром (50 ± 1) мм толщиной $(3,0 \pm 0,2)$ мм. Формирование образцов осуществляли на 3D-принтере методом FDM-печати. Каждую партию образцов печатали с разными процентным соотношением древесной муки/полилактида и высотой слоя. Высота слоя – настраиваемый параметр, который определяет, на какую высоту по вертикали (по оси Z) смещается печатающая головка при переходе к следующему слою.

Каждый набор из 3 образцов помещали в отдельный контейнер и полностью погружали в дистиллированную воду. Образцы укладывали в таком порядке, чтобы исключить соприкосновение друг с другом и стенками контейнера. После выдержки в воде в течение (24 ± 1) ч их извлекали, удаляли воду с них фильтровальной бумагой и в течение не более 1 мин после извлечения взвешивали с точностью $\pm 0,1$ мг.

Также вводили поправку на потерю растворимого в воде вещества в результате выдержки в воде. С этой целью после погружения повторно кондиционировали испытуемые образцы до постоянной массы таким же образом, как в первоначальный период сушки, и сравнивали разность масс, которую учитывали как потерю растворимого в воде вещества.

Для каждого испытуемого образца рассчитывали массовую долю воды, поглощенной им:

$$C = \frac{m_2 - m_3}{m_1} 100 \%,$$

где m_1 , m_2 , m_3 – масса образца после первоначального просушивания и перед погружением в воду, после выдержки в воде, после выдержки и окончательного просушивания соответственно, мг.

За результат испытаний принимали среднеарифметическое значение 3 результатов, полученных при одинаковой продолжительности выдержки в воде.

Для повышения влаго- и атмосферостойкости изделия из ДПК покрывают лакокрасочными материалами, долговечность защитного действия которых зависит от сил адгезионного взаимодействия, оцениваемых краевым углом смачивания. Способность ДПК смачиваться изучали на приборе фирмы «Kruiss» с программным обеспечением DSA (Drop Shape Analyzer). Краевой угол смачивания определяли методом лежащей капли. Образцы перед исследованием промывали дистиллированной водой и сушили в течение суток. Каплю водно-дисперсионного акрилового лака помещали на поверхность образца с помощью шприца вручную. Диаметр капли – около 5 мм. Температура в помещении 24 °С.

Для наблюдения за распределением температуры при печати на FDM-принтере использовали тепловизор Testo 875-2i.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования морфологии нити методом оптической микроскопии установлено, что в исходном композите (древесно-полимерная нить диаметром 1,7 мм) наполнитель присутствует в виде частиц сферической либо удлинённой формы с размерами от 0,2 до 1,2 мкм. Размер зон с повышенной концентрацией частиц наполнителя изменяется в диапазоне 2,7...9,8 мкм. Оптическая плотность частиц наполнителя ниже, чем матрицы (полилактида). Распределение частиц наполнителя изотропно, преимущественной ориентации его частиц не обнаружено как в срезах, полученных параллельно длине древесно-полимерной нити (рис. 3, *а*), так и в срезах, полученных перпендикулярно длине нити (рис. 3, *б*).

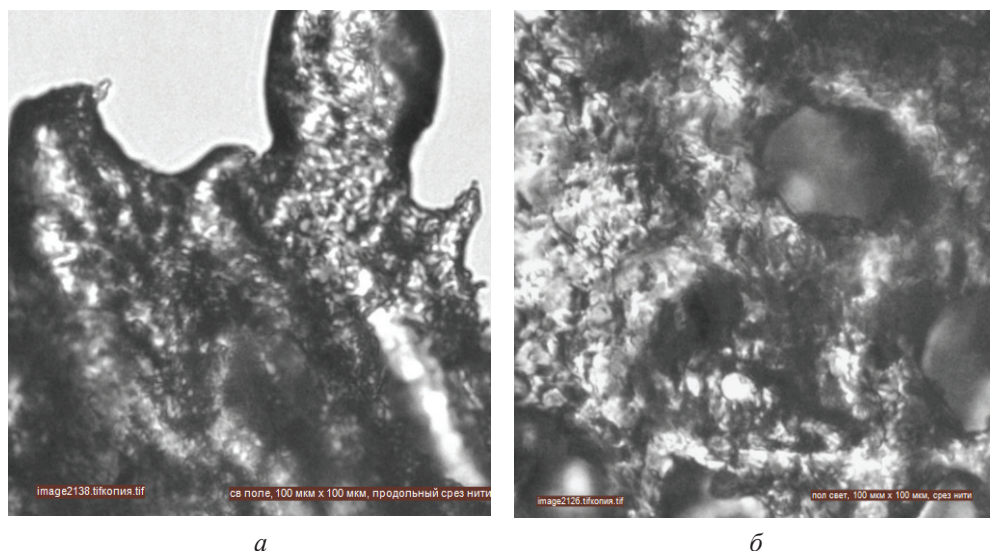


Рис. 3. Микрофотографии срезов древесно-полимерной нити, полученных параллельно (*а* – светлое поле в естественном свете) и перпендикулярно (*б* – светлое поле в поляризованном свете) ее длине (размер кадров: 100×100 мкм)

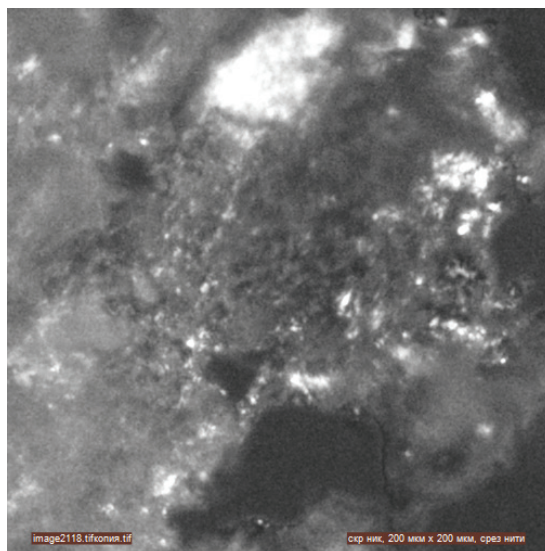
Fig. 3. Microphotographs of the wood-polymer filament sections obtained parallel to the filament length (*a* – bright field in natural light) and perpendicular to the filament length (*b* – bright field in polarized light). Frame size: 100×100 μm

Обращает на себя внимание наличие пустот в срезах древесно-полимерной нити, полученных перпендикулярно ее длине (рис. 3, б). Форма пустот произвольна, их размер изменяется от 9,5 до 32,5 мкм.

Исследование срезов нити в режиме скрещенных николей показало мозаичный характер двулучепреломления. Размер агрегатов с интенсивным двулучепреломлением из сферических частиц изменяется в диапазоне от 4,5 до 55,1 мкм (рис. 4).

Рис. 4. Микрофотография среза древесно-полимерной нити, полученного перпендикулярно ее длине (режим – скрещенные николи; размер кадра – 200×200 мкм)

Fig. 4. A microphotograph of a wood-polymer filament section obtained perpendicular to the filament length. Mode: crossed Nicols. Frame size: 200×200 μm



Вероятно, частицы древесной муки являются зародышами для кристаллизации связующего – полилактида, что проявляется в возникновении зон двулучепреломления при исследовании срезов в режиме скрещенных николей.

На рис. 5 представлены микрофотографии фибрилл. Фибриллы переменной толщины (125...324 мкм) содержат цепочки частиц наполнителя, ориентированные вдоль направления экструзии (см. рис. 5, а). Размер зон двулучепреломления – от 1,2 до 29,5 мкм (рис. 5, б, в).

В результате исследования морфологии древесно-полимерной нити на основе древесной муки и полилактида установлено следующее:

частицы наполнителя размером 0,2...1,2 мкм равномерно распределены по объему связующего;

преимущественной ориентации частиц наполнителя в исходной древесно-полимерной нити диаметром 1,7 мм не обнаружено;

древесно-полимерная нить содержит пустоты произвольной формы диаметром от 9,5 до 32,5 мкм;

частицы древесной муки являются зародышами для кристаллизации полилактида;

головка экструдера ориентирует частицы наполнителя вдоль направления экструзии с образованием цепочечных структур.

Результаты исследования зависимости вязкости от температуры ДПК с применением дифференциальной сканирующей калориметрии (рис. 6) позволяют обосновать параметры режимов обработки нити при печати изделий из такого композита.

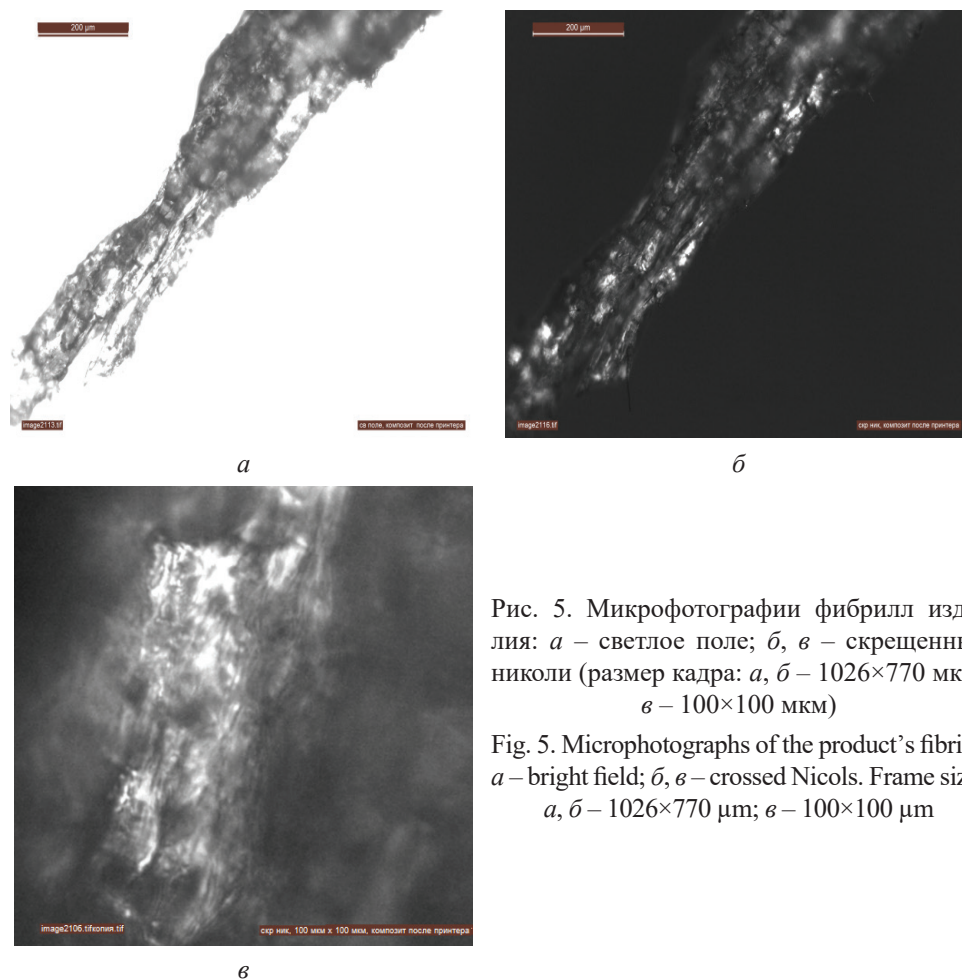


Рис. 5. Микрофотографии фибрилл изделия: *a* – светлое поле; *б, в* – скрещенные николи (размер кадра: *a, б* – 1026×770 мкм; *в* – 100×100 мкм)

Fig. 5. Microphotographs of the product's fibrils: *a* – bright field; *б, в* – crossed Nicols. Frame size: *a, б* – 1026×770 μm; *в* – 100×100 μm

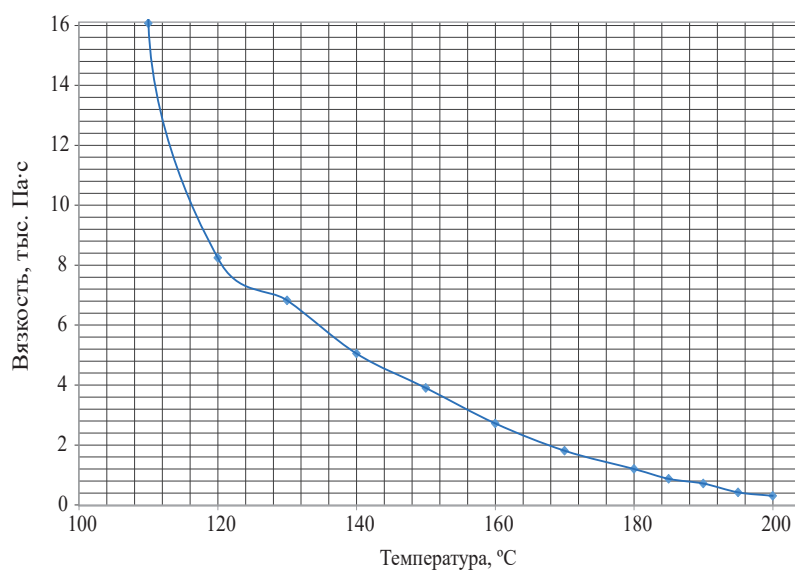


Рис. 6. Зависимость вязкости от температуры ДПК

Fig. 6. The dependence of viscosity on temperature of the wood-polymer composite

Используя данные, полученные в ходе экспериментов, установлены температура стеклования образца (58,19 °C) и температура начала плавления (214,00 °C), что является обоснованием входных параметров для FDM-печати с помощью ДПК (рис. 7).

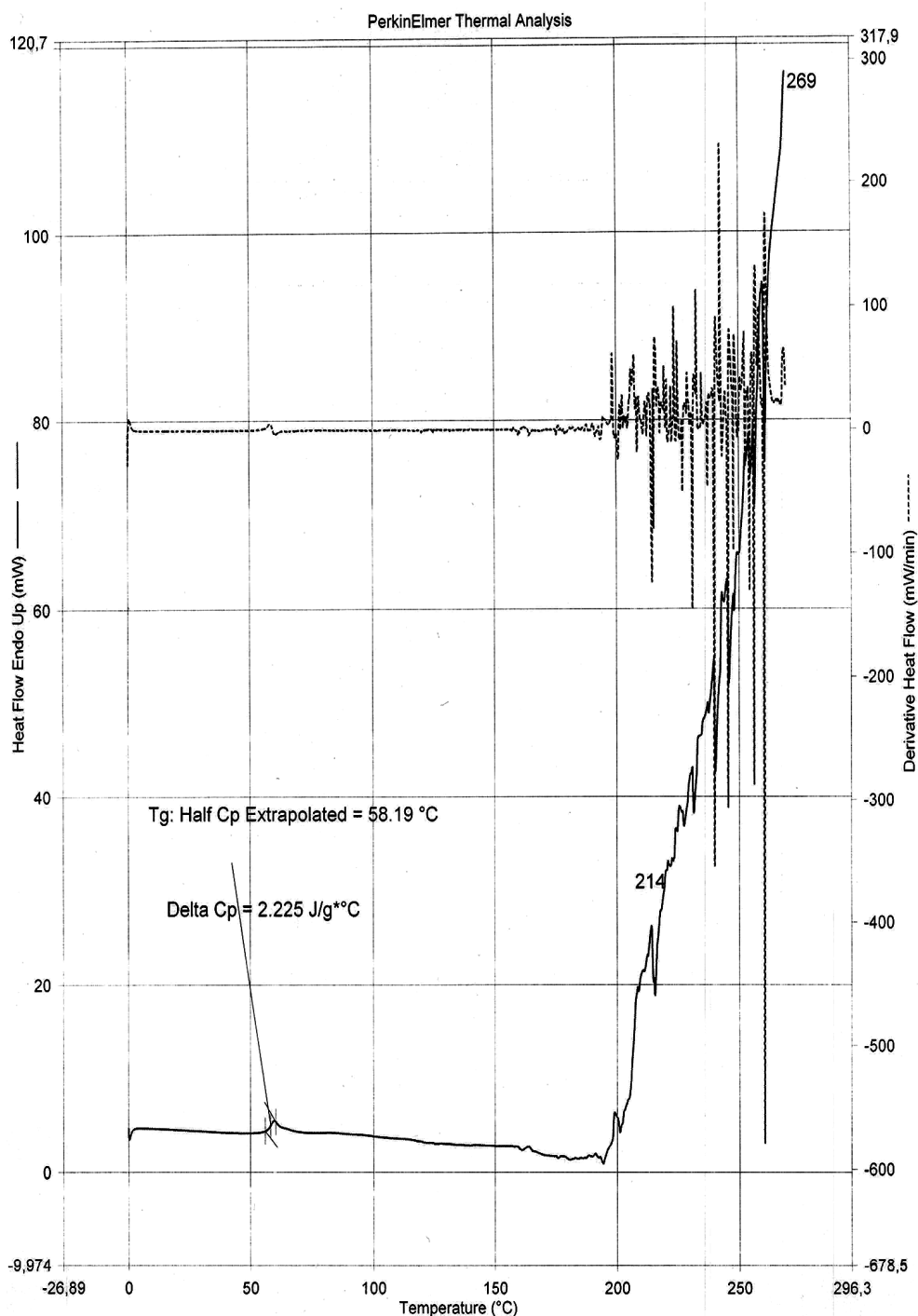


Рис. 7. Зависимость тепловых потоков от температуры при FDM-печати

Fig. 7. The dependence of heat fluxes on temperature when FDM-printing

В табл. 2 приведены результаты испытаний на водопоглощение, а также определения массовой доли воды, поглощенной образцами из ДПК при погружении их в дистиллированную воду.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на водопоглощение

Содержание древесной муки, %	Высота слоя, мм	m_1	m_2	m_3	$m_2 - m_1$	C, %
		мг				
0	0,1	6351	6580	6350	229	3,6214
	0,2	6055	6291	6057	236	3,8645
	0,3	5753	6023	5753	270	4,6932
20	0,1	6007	6350	6000	343	5,8265
	0,2	5704	6082	5709	378	6,5392
	0,3	5400	5817	5396	417	7,7962
30	0,1	5751	6256	5750	505	8,7984
	0,2	5482	6042	5484	560	10,1787
	0,3	5150	5774	5157	624	11,9805
40	0,1	5101	6056	5098	955	18,7806
	0,2	4802	5785	4803	983	20,4498
	0,3	4500	5659	4500	1159	25,7555

Данные рис. 8 отражают зависимость массовой доли воды, поглощенной образцом из ДПК с содержанием 30 % древесной муки из древесины хвойных пород, от высоты слоя. Поглощение воды в образцах значительно возросло при увеличении высоты печатного слоя.

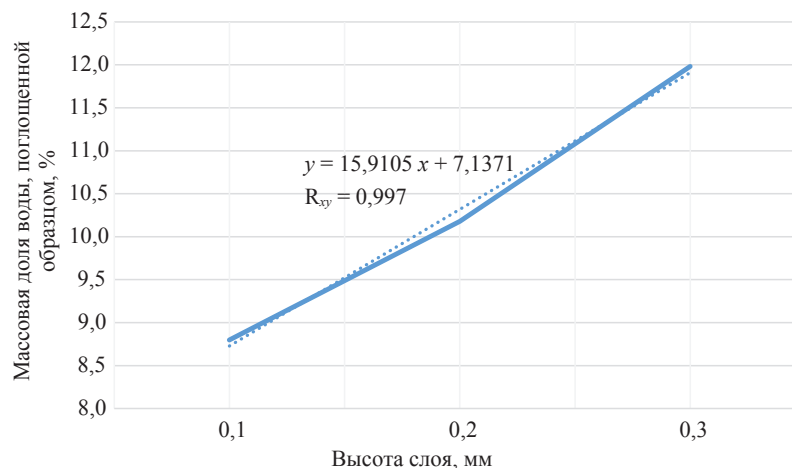


Рис. 8. Влияние высоты печатного слоя на массовую долю воды, поглощенной образцом из ДПК с содержанием 30 % древесной муки из древесины хвойных пород

Fig. 8. The effect of the printing layer height on the mass fraction of water absorbed by a wood-polymer composite sample containing 30 % (WPC-30) of coniferous wood flour

Полученные результаты можно объяснить пустотами между слоями в напечатанных образцах, что отмечено в исследовании [12] на основе данных сканирующей электронной микроскопии (микроскоп Tescan Vega 3 LMH) (рис. 9).

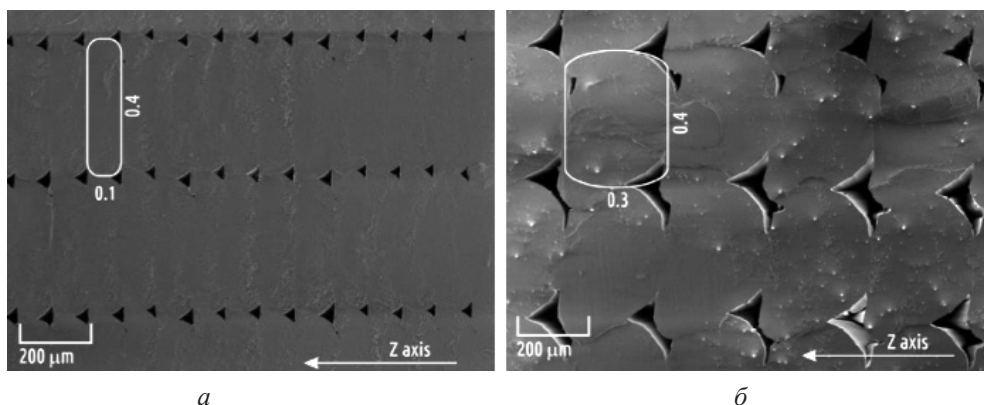


Рис. 9. Изображения поперечных сечений образцов из ДПК с различной высотой печатного слоя, мм: *a* – 0,1; *б* – 0,3 [7]

Fig. 9. Images of the cross sections of the WPC samples with various height of the printing layer, mm: *a* – 0.1; *б* – 0.3 [7]

Это является следствием того, что общая площадь пустот в образце возросла с повышением высоты слоя (аналогично исследованию [6]) и тем самым вызвала увеличение массы воды, поглощенной образцом.

Кроме того, нить содержит сухую древесную муку, которая представляет собой природный гидрофильный полимер, имеющий большое количество гидроксильных групп в молекулярных цепях. При контакте с водой сухая древесная мука, поглощая воду, разбухает, ее влагосодержание увеличивается, приближаясь к пределу насыщения клеточных стенок, что видно на образцах, содержащих 40 % древесной муки (табл. 2). Следует заметить, что полимер обволакивает древесные частицы и уменьшает их гигроскопичность по сравнению с обычной древесиной.

На рис. 10 представлены результаты измерения краевого угла смачивания (θ) испытываемых образцов при разном содержании древесной муки.

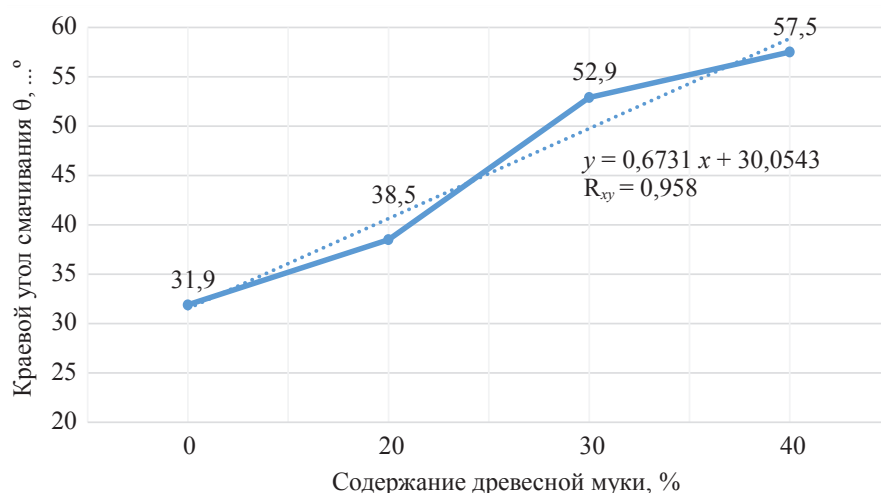


Рис. 10. Зависимость краевого угла смачивания от содержания древесной муки в образце ДПК

Fig. 10. The dependence of the contact angle on the wood flour content

Из рис. 10 видно, что водно-дисперсионные лаки частично смачивают поверхность ДПК, создавая условия адгезионного взаимодействия [3].

Результаты измерения имеют достаточно высокое среднее квадратичное отклонение из-за неоднородности поверхности и ширины наносимого слоя ДПК, которые вместе образуют поверхности с достаточно высокой шероховатостью.

В табл. 3 приведены результаты определения прочности при разрыве и модуля упругости при растяжении образцов из различных материалов.

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов

Материал	Содержание древесной муки, %	Плотность заполнения, %	Масса образца, г	Прочность при разрыве, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа
ДПК	20	100	4,40	40,1	5352
		80	4,06	38,8	4875
		60	3,82	34,2	4486
		40	3,39	30,0	4284
		20	3,00	24,1	4014
ДПК	30	100	4,31	36,7	5106
		80	3,98	33,2	4828
		60	3,66	29,0	4391
		40	3,28	28,6	4273
		20	2,99	22,7	3684
ДПК	40	100	4,29	33,1	4621
		80	3,97	30,5	4124
		60	3,48	25,9	3575
		40	3,25	24,3	3412
		20	2,99	20,1	3386
PLA	0	100	4,45	56,8	5560
		80	4,17	42,4	5372
		60	3,91	36,5	4920
		40	3,60	31,2	4519
		20	3,30	27,4	4195
ABS	0	100	4,20	36,4	3467
		80	3,91	32,6	3152
		60	3,54	26,8	2812
		40	3,24	22,7	2598
		20	2,95	17,5	2274

На прочность изделий при FDM-печати влияет множество различных факторов, поэтому полученные данные следует использовать только в качестве вспомогательных для сравнительной оценки материала с различным содержанием древесной муки.

Анализ результатов табл. 3 показал, что при 100 %-й плотности заполнения образцы из ДПК с содержанием 30 % древесной муки из древесины хвойных пород (ДПК-30) уступают по прочности образцам из PLA, но превосходят образцы из ABS. Со снижением плотности заполнения прочность ДПК уменьшается в равной степени по сравнению с образцами из PLA и ABS. Сравнивая с механическими характеристиками напечатанных изделий на основе различных

полимерных материалов [4, 7, 9–11, 13, 15–17], можно сделать вывод, что ДПК имеет аналогичные показатели.

На рис. 11 представлена зависимость механических показателей образцов ДПК-30 от плотности заполнения, которая с высокой точностью описывается уравнением прямой линии.

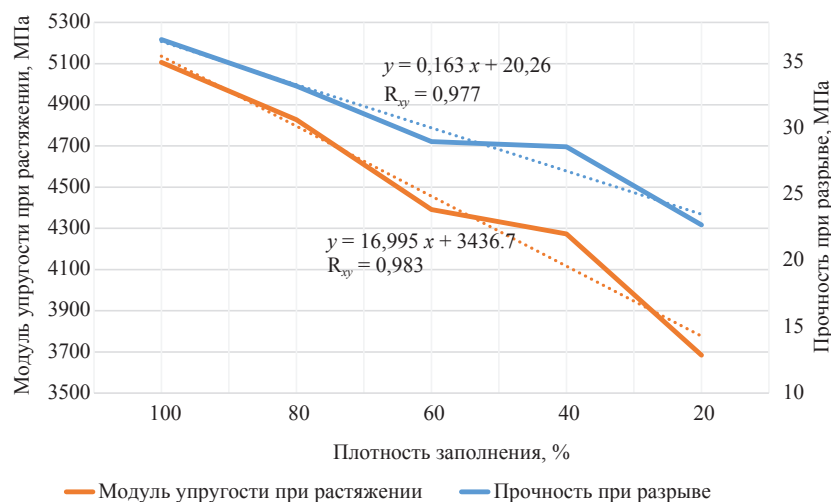


Рис. 11. Зависимость механических показателей образцов ДПК-30 от плотности заполнения

Fig. 11. The dependence of the mechanical properties of the WPC-30 samples on the filling density

Результаты тепловизионного исследования в инфракрасном диапазоне показали распределение температуры во время FDM-печати на 3D-принтере собственной конструкции. На рис. 12 изображена середина процесса печати (около 47 %), когда образец еще относительно невысок. На этом этапе, как видно из рис. 12, 13, температура образца существенно изменяется от верхнего слоя к нижнему.

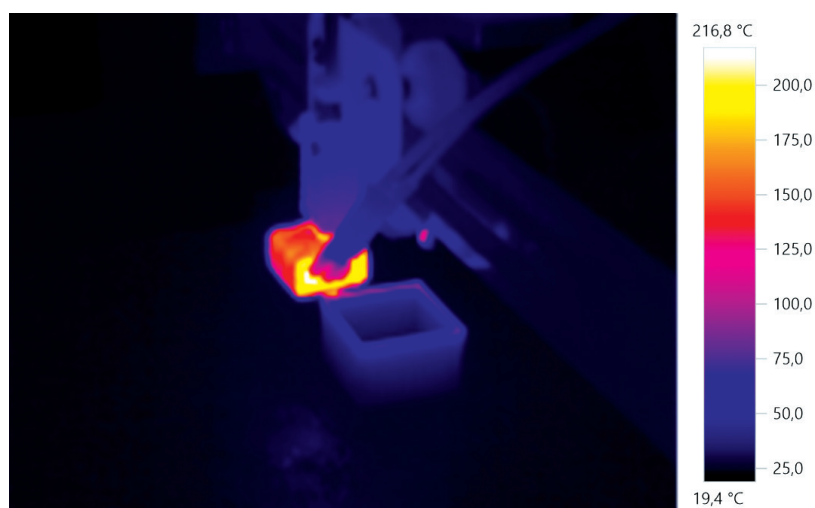


Рис. 12. Изображение процесса печати образца в инфракрасном диапазоне волн

Fig. 12. Image of the sample printing procedure in the infrared band

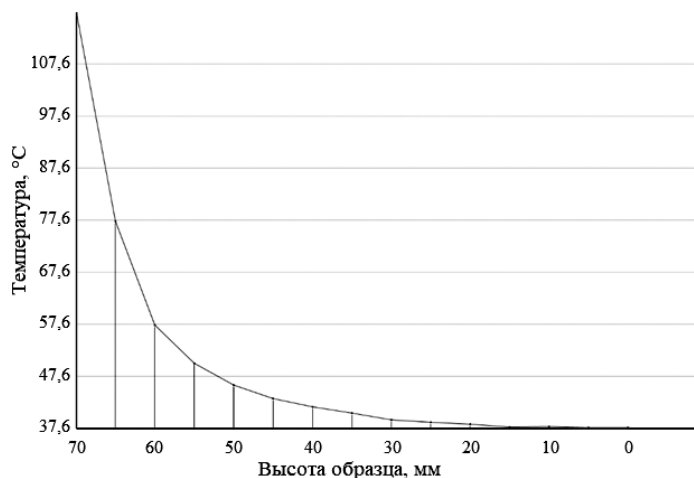


Рис. 13. Изменение температуры слоев образца при печати (от верхнего слоя к нижнему)

Fig. 13. Change temperature of the sample layers while FDM-printing (from the top to the bottom layer)

Тепловая характеристика процесса печати с использованием ДПК показала быстрое снижение температуры нити от уровней, возникающих на выходе из сопла, до значений средней зоны модели. Несмотря на быстрое охлаждение ДПК, наиболее качественное формирование слоев наблюдалось при температуре 210 °C.

Можно выделить 3 термические зоны на образце: первая – горячая зона (температура 69,1...104,7 °C) – зафиксирована рядом с соплом; вторая – зона, где температура существенно не отличается от температуры ближайших слоев (33,6...53,5 °C), – представляет собой плавный переход между горячей и холодной зонами; третья – фиксируется в нижних слоях модели и зависит от температуры непосредственного окружения (рабочей платформы).

Полученные результаты относительно схожи с данными [21] для образцов из PLA-нити.

Выводы

1. Обоснованы состав древесно-полимерной композиции и плотность заполнения, при которых прочность образца из ДПК выше, чем у ABS пластика. Содержание древесной муки в композите не должно превышать 30 %.

2. Плотность заполнения необходимо обосновывать, исходя из требуемых эксплуатационных свойств продукции.

3. Установлено, что ДПК пригоден для печати, а температура печати должна быть не ниже 210 °C. При более высокой температуре может произойти термическое разложение древесных частиц, что является предметом дальнейших исследований.

4. В целях повышения атмосферостойкости и улучшения декоративных свойств изделий из ДПК рекомендуется создавать на их поверхности защитно-декоративные покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Говядин И.К. Производственная линия изготовления древесно-полимерной нити для 3D-печати методом послойного наплавления полимера // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 06–08 ноября 2019 г. СПб.: Полиграф Экспресс, 2019. 254 с. [Govyadin I.K. Production Line for the Manufacture of Wood-Polymer Filament for 3D Printing by the FDM-Method. *The Current Issues in Forestry: Conference of Young Scientists, Saint Petersburg, November 6–8, 2019*. Saint Petersburg, Poligraf Ekspress Publ. 2019. 254 p.].
2. Патент на полезную модель № 190068 Российская Федерация, МПК В29В 7/92. Портативный шнековый экструдер для производства древесно-полимерной нити: № 2019103226: заявл. 05.02.19: опубл. 17.06.19. / Говядин И.К. [Govyadin I.K. *Portable Screw Extruder for the Production of Wood-Polymer Filament*. Patent RF, no. RU 190068 U1, 2019].
3. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб.: СПбГУ, 1992. 164 с. [Chubinsky A.N. *The Formation of Adhesive Joints of Wood*. Saint Petersburg, SPbGU Publ., 1992. 164 p.].
4. Afrose M.F. *Mechanical and Viscoelastic Properties of Polylactic Acid (PLA) Materials Processed Through Fused Deposition Modelling (FDM)*. B.Sc. (Hons) in Mechanical Engineering. Hawthorn, Australia, Swinburne University of Technology, 2016. 81 p.
5. Aravind Raj S., Muthukumaran E., Jayakrishnaa K. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 5, part 2, pp. 11219–11226. DOI: [10.1016/j.matpr.2018.01.146](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.146)
6. Ayrlmis N., Kariz M., Kwon J.H., Kuzman M.K. Effect of Printing Layer Thickness on Water Absorption and Mechanical Properties of 3D-Printed Wood/PLA Composite Materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, pp. 2195–2200. DOI: [10.1007/s00170-019-03299-9](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03299-9)
7. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Plaza E., Núñez P.J., Reverte J.M., Becar J.P. Additive Manufacturing of PLA-Based Composites Using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture. *Polymers*, 2019, vol. 11, iss. 5, art. 799. DOI: [10.3390/polym11050799](https://doi.org/10.3390/polym11050799)
8. Cicala G., Giordano D., Tosto C., Filippone G., Recca A., Blanco I. Polylactide (PLA) Filaments a Biobased Solution for Additive Manufacturing: Correlating Rheology and Thermomechanical Properties with Printing Quality. *Materials*, 2018, vol. 11(7), art. 1191. DOI: [10.3390/ma11071191](https://doi.org/10.3390/ma11071191)
9. Domínguez-Rodríguez G., Ku-Herrera J.J., Hernández-Pérez A. An Assessment of the Effect of Printing Orientation, Density, and Filler Pattern on the Compressive Performance of 3D Printed ABS Structures by Fuse Deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, pp. 1685–1695. DOI: [10.1007/s00170-017-1314-x](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1314-x)
10. Farbman D., McCoy C. Materials Testing of 3D Printed ABS and PLA Samples to Guide Mechanical Design. *Proceedings of the 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Blacksburg, June 27 – July 1, 2016*. Blacksburg, VA, USA, 2016, paper no. MSEC2016-8668, V002T01A015. DOI: [10.1115/MSEC2016-8668](https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8668)
11. Jaya Christiyan K.G., Chandrasekhar U., Venkateswarlu K. A Study on the Influence of Process Parameters on the Mechanical Properties of 3D Printed ABS Composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 114, art. 012109. DOI: [10.1088/1757-899X/114/1/012109](https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012109)
12. Kuznetsov V.E., Solonin A.N., Urzhumtsev O.D., Schilling R., Tavitov A.G. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polimers*, 2018, vol. 10(3), art. 313. DOI: [10.3390/polym10030313](https://doi.org/10.3390/polym10030313)

13. Messimer S.L., Pereira T.R., Patterson A.E., Lubna M., Drozda F.O. Full-Density Fused Deposition Modeling Dimensional Error as a Function of Raster Angle and Build Orientation: Large Dataset for Eleven Materials. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3(1), art. 6. DOI: [10.3390/jmmp3010006](https://doi.org/10.3390/jmmp3010006)
14. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 143, pp. 172–196. DOI: [10.1016/j.compositesb.2018.02.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012)
15. Patterson A.E., Pereira T.R., Allison J.T., Messimer S.L. IZOD Impact Properties of Full-Density Fused Deposition Modeling Polymer Materials with Respect to Raster Angle and Print Orientation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. DOI: [10.1177/0954406219840385](https://doi.org/10.1177/0954406219840385)
16. Samykano M., Selvamani S.K., Kadirgama K., Ngui W.K., Kanagaraj G., Sudhakar K. Mechanical Property of FDM Printed ABS: Influence of Printing Parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, pp. 2779–2796. DOI: [10.1007/s00170-019-03313-0](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0)
17. Seol K.-S., Zhao P., Shin B.-C., Zhang S.-U. Infill Print Parameters for Mechanical Properties of 3D Printed PLA Parts. *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 9–16. DOI: [10.14775/ksmpe.2018.17.4.009](https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.009)
18. Song J., Kay M., Coles R. Bioplastics. Ch. 11. *Food and Beverage Packaging Technology*. Ed. by R. Coles, M. Kirwan. Chichester, UK, Blackwell Publishing Ltd., 2011, pp. 295–319. DOI: [10.1002/9781444392180.ch11](https://doi.org/10.1002/9781444392180.ch11)
19. *Technical Data of the CADIT Biodegradable PLA Plastic Pellets KD-195*. China, Shenzhen Cadit Plastic Material Co. 2018. Available at: https://www.alibaba.com/product-detail/Biodegradable-PLA-plastic-pellets-specifically-designed_60772914070.html (accessed 29.11.19).
20. Van Zeijnderveld J. *The State of 3D Printing 2018: Available for Free Now!* Available at: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/05/30/the-state-of-3d-printing-2018-available-for-free-now/> (accessed 30.05.18).
21. Zgryza Ł., Raczyńska A., Paśnikowska-Łukaszuk M. Thermovisual Measurements of 3D Printing of ABS and PLA Filaments. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2018, vol. 12, iss. 3, pp. 266–271. DOI: [10.12913/22998624/94325](https://doi.org/10.12913/22998624/94325)
22. Zhang Q., Pardo M., Rudich Y., Kaplan-Ashiri I., Wong J.P.S., Davis A.Y., Black M.S., Weber R.J. Chemical Composition and Toxicity of Particles Emitted from a Consumer-Level 3D Printer Using Various Materials. *Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 53, iss. 20, pp. 12054–12061. DOI: [10.1021/acs.est.9b04168](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04168)

THE STUDY OF PLA-BASED WOOD-POLYMER COMPOSITE PROPERTIES

I.K. Govyadin, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAF-5782-2019](https://orcid.org/0000-0002-0143-1916),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-1916>

A.N. Chubinsky, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [I-9432-2016](https://orcid.org/0000-0001-7914-8056),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-8056>

Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: govyadin812@gmail.com, a.n.chubinsky@gmail.com

The paper presents the study of wood-polymer filament for fused filament fabrication (FDM) printing. 3D printing is used in the manufacture of products of a complex shape, which means it can be an integral part of the production of hardscape, furniture decor, and children's toys. Additive manufacturing allow to switch over to zero waste production, as well as to use renewable biological raw materials. The use of wood-polymer composites in manufacture and inlay of furniture provides an opportunity to reduce the costs of the finished product.

Filaments (1.7 mm diameter) were made of a filler/binder (wood flour/polylactide) mixture on a single screw extruder. As a result of studying the filament morphology, it was found that the filler is evenly distributed over the volume of the binder in the form of particles of a spherical or elongated shape with sizes from 0.2 to 1.2 μm . The size of the zones with an enhanced concentration of the filler particles vary between 2.7 and 9.8 μm . Voids were found in the wood-polymer filament sections obtained perpendicular to the filament's length; the void shape is arbitrary; the void size ranges from 9.5 to 32.5 μm . The study of the filament sections in the crossed Nicols mode showed a mosaic pattern of birefringence. The size of aggregates of spherical particles with intense birefringence varies in the range from 4.5 to 55.1 μm . Probably, the particles of wood flour are the nucleation centre of crystallization of the binder (polylactide), which is manifested in the formation of the birefringence zones. The study of the temperature dependence of viscosity of the wood-polymer composite showed no significant differences WPC filaments in comparison with PLA filaments. The glass transition temperature was set to 58.19 $^{\circ}\text{C}$ and the melting point temperature was 214.00 $^{\circ}\text{C}$, which confirms the similarity with PLA filaments. The results of water absorption tests showed that the water mass fraction in the samples increases significantly with the growth of the filler content in the material and the thickness of the printed layer. The results of measuring the contact angle of the test samples showed that water-dispersion varnishes partially wet the surface of the wood-polymer composite, creating the conditions for adhesive interaction. Determination of tensile strength and the tensile modulus of elasticity showed that at 100 % filling density the samples made of wood-polymer composition are inferior to the samples made of PLA, however, they exceed in comparison with the samples made of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastic. The results of a thermal imaging study made it possible to detect a rapid decrease in the temperature of the model layers from the levels arising at the exit of the nozzle to the values of the model middle zone and to divide the thermal zones onto three levels and acknowledged the similarity with the samples made of PLA filaments.

For citation: Govyadin I.K., Chubinsky A.N. The Study of PLA-Based Wood-Polymer Composite Properties. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 129–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-129-145

Keywords: wood-polymer composition, FDM-printing, wood flour, polylactide, wood-polymer filament for FDM-printing, wood-polymer filament properties.

Поступила 29.09.19 / Received September 29, 2019



УДК 663.15

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-146-158

СИНТЕЗ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ ГРИБОМ *Rhizopus oryzae* F-1030 НА ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ ИЗ СУЛЬФИТНЫХ ЩЕЛОКОВ*Л.А. Мингазова, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>**А.В. Канарский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>**Е.В. Крякунова, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>**З.А. Канарская, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>*

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015;
e-mail: zleisan1@mail.ru, alb46@mail.ru, oscillatoria@rambler.ru,
zosya_kanarskaya@mail.ru

Существующие в настоящее время способы получения и выделения молочной кислоты недостаточно эффективны и приводят к образованию большого количества загрязняющих окружающую среду отходов, переработка которых экономически невыгодна. При этом половина мирового объема производства молочной кислоты осуществляется микробиологическим методом, основанном на сбраживании таких ценных сахаросодержащих субстратов, как сахароза, меласса, рафинадная патока, сахарный сироп и др. Применение сахаросодержащих субстратов значительно увеличивает себестоимость конечного продукта. Для решения экономической и экологической проблем производства молочной кислоты необходимо пересматривать существующую сырьевую базу и вводить в молочнокислое производство более дешевые и доступные источники углеводов, например сульфитные щелока, образующиеся при варке целлюлозы. В свою очередь, для повышения экономической эффективности целлюлозно-бумажного производства следует максимально полно использовать такие побочные продукты российских предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, как сульфитные щелока, которые в химическом отношении являются комплексом неорганических и органических соединений, содержащим, в частности, моно- и олигосахариды. Рассмотрена зависимость выхода молочной кислоты, синтезируемой грибом-продуcentом *R. oryzae* F-1030 на питательных средах, приготовленных на основе сульфитных щелоков, от используемого метода культивирования. При отъемно-доливном методе культивирования по мере истощения сахаров в среде производилась замена культуральной жидкости на аналогичный объем стерильной питательной среды при сохранении биомассы гриба-продуцента, при периодическом методе культивирования по мере истощения сахаров в среде синтезированная молочная кислота осаждалась гашеной известью, а восстановление редуцирующих веществ в культуральной жидкости достигалось добавлением концентрированного сульфитного щелока. Установлено, что наибольший выход молочной кислоты наблюдается при использовании отъемно-доливного метода культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на питательной среде на основе сульфитного щелока, приготовленной по технологии, рекомендованной в промышленности при подготовке питательных сред для культивирования дрожжей. При невозможности провести полную про-

мышленную предварительную обработку сульфитного щелока от содержащихся в нем вредных примесей рекомендуется использовать периодический метод культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 для получения большего выхода молочной кислоты.

Для цитирования: Мингазова Л.А., Канарский А.В., Крякунова Е.В., Канарская З.А. Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae* F-1030 на питательных средах из сульфитных щелоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-146-158

Ключевые слова: сульфитный щелок, *R. oryzae*, отъемно-доливной метод культивирования, периодический метод культивирования, молочная кислота.

Введение

Молочная кислота является одним из промышленно важных продуктов с быстро расширяющимся рынком потребления [23]. В настоящее время она широко применяется в пищевой промышленности, при протравном крашении, в кожевенном производстве, для получения лекарственных и косметических средств, пластификаторов [16, 20]. Однако основные производственные мощности молочной кислоты сосредоточены в странах Азии. Поэтому развитие российского производства представляется достаточно перспективным в ближайшие несколько лет. Производство молочной кислоты в промышленных масштабах осуществляется микробиологическим синтезом, основанным на сбраживании углеводсодержащего сырья, в частности крахмала [17, 19]. В Российской Федерации применение молочной кислоты в качестве исходного сырья ограничено ее высокой стоимостью на нашем рынке при относительно невысоком качестве. Поэтому необходимо модернизировать существующую отечественную технологию производства молочной кислоты, расширить сырьевую базу для молочнокислой ферментации, заменить дефицитные источники углеводов на более дешевые и доступные, например на отходы деревоперерабатывающей промышленности и сельского хозяйства.

В связи с этим сульфитные щелока являются перспективными ресурсами для производства молочной кислоты микробиологическим методом, так как они представляют собой источник низкомолекулярных углеводов, необходимых для роста микроорганизмов. Сульфитные щелока, непосредственно отобранные при варке целлюлозы, не пригодны для жизнедеятельности микроорганизмов по следующим причинам [14]:

в этих средах нет легко усваиваемых соединений азота и недостаточно фосфорных соединений;

отсутствуют биостимуляторы роста и витамины;

в значительном количестве содержатся такие вредные примеси, как фурфурол, 5-метилфурфурол, диоксид серы, формальдегид и др.

Среди веществ в составе сульфитных щелоков, получаемых при варке древесины хвойных пород, присутствуют: лигносульфонаты – 55...60 % (от сухих веществ), углеводы (содержание всех моно- и олигосахаридов определяется по редуцирующим веществам (РВ)) – 28...32 %, органические кислоты – 11...12 %, экстрактивные вещества и другие компоненты – 1 %. К экстрактивным веществам относятся: фенолы – 25 %, нейтральные вещества – 30 %, кислоты – 45 % [9]. В щелоках сульфитных варок древесины ели углеводы практически полностью представлены моносахарида-

ми, из которых гексозы составляют 2/3 всех сахаров. Сульфитные щелока из древесины хвойных пород содержат следующие простые сахара (% к сумме углеводов): манноза – 48 %, ксилоза – 22 %, галактоза – 10 %, глюкоза – 9 %, арабиноза – 6 %, рамноза – 5 %. Летучие органические кислоты в бисульфитных щелоках на 85...92 % представлены уксусной кислотой с небольшим количеством муравьиной кислоты, а нелетучие – альдоновыми, уроновыми и углеводсульфоновыми кислотами [11]. При этом уроновые кислоты могут быть восстановлены до альдоновых кислот, а те, в свою очередь, до моносахаридов [10]. Углеводсульфоновые кислоты практически невозможно отделить от лигносульфоновых кислот [13].

Содержащиеся в необработанном сульфитном щелоке фурфурол и оксиметилфурфурол ингибируют дыхание и накопление биомассы, формальдегид и соли тяжелых металлов даже при незначительных концентрациях значительно задерживают размножение микроорганизмов [14]. Однако основным вредно действующим на микроорганизмы фактором сульфитного щелока является диоксид серы, который обладает ярко выраженным фунгистатическим и фунгицидным действием [8].

Поэтому для создания оптимальных условий жизнедеятельности микроорганизмов сульфитные щелока подвергают предварительной очистке. Подготовка щелока к биохимической переработке осуществляется по следующей технологической схеме [12]:

- улавливание целлюлозного волокна;
- десульфитация и удаление летучих веществ;
- окисление сульфитов и фенолов (совмещается со 2-й стадией при использовании для удаления летучих веществ горячего воздуха);
- нейтрализация;
- введение питательных веществ;
- осветление и охлаждение.

Содержание углеводов в щелоках сульфитной варки определяют по выходу РВ, в которые входят все карбонильные соединения щелока, при этом несахарные РВ составляют 10...15 % от общей массы. Известно, что содержащиеся карбонильные группы несахарные вещества сульфитного щелока вступают в реакцию с диоксидом серы, гидросульфитом и сульфитом раньше сахаров и образуют более стойкие, чем сахара, карбонилгидросульфитные соединения. Таким образом, при массовой доле РВ в щелоке сульфитной варки древесины ели 2,5...2,8 % и суммарном массовом содержании соединений SO_2 0,20...0,22 % все сахара находятся в щелоке в несвязанном виде и доступны для биохимической переработки [11].

Так как сульфитные щелока содержат вещества, которые приводят к инактивации клеток микроорганизмов, необходимо проводить поиск продуцентов молочной кислоты, способных адаптироваться в питательных средах на основе сульфитных щелоков. В качестве продуцентов молочной кислоты используют различные штаммы бактерий рода *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pediococcus* и *Leuconostoc* и грибов рода *R. oryzae* и *Mucor* [18, 21, 22].

Подбор штамма-продуцента молочной кислоты – важный этап биотехнологического процесса, основным критерием которого служит способность к синтезу целевого продукта. Ответственное направление работ по оптимизации производства молочной кислоты – изучение биологических свойств штам-

мов-продуцентов, их селекция и оптимизация параметров управления процессом биосинтеза. Также важным является изучение и оптимизация условий роста отобранных культур микроорганизмов и эффективности процесса кислотообразования. Посредством таких факторов, как источники азота и углерода, pH, температура, способ культивирования, можно влиять на титр культуры-продуцента молочной кислоты и ее продуктивность [15].

Мицелиальные грибы относятся к наиболее перспективным продуцентам молочной кислоты для технического коммерческого потребления. В частности, преимуществом применения гриба *R. oryzae* является его устойчивость к высоким концентрациям молочной кислоты, которая синтезируется им в основном в L-форме [24]. В случае данного продуцента могут быть использованы среды с более низким содержанием питательных веществ [25].

Цель данной работы – определение влияния способа культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на питательных средах, приготовленных на основе сульфитных щелоков, на выход молочной кислоты.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

определить влияние отъемно-доливного метода культивирования на синтез молочной кислоты грибом *R. oryzae* F-1030 на питательных средах, приготовленных на основе сульфитных щелоков;

определить влияние периодического метода культивирования на синтез молочной кислоты грибом *R. oryzae* F-1030 на питательных средах, приготовленных на основе сульфитных щелоков;

обосновать влияние состава питательной среды на основе сульфитных щелоков и условий культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на синтез молочной кислоты.

Объекты и методы исследования

В экспериментах использовали продуцент молочной кислоты – штамм *R. oryzae* F-1030 из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Культуру гриба *R. oryzae* F-1030 хранили на картофельно-глюкозном агаре, приготовленном из 200 г мелкоизмельченного картофеля, 20 г агара, 20 г глюкозы и 1 л воды. Нарастивание мицелия гриба *R. oryzae* F-1030 проводили методом поверхностного культивирования на картофельно-глюкозном отваре, в 1 л которого содержалось 20 г глюкозы. Продолжительность поверхностного культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 при температуре 28...30 °C составляла 7 дн.

Для культивирования продуцента молочной кислоты *R. oryzae* F-1030 использовали питательные среды, приготовленные из сульфитного щелока, предоставленного ОАО «Выборгская целлюлоза».

Сульфитные щелока, полученные варкой древесины ели на натриевом основании при начальном pH 2,5, подготавливали для биохимической переработки двумя способами.

Согласно первому способу сульфитные щелока очищали по технологии, рекомендованной в промышленности при подготовке питательных сред для культивирования дрожжей и включающей следующие стадии [14]:

1. улавливание мелкого целлюлозного волокна;
2. удаление летучих ядовитых веществ (фурфурола, сернистого ангидрида, формальдегида и др.) из щелока посредством продувки его горячим воздухом;

3. нейтрализация минеральных и большей части органических кислот и доведение pH до 6,0 известковым молоком;

4. обогащение среды азотом и фосфором посредством внесения сульфата аммония в количестве 0,8...0,9 г/100 мл и фосфата калия в количестве 0,03...0,05 г/100 мл.

После подготовки данная питательная среда на основе сульфитного щелока (далее – питательная среда 1) содержала 10...11 % сухих веществ, 50...70 г/л РВ и имела pH 6,0.

Согласно второму способу те же неочищенные сульфитные щелока подготавливали к биохимической переработке без стадии удаления летучих веществ посредством продувки горячим воздухом по следующей схеме:

1. улавливание мелкого целлюлозного волокна;

2. нейтрализация большей части органических кислот и доведение pH до 6,0 гашеной известью;

3. обогащение среды азотом и фосфором посредством внесения сульфата аммония в количестве 0,8...0,9 г/100 мл и фосфата калия в количестве 0,03...0,05 г/100 мл.

После такой подготовки данная питательная среда на основе сульфитного щелока (далее – питательная среда 2) имела pH 6,0 и содержала 10...11 % сухих веществ, 50...70 г/л РВ.

Стерилизацию питательных сред проводили автоклавированием при температуре 115 °C в течение 60 мин.

Посевной материал, состоящий из части мицелия, вносили в колбы, содержащие питательную среду на основе сульфитного щелока. Выращивание продуцентов осуществляли методом поверхностного культивирования при температуре (28±2) °C и непрерывном перемешивании. В питательных средах и культуральной жидкости контролировали содержание РВ, молочной кислоты, а также pH, температуру. При отъемно-доливном методе культивирования по мере истощения сахаров в среде отбирали культуральную жидкость и добавляли равный объем стерильной питательной среды, при периодическом методе культивирования – проводили осаждение синтезированной молочной кислоты внесением в культуральную жидкость стерильной гашеной извести и доведением pH до 7,5. Содержание РВ в культуральной жидкости увеличивали за счет концентрированного сульфитного щелока.

pH питательных сред и культуральной жидкости определяли с помощью лабораторного pH-метра pH-150МИ. Содержание РВ в питательных средах и культуральной жидкости находили по методике [5], содержание молочной кислоты в культуральной жидкости – титриметрическим методом по методике [3].

Извлечение молочной кислоты из культуральной жидкости осуществляли переводом ее в лактат кальция при добавлении гашеной извести и доведении pH до 10,0. Образовавшийся лактат кальция отделяли центрифугированием. Надосадочную жидкость выпаривали, охлаждали и повторно выделяли лактат кальция. Указанную обработку надосадочной жидкости повторяли до полного осаждения молочной кислоты.

Осадок лактата кальция диспергировали в дистиллированной воде и доводили pH концентрированной серной кислотой до 1,5...2,5. Выпавшую гипсовую смесь отделяли центрифугированием, а надосадочную жидкость, содержащую молочную кислоту, дополнительно очищали от гипса фильтрованием.

Для статистической обработки результатов экспериментов использовали программу Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования отражены на рис. 1, где представлена динамика синтеза молочной кислоты грибом *R. oryzae* F-1030 на питательных средах 1 и 2, приготовленных на основе сульфитных щелоков, которые очищались от вредных примесей двумя указанными выше способами.

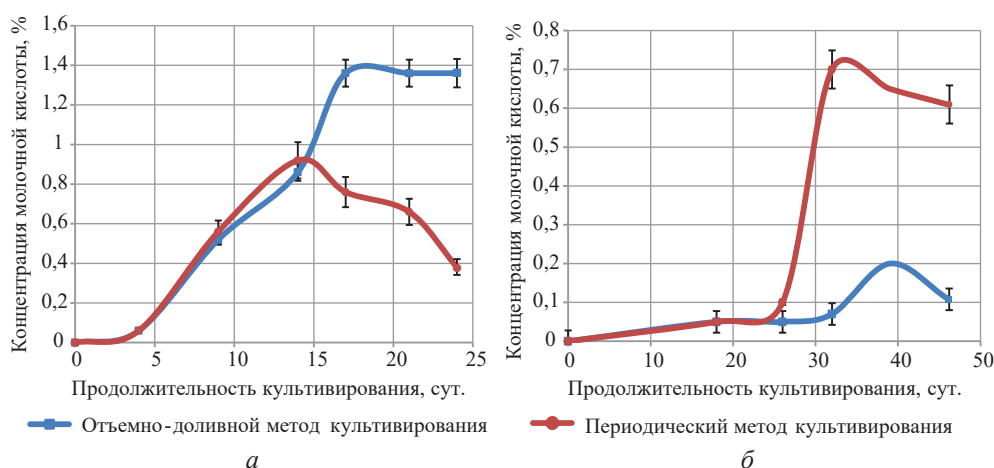


Рис. 1. Динамика синтеза молочной кислоты грибом *R. oryzae* F-1030 отъемно-доливным и периодическим методами на питательных средах 1 (а) и 2 (б)

Fig. 1. Dynamics of the lactic acid synthesis by the fungus *R. oryzae* F-1030 on the nutrient media 1 (a) and 2 (b) using the semicontinuous culture and the batch culture methods

В результате проведенных экспериментов было установлено, что гриб *R. oryzae* F-1030 примерно в 2 раза быстрее адаптируется к питательной среде 1, на которой заметный рост его начинается на 10 сут. раньше, чем на среде 2, и сопровождается более сильным развитием мицелия и более ранним достижением периода спорообразования. Более медленный рост мицелия на питательной среде 2, возможно, связан с тем, что она содержит большее количество вредных примесей. Среди этих примесей – различные производные серы (массовое содержание связанного SO_2 в щелоках сульфитной варки составляет около 1 % [11]), так как предварительная обработка среды 2 не включала продувку горячим воздухом, которая позволяет удалить до 50 % всех соединений серы в щелоке, а также летучие органические соединения.

Как видно из данных, представленных на рис. 1, максимум синтеза молочной кислоты на питательной среде 1 приходится на 15 сут. от начала культивирования, что соответствует переходу гриба-продуцента в стационарную фазу развития, на среде 2 – он наблюдается лишь на 35 сут. Последующее незначительное снижение количества синтезируемой молочной кислоты связано с процессами старения гриба-продуцента и замедлением его метаболических процессов.

При культивировании гриба отъемно-доливным методом происходила регулярная полная замена культуральной жидкости на свежую питательную среду, в результате чего недостатка в питательных веществах, необходимых для

обеспечения жизненных процессов гриба-продуцента и синтеза экзопродукта, не наблюдалось. Поскольку питательная среда 1 содержит меньше вредных веществ и, соответственно, лучше подготовлена для жизнедеятельности микроорганизма по сравнению со средой 2, то при культивировании на ней гриба *R. oryzae* F-1030 отъемно-доливным методом объемная доля синтезируемой молочной кислоты составила 1,4 % от общего объема культуральной жидкости. Это значительно выше, чем при культивировании гриба-продуцента аналогичным методом на питательной среде 2, содержащей большее количество вредных примесей, включая различные соединения серы. При культивировании гриба на питательной среде 2 отъемно-доливным методом стационарная фаза роста наступала позднее, что обуславливало недостаточное развитие мицелия. Данный эффект, видимо, связан с необходимостью продуценту каждый раз при замене среды заново приспосабливаться к ней и инактивировать находящиеся в этой среде вредные примеси.

При периодическом методе культивирования статистически значимых различий в количестве синтезируемой молочной кислоты в зависимости от способа приготовления питательной среды не наблюдается. В среднем объемная доля синтезируемой грибом *R. oryzae* F-1030 молочной кислоты составила 0,8 % от общего объема культуральной жидкости. При таком методе культивирования гриба-продуцента происходит на одной и той же среде весь промежуток времени с периодической подпиткой среды простыми сахарами в составе концентрированного сульфитного щелока. Концентрирование щелока проводилось выпариванием жидкости на кипящей водяной бане, что позволяло очищать питательную среду 2 от избытка производных серы и других летучих органических соединений. Это исключает необходимость повторного приспособления гриба к неблагоприятным факторам питательной среды 2, как в случае культивирования отъемно-доливным методом.

Содержание сахаров в щелоке контролируется по РВ [5]. На рис. 2 представлена динамика изменения содержания РВ при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на питательных средах 1 и 2.

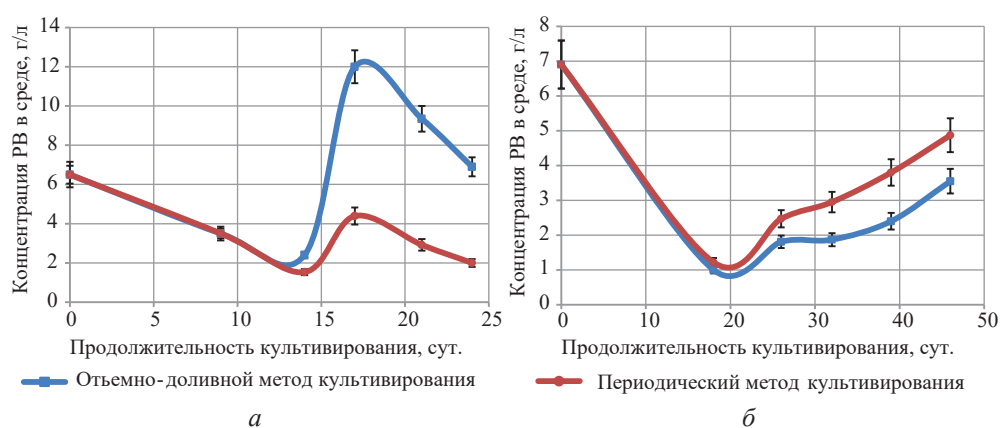


Рис. 2. Динамика изменения РВ при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 отъемно-доливным и периодическим методами на питательных средах 1 (а) и 2 (б)

Fig. 2. Change dynamics in reducing substances while cultivation of the fungus *R. oryzae* F-1030 by the semicontinuous culture and the batch culture methods on the nutrient media 1 (a) and 2 (b)

Установлено, что на начальных этапах культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 наблюдается закономерное снижение содержания РВ как в питательной среде 1, так и в питательной среде 2 независимо от используемого метода культивирования. На начальном этапе роста, когда биомасса гриба незначительна и он еще приспосабливается к условиям среды, для удовлетворения своих физиологических потребностей в сахарах грибу достаточно содержащихся в сульфитных щелоках моносахаридов. По мере роста биомассы гриба отмечается некоторое возрастание содержания РВ. Это, возможно, связано с началом использования грибом *R. oryzae* F-1030 олигосахаров, дающих при гидролизе глюкозу. Известно, что при мягкой варке сульфитной целлюлозы гидролиз гемицеллюлоз происходит не до конца и в сульфитном щелоке содержатся олигосахариды. Таким образом, в результате инверсии содержание усваиваемых микроорганизмами сахаров может увеличиться в 1,7...2,0 раза [2]. Известно, что грибы рода *Rhizopus* обладают рядом ферментов целлюлазного комплекса. Вследствие дефицита углеводов клетка испытывает дефицит энергии, в результате чего в ней повышается содержание цАМФ (циклического аденозинмонофосфата) – сигнального вещества дефицита энергии, в результате чего снимается репрессия генов, кодирующих гидролитические ферменты [7]. Очевидно, что по мере истощения моносахаров в среде гриб начинает гидролизовать β -1,4-гликозидные связи в молекулах, содержащихся в сульфитных щелоках олигосахаридов, вплоть до образования глюкозы.

Ниже представлена динамика изменения рН при выращивании гриба *R. oryzae* F-1030 на питательных средах 1 и 2 (рис. 3).

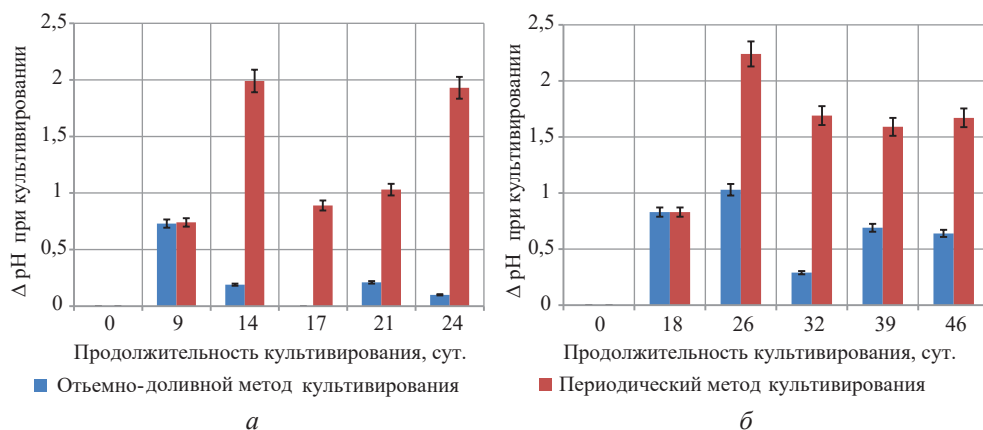


Рис. 3. Изменение рН при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 отъемно-доливым и периодическим методами на питательных средах 1(а) и 2(б)

Fig. 3. The change in pH during cultivation of the fungus *R. oryzae* F-1030 by the semicontinuous culture and the batch culture methods on the nutrient media 1 (a) and 2 (b)

Как видно из результатов, представленных на рис. 3, при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на питательной среде 1 наблюдается гораздо большее увеличение содержания РВ при использовании отъемно-доливого метода. В этом случае в каждой контрольной точке у гриба-производителя происходит полная замена культуральной жидкости на новую питательную среду. Соответственно, продукты обмена веществ, замедляющие физиологические процессы гриба, в том числе и уже активированный синтез целлюлаз, в среде отсутствуют. При периодическом методе культивирования на питательной

среде 1 происходит некоторое восполнение РВ за счет внесения малого объема концентрированной среды 1. Однако в этом случае выращивание гриба происходит в одной и той же питательной среде, в которой накапливаются продукты обмена веществ, что снижает синтез молочной кислоты из-за необходимости поддержания физиологических процессов жизнедеятельности микроорганизма (см. рис. 1).

В случае культивирования гриба-продуцента на питательной среде 2, менее подготовленной для поддержания физиологических потребностей микроорганизма, наблюдался более длительный начальный этап снижения содержания РВ и более медленное последующее увеличение их содержания в питательной среде, чем при выращивании гриба на среде 1. При использовании данной питательной среды периодический метод культивирования оказался более эффективен, чем отъемно-доливной, так как не происходило полной замены питательной среды на исходную с содержащимися в ней вредными примесями.

Одним из важных факторов, определяющих нормальный рост клеток микроорганизма и его биосинтетические возможности, является рН питательной среды. Известно, что при переходе рН в область неблагоприятных значений микроорганизм прекращает расти даже в тех случаях, когда все остальные условия оптимальны. Изменение рН питательной среды влияет на накопление конечных продуктов обмена веществ в культуральной жидкости [4], на скорость поступления в клетку питательных веществ, активность ферментов, синтез белка и витаминов [6].

При использовании периодического метода культивирования наблюдаются большие изменения рН питательной среды между соседними контрольными точками, чем в случае применения отъемно-доливного метода. Это, очевидно, связано с накоплением в среде конечного продукта – молочной кислоты, а также диссоциацией содержащихся в сульфитных щелоках солей сульфоновых кислот, которые образуются при присоединении сульфитов по двойным связям и(или) к гидроксильным группам лигнина [1].

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Питательную среду, приготовленную на основе сульфитных щелоков с удалением летучих веществ, целесообразно использовать при отъемно-доливном методе культивирования гриба *R. oryzae* F-1030, в котором наблюдается большой выход молочной кислоты при меньших колебаниях рН и большем содержании РВ в питательной среде.

В процессе синтеза молочной кислоты культивированием гриба *R. oryzae* F-1030 периодическим методом возможно применение питательных сред на основе сульфитных щелоков как с удалением, так и без удаления летучих органических веществ.

При наличии в среде вредных примесей рекомендуется использовать периодический метод культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 для получения большего выхода молочной кислоты.

Заключение

При современном производстве молочной кислоты существует проблема, обусловленная заменой дефицитных источников углеводов на более дешевые

субстраты. В качестве доступных по цене субстратов могут использоваться сульфитные щелока, получаемые на целлюлозно-бумажном производстве как побочный продукт сульфитной варки целлюлозы. По своему составу они представляют собой сложный комплекс органических и неорганических соединений, органические соединения в которых представлены в основном углеводами и солями лигносульфоновых кислот. Комплексная переработка органических веществ сульфитного щелока позволяет наиболее полно использовать нецеллюлозные компоненты древесины для получения таких важных продуктов, как белковые кормовые дрожжи, этиловый спирт, жидкая и твердая углекислота, растворители и органические кислоты, ванилин и др., поэтому рассмотренная в данной работе возможность его применения в качестве питательной среды для синтеза молочной кислоты является оправданным решением.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что использование питательной среды, подготовленной на основе сульфитного щелока, обработанного принятым в промышленности методом, может обеспечить клетки гриба *R. oryzae* F-1030 необходимыми питательными веществами, что позволяет грибу-продуценту давать больший выход молочной кислоты в отъемно-доливном методе культивирования. При использовании питательной среды на основе сульфитного щелока, подвергшегося неполной обработке, более высокий выход молочной кислоты наблюдается в случае применения периодического метода культивирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Голомб Л.М. Физико-химические основы технологии выпускных форм красителей. Ленинград: Химия, 1974. 224 с. [Golomb L.M. *Physics and Chemistry of the Technology of Commercial Dyes*. Leningrad, Khimiya Publ., 1974. 224 p.].
2. Грачева И.М., Гаврилова Н.Н., Иванова Л.А. Технология микробных белковых препаратов, аминокислот и жиров. М.: Пищевая пром-сть, 1980. 448 с. [Gracheva I.M., Gavrilova N.N., Ivanova L.A. *Technology of Microbial Protein Preparations, Amino Acids and Fats*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 448 p.].
3. Григорьева Р.З., Куракин М.С. Товароведение продовольственных товаров. Кемерово: КемТИПП, 2008. 115 с. [Grigor'yeva R.Z., Kurakin M.S. *Food Commodity Science*. Kemerovo, KemTIPP Publ., 2008. 115 p.].
4. Зиганшин Д.Д., Сироткин А.С. Особенности глубинного и поверхностного культивирования грибов *Trichoderma* для получения биопрепаратов на основе клеток гриба // Вестн. техн. ун-та. 2017. Т. 20, № 10. С. 155–158. [Ziganshin D.D., Sirotkin A.S. Features of the Deep and Surface Cultivation of *Trichoderma* Fungi for Obtaining Biological Products Based on Fungal Cells. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2017, vol. 20, no. 10, pp. 155–158].
5. Коренман И.М. Фотометрический анализ. Методы определения органических соединений. М.: Химия, 1970. 343 с. [Korenman I.M. *Photometric Analysis. Methods for Determination of Organic Compounds*. Moscow, Khimiya Publ., 1970. 343 p.].
6. Корнеева О.С., Мотина Е.А., Яковлева С.Ф., Яковлев А.Н. Влияние условий культивирования на рост биомассы *Yarrowia lipolytica* – продуцента кормового белка // Вестн. ВГУИТ. 2016. № 1. С. 182–185. [Korneeva O.S., Motina E.A., Yakovleva S.F., Yakovlev A.N. Effect of Culture Conditions on the Growth of Biomass *Yarrowia lipolytica* – Producing Protein Feed. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2016, no. 1, pp. 182–185]. DOI: [10.20914/2310-1202-2016-1-182-185](https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-1-182-185)

7. Левина Е.А., Атыкян Н.А., Ревин В.В. Влияние источников углеродного и азотного питания на биосинтез целлюлаз грибами *Lentinus tigrinus* ВКМ F-3616 D и *Trichoderma viride* ВКМ F-1131 // Вестн. ВГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация. 2016. № 1. С. 85–93. [Levina E.A., Atykian N.A., Revin V.V. The Effect of Carbon and Nitrogen Sources on the Production of Cellulases by Fungi *Lentinus tigrinus* VKM F-3616 D and *Trichoderma viride* VKM F-1131. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy], 2016, no. 1, pp. 85–93].
8. Мухин В.А. Влияние сернистого ангидрида на ксилотрофные грибы // Биоразнообразия и биоресурсы Урала и сопредельных территорий: материалы II междунар. конф., Оренбург, 17–18 дек. 2002 г. Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2002. 196 с. [Mukhin V.A. The Influence of SO₂ on Wood-Destroying Fungi. *Biodiversity and Biological Resources of the Urals and Adjacent Territories: Materials of II International Conference, Orenburg, December 17–18, 2002*. Orenburg, OGPU Publ., 2002. 196 p.]. DOI: [10.13140/RG.2.1.3291.8806](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3291.8806)
9. Новожиллов Е.В. Оценка биоресурса сульфитных щелоков как сырья для производства кормовых дрожжей // Изв. вузов Лесн. журн. 1999. № 2-3. С. 180–188. [Novozhilov E.V. Evaluation of Sulfite Liquors Bioresource as Raw Material for Nutrient Yeast Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1999, no. 2-3, pp. 180–188]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ab7/ab7f2300221c7ded546d5483246aa51a.pdf>
10. Овчинников Ю.А. Биоорганическая химия. М.: Просвещение, 1987. 815 с. [Ovchinnikov Yu.A. *Bioorganic Chemistry*. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1987. 815 p.].
11. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков / под ред. Б.Д. Богомолов [и др.]. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с. [Processing of Sulfate and Sulfite Liquors. Ed. by B.D. Bogomolov et al. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p.].
12. Смирнов Р.Е. Производство сульфитных волокнистых полуфабрикатов. СПб.: СПбГТУРП, 2010. 146 с. [Smirnov R.E. *Production of Sulphite Pulp*. Saint Petersburg, SPbGTURP Publ., 2010. 146 p.].
13. Химия углеводородов нефти / под ред. Б.Т. Брукса [и др.]. М.: Гостоптехиздат, 1959. Т. 3. 583 с. [Chemistry of Petroleum Hydrocarbons. Ed. by B.T. Brooks et al. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1959, vol. 3. 583 p.].
14. Шарков В.И., Сапотницкий С.А., Дмитриева О.А., Туманов И.Ф. Технология гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 407 с. [Sharkov V.I., Sapotnitskiy S.A., Dmitriyeva O.A., Tumanov I.F. *Technology of Hydrolysis Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 407 p.].
15. Шинкарев С.М., Самуйленко А.Я., Неминущая Л.А., Скотникова Т.А., Павленко И.В., Рубцова Г.Н., Канарский А.В., Мингазова Л.А. Совершенствование микробиологического синтеза молочной кислоты // Вестн. технол. ун-та. 2017. Т. 20, № 18. С. 165–170. [Shinkarev S.M., Samujlenko A.I., Neminuschiy L.A., Skotnikova T.A., Pavlenko I.V., Rubtsova G.N., Kanarskiy A.V., Mingazova L.A. Improvement of Microbiological Synthesis of Lactic Acid. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2017, vol. 20, no. 18, pp. 165–170].
16. Abd Alsaheb R.A., Aladdin A., Othman N.Z., Abd Malek R., Mei Leng O., Aziz R. et al. Lactic Acid Applications in Pharmaceutical and Cosmeceutical Industries. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2015, vol. 7, iss. 10, pp. 729–735.
17. Ghaffar T., Irshad M., Anwar Z., Aqil T., Zulifqar Z., Tariq A. et al. Recent Trends in Lactic Acid Biotechnology: A Brief Review on Production to Purification. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2014, vol. 7, iss. 2, pp. 222–229. DOI: [10.1016/j.jrras.2014.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.03.002)
18. Khalid K. An Overview of Lactic Acid Bacteria. *International Journal of Biosciences*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 1–13.
19. Komesu A., Oliveira J.A.R.d., Martins L.H.d.S., Wolf Maciel M.R., Maciel Filho R. Lactic Acid Production to Purification: A Review. *BioResources*, 2017, vol. 12(2), pp. 4364–4383.

20. Martinez F.A.C., Balciunas E.M., Salgado J.M., Gonzalez J.M.D., Converti A., Oliveira R.P.D.S. Lactic Acid Properties, Applications and Production: A Review. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, vol. 30, iss. 1, pp. 70–83. DOI: [10.1016/j.tifs.2012.11.007](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.007)
21. Rattanachaiakunsopon P., Phumkhachorn P. Lactic Acid Bacteria: Their Antimicrobial Compounds and Their Uses in Food Production. *Annals of Biological Research*, 2010, vol. 1(4), pp. 218–228.
22. Rhee S.J., Lee J.-E., Lee C.-H. Importance of Lactic Acid Bacteria in Asian Fermented Foods. *Microbial Cell Factories*, 2011, vol. 10, art. S5. DOI: [10.1186/1475-2859-10-S1-S5](https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-S1-S5)
23. Simion A.I., Grigoras C.G., Bordașu L.E., Dabija A. Modelling of the Thermo-physical Lactic Acid Aqueous Solutions. Density and Viscosity. *Food and Environment Safety*, 2012, vol. XI, iss. 4, pp. 49–58.
24. Wu X., Jiang S., Liu M., Pan L., Zheng Z., Luo S. Production of L-Lactic Acid by *Rhizopus Oryzae* Using Semicontinuous Fermentation in Bioreactor. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2011, vol. 38, pp. 565–571. DOI: [10.1007/s10295-010-0804-8](https://doi.org/10.1007/s10295-010-0804-8)
25. Yuwa-amornpitak T., Chookietwattana K. L-Lactic Acid Production from Cassava Starch by Thermotolerant *Rhizopus microsporus* LTH23. *Journal of Biological Sciences*, 2014, vol. 14, iss. 4, pp. 284–291. DOI: [10.3923/jbs.2014.284.291](https://doi.org/10.3923/jbs.2014.284.291)

LACTIC ACID SYNTHESIS BY FUNGUS *Rhizopus oryzae* F-1030 ON GROWTH MEDIA BASED ON SULPHITE LIQUORS

L.A. Mingazova, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

A.V. Kanarsky, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

E.V. Kryakunova, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

Z.A. Kanarskaya, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; e-mail: zleisan1@mail.ru, alb46@mail.ru, oscillatoria@rambler.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru

Lactic acid is an industrially important product with an expanding consumer market. However, lactic acid production and isolation methods used at the present time are not effective enough, lead to the formation of large amounts of polluting waste and their recycling is economically unprofitable. At the same time, a half of the world's lactic acid production is carried out by the microbiological method based on the fermentation of such costly sugar-containing substrates as sucrose, molasses, treacle, sugar syrup, etc. These sugar-containing substrates usage significantly increases the final product cost. In order to solve the economic and environmental problems of lactic acid production it is necessary to revise the current raw material source and put cheaper and readily available sources of carbohydrates, such as sulphite liquor formed during sulphite pulping, into the lactic acid production. In turn to enhance the economic efficiency of the Russian pulp and paper production it is necessary to use such paper production by-products as sulphite liquor to the fullest extent possible. Sulphite liquor is a chemical complex of inorganic and organic compounds such as mono- and oligosaccharides. The article considers the dependence of the output of lactic acid synthesized on the sulphite liquor medium by the fungus *R. oryzae* F-1030 on the used method of cultivation. In case of the semicontinuous culture method, the culture liquid was replaced with the similar volume of the sterile growth medium with the fungus biomass saving when the sugars in the medium were depleted. In case of the batch culture method, the synthesized

lactic acid was precipitated with calcium hydroxide and the reducing substances recovery in the culture liquid was achieved by adding concentrated sulphite liquor when the sugars in the medium were depleted. The study demonstrates that the largest amount of synthesized lactic acid is obtained when using the semicontinuous method for cultivation of the fungus on the sulphite liquor medium prepared according to the technology recommended in the industry during preparation growth media for yeast cultivation. If it is impossible to carry out a full industrial pre-treatment of sulphite liquor, it is recommended to use the batch culture method for the fungus in order to obtain more synthesized lactic acid.

For citation: Mingazova L.A., Kanarsky A.V., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A. Lactic Acid Synthesis by the Fungus *Rhizopus Oryzae* F-1030 on Growth Media Based on Sulphite Liquors. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-146-158

Keywords: sulphite liquor, *R. oryzae*, semicontinuous culture method, batch culture method, lactic acid.

Поступила 26.08.19 / Received on August 26, 2019

УДК 676.056.5 + 676.252

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-159-168

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШИЛЬНОЙ ЧАСТИ МАШИН ДЛЯ ВЫРАБОТКИ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ ВИДОВ БУМАГИ

Д.А. Прохоров, инженер технического сервиса Voith Paper, аспирант;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-4119>

А.С. Смолин, д-р техн. наук, проф.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

e-mail: daniel.prokhorov@gmail.com, gturp.tbik@mail.ru

Цель исследования – совершенствование методики оценки эффективности работы колпаков скоростной сушки при производстве санитарно-гигиенических видов бумаги. С ее помощью установлены сухость бумажного полотна, давление воздуха в мокрой и сухой частях скоростных конвективных сушителей, а также температура воздуха, выбиваемого из колпаков скоростной сушки. В основе методики лежит измерение этих показателей в процессе эксплуатации действующего оборудования с дальнейшей регулировкой отдельных узлов системы. При проведении эксперимента осуществлялась термографическая съемка. Установлено, что выдувание горячего воздуха на лицевой стороне колпака и подсасывание холодного на приводной стороне приводит к неравномерному профилю влажности по ширине бумажного полотна, измеренному на накате бумагоделательной машины, снижению энергетической эффективности и производительности агрегата. Индикатором эффективности может служить, например, температура выбиваемого воздуха, которая на исследуемой машине существенно отличается от нормы и составляет 175 °С. Доказана целесообразность регулярного контроля параметров воздуха при изменении технологических режимов производства. Обоснована актуальность применения каскадной системы с возможностью прямого перепуска горячего воздуха из сухой части колпака в мокрую, а также опционального регулирования влажности отработанного воздуха путем добавления или уменьшения части отработанного воздуха из сухой части. Подтверждено прямое влияние регулировки влажности отработанного в сушильной части воздуха на сокращение затрат энергоносителя, а также добавочного воздуха на величину инфильтрации и воздушный баланс системы. Комплекс мероприятий, реализуемых в рамках этой методики, позволяет добиться экономии энергоресурсов на действующих производствах. Возможный потенциал экономии газа для исследуемой машины составил 62 м³/ч, или 17 % от действующего потребления, электроэнергии на привод вентиляторов – 6,8 кВт·ч, или 4 % от актуального потребления.

Для цитирования: Прохоров Д.А., Смолин А.С. Оценка эффективности сушильной части машин для выработки санитарно-гигиенических видов бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 159–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-159-168

Ключевые слова: бумагоделательная машина, санитарно-гигиенические виды бумаги, тисью, сушильная часть, колпаки скоростной сушки, потребление энергоносителя, поперечный профиль влажности, производительность машины.

Введение

Производство санитарно-гигиенических видов бумаги (тисью) наравне с упаковкой является динамично развивающимся сегментом на рынке бумажной

продукции. Согласно статистике и экспертным исследованиям [13, 16], мировой уровень потребления тисью с 2008 по 2018 г. вырос на 34 % и в настоящее время составляет порядка 38 млн т в год. Общемировой уровень использования санитарно-гигиенических изделий находится на отметке примерно 5 кг на человека в год.

Сокращение энергетического потребления путем инвестиций в передовые технологии и практики способствует повышению конкурентоспособности российских целлюлозно-бумажных предприятий на внутреннем и внешнем рынках. Затраты на энергию при производстве тисью-продукции стоят на втором месте после затрат на сырье – 14,5 % [13, 14, 18]. Одно из возможных направлений снижения себестоимости продукции – оптимизация энергопотребления при сушке санитарно-гигиенических видов бумаг.

Самая энергоемкая часть бумагоделательной машины (БДМ) – сушильная [4, 10, 19], поэтому для интенсификации испарения влаги в процессе сушки бумажного полотна и удаления образовавшихся водяных паров применяются колпаки скоростной сушки. Главные требования, предъявляемые к таким установкам: высокая интенсивность испарения влаги, получение продукции с необходимыми качественными показателями, минимальные расходы тепловой и электрической энергии, а также эргономика в процессе эксплуатации.

В основе снижения расхода теплоты и повышения производительности машин лежит изучение закономерностей и особенностей сушки пористых волокнистых материалов, процессов кипения и испарения влаги в коллоидных капиллярно-пористых волокнистых материалах, форм связи влаги с материалом, механизмов переноса теплоты и влаги на каждой стадии сушильного процесса, кинетики сушки пористого волокнистого материала [2, 3, 6].

Тепломассообмен при обдуве бумаги, находящейся на Янки-цилиндре, протекает с высокой интенсивностью в связи с тем, что высушивается тонкая бумага, не нарушается контакт полотна с поверхностью цилиндра, применяются высокие температуры сушильного агента (в установках новых конструкций – до 800 °C) и скорость истечения струй воздуха (до 150 м/с).

Использование высокотемпературного сушильного агента на одноцилиндровых машинах, так как на них вырабатывается бумага из массы садкого помола, которая не подвергается усадочным процессам, и большие удельные влагосъемы не оказывают существенного влияния на физико-механические показатели готовой продукции [1, 14, 20, 22].

Цель исследования – выявление потенциала оптимизации и эффективности работы сушильной части (колпака скоростной сушки тисью-машины) с достижением требуемой скорости при выработке тисью-продукции.

Объекты и методы исследования

На одной из обследованных и недавно введенных в эксплуатацию тисью-машин столкнулись с проблемой пониженной эффективности сушильной части и, как следствие, с ограничением рабочей скорости агрегата. Данная машина, согласно проектной документации, имеет производительность 100 т/сут и вырабатывает многослойную продукцию санитарно-гигиенического назначения: туалетную бумагу, бумажные полотенца и некоторые другие виды тисью с диапазоном базовой плотности от 16,0 до 20,0 г/м². Этот показатель (при ско-

рости 2100 м/мин) был достигнут только при выработке туалетной бумаги с массой 16,2 г/м². Для сравнения: при выработке бумажных полотенец массой 18,8 г/м² максимальная скорость составила 2040 м/мин.

Для того, чтобы высушить бумажное полотно на одном цилиндре, процесс сушки необходимо значительно ускорить. Решение данной задачи достигается за счет установки колпаков скоростной сушки [1, 5, 8, 17].

Сушильная часть БДМ представляет собой комбинацию из Янки-цилиндра, обогреваемого паром, и колпака скоростной сушки, обогреваемого природным газом. Рабочие характеристики сушильного процесса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели процесса сушки на Тиссю-машине в рабочем режиме

Показатель	Значение
Масса 1 м ² , г/м ²	17,8
Влажность на накате, %	6,5
Ширина полотна, мм	2512
Скорость наката, м/мин	1637
Температура мокрой части колпака скоростной сушки, °С	455
Температура сухой части колпака скоростной сушки, °С	455
Диаметр Янки-цилиндра, мм	4877
Давление пара, подаваемого на цилиндр, бар	6,3
Расход газа на нагрев воздуха, поступающего в колпак скоростной сушки, м ³ /ч	376,2
Расход пара, поступающего на Янки-цилиндр, т/ч	4,65

Колпак состоит из мокрой и сухой частей и имеет 6 зон регулирования профиля влажности по ширине полотна в мокрой части, а также 2 зоны (по краям) – в сухой части. Функцию регулирования выполняют заслонки, степень открытия которых автоматически поддерживается актуаторами с пульта панели управления технологическим процессом [9, 21].

При оптимизации и эксплуатации колпаков скоростной сушки с газовым обогревом следует уделять внимание поддержанию соотношения топливо–воздух и температуры горячего воздуха, а также установлению кратности рециркуляции.

Согласно методике расчета колпаков скоростной сушки [7, 11, 12], расход теоретически необходимого количества воздуха для горения газообразного топлива рассчитывается по следующей формуле:

$$V^0 = 0,0476 (0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum_1^n \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2), \quad (1)$$

где CO, H₂, H₂S, C_mH_n, O₂ – содержание в газообразном топливе оксида углерода, водорода, сероводорода, углеводородов и кислорода, %.

Расход газообразного топлива для достижения необходимой температуры сушильного агента определяется из уравнения теплового баланса камеры смешения [15, 17]:

$$B = \frac{C_r (L_c t_c - L_p t_p)}{(Q_H^c + \alpha_{k,ct} L_B^c c_B t_B) \eta_{k,cm}}, \quad (2)$$

где C_r – средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·К); L_c , L_p , L_B^c – массовый расход сушильного агента, рециркуляционного воздуха и теоретически необходимого количества воздуха для горения соответственно, кг/ч; t_c , t_p , t_B – температура сушильного агента, рециркуляционного и дутьевого воздуха соответственно, °С; Q_H^c – теплота сгорания топлива, кДж/нм³; $\alpha_{k,ct}$ – коэффициент избытка воздуха в камере сгорания; $\eta_{k,cm}$ – КПД камеры смешения.

Неравномерный профиль влажности по ширине бумажного полотна (рис. 1) был зафиксирован сканером на накате во время обследования Тиссю-машины в рабочем режиме.

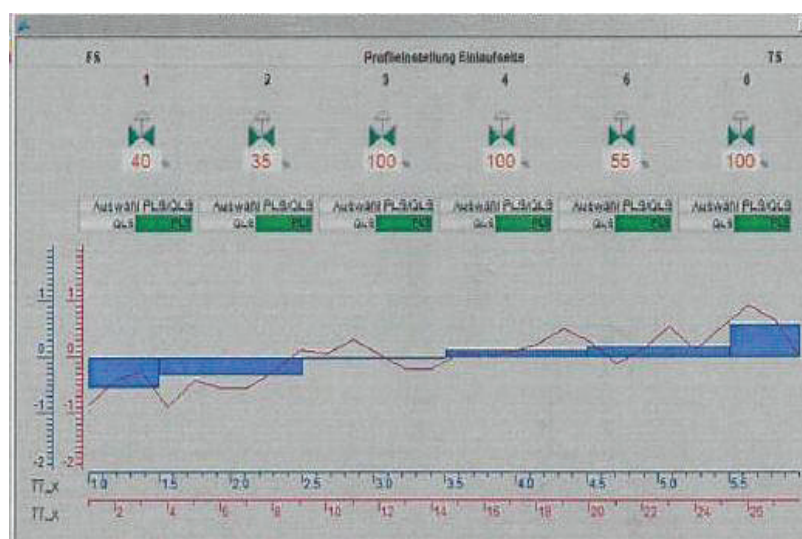


Рис. 1. Рабочие характеристики сушильного процесса и профиль влажности при производстве бумажных полотенец массой 17,8 г/м²

Fig. 1. Working characteristics of the drying process and the moisture profile during the production of paper towels with basis weight 17.8 g/m²

При этом минимальный процент открытия первых актуаторов (лицевая сторона) приводит к пересушенным краям с лицевой стороны, в то время как максимальный процент открытия последних актуаторов дает переувлажненную с приводной стороны бумагу.

Термографические снимки, сделанные на накате, также позволяют говорить о неравномерности профиля влажности. Разность температур между лицевой и приводной сторонами бумажного полотна – примерно 7 °С.

В соответствии с поставленными задачами и разработанной методикой оценки эффективности работы сушильной части машин для выработки санитарно-гигиенических видов бумаг был проведен комплекс измерений, позволяющий оценить актуальное состояние машины и эффективность сушильного процесса.

Для определения сухости бумажного полотна после прессовой части осуществлены замеры с приводной и лицевой сторон БДМ (рис. 2).

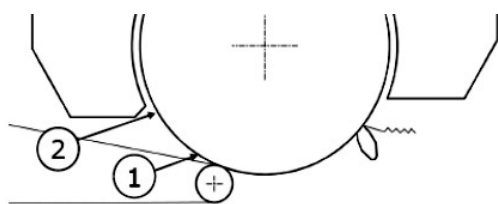


Рис. 2. Схема участка проведения замеров сухости полотна бумаги на входе в сушильную часть: 1 – лицевая сторона; 2 – приводная сторона

Fig. 2. Scheme of the area of dryness measurement of a paper web on entering the drying section: 1 – front side; 2 – drive side

Для оценки равномерности сухости бумажного полотна с приводной и лицевой сторон были отобраны 2 образца и определена их сухость. Для этого пустые колбы перед экспериментом выдерживали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$. Далее на расстоянии примерно 50 см от края с приводной и лицевой сторон отбирали пробы и помещали их в колбы. Для предотвращения потерь влаги сразу после отбора колбы моментально закрывали и взвешивали. После чего обе колбы помещали на 24 ч в сушильный шкаф с температурой $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ до достижения постоянной массы.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные измерения показали, что после прессов бумага поступает в сушильную часть с одинаковой сухостью с лицевой и приводной сторон, равной 43,3 % (табл. 2).

Таблица 2

Давление воздуха в сухой части колпака скоростной сушки

Позиция	Давление воздуха, мбар			Степень открытия клапана, %
	в сухой части колпака	в машинном зале	ΔP	
	–	–	0,21	–
1	24,66	24,49	0,17	35
2	26,45	26,25	0,20	100
3	26,95	26,78	0,17	100
4	24,49	24,36	0,13	90

Примечание. ΔP – разность давлений выдуваемого из колпака горячего воздуха и воздуха, подсасываемого из машинного зала.

Таким образом, на итоговый профиль влажности бумажного полотна на накате влияет только сушильная часть. Причиной инфильтрации и подсосов холодного воздуха, вызывающей снижение эффективности работы воздушного сушителя, являются изогнутые направляющие пластины в нижней части мокрого колпака.

Также отмечен увеличенный зазор между цилиндром и направляющей пластиной, который вместо требуемых 8...10 мм [14, 21] составлял 7...10 см. Искривления и деформации зазора могут являться следствием термического расширения колпака, вызванного неправильной и неравномерной работой клапанов регулирования подачи горячего воздуха по зонам воздушного сушителя.

Для определения состояния колпака скоростной сушки и оценки распределения потоков воздуха было измерено давление воздуха в мокрой и сухой частях колпака. Погрешность проводимых измерений составила $\pm 0,01$ мбар.

Чтобы проанализировать изменение давления воздуха, была предпринята попытка отрегулировать открытие заслонок от 5 до 100 %. Установлено, что на лицевую сторону подается слишком много воздуха, на приводную – слишком мало.

На диаграмме, приведенной на рис. 3, хорошо видно, что клапан (актуатор) № 1 с открытием в 5 % имеет большее давление воздуха, чем другие клапаны, например с открытием в 50 %. Это говорит о том, что поперечное распределение потоков воздуха мокрой части воздушного сушителя происходит неравномерно. Сухая часть имеет регулирование только подачи воздуха на края.

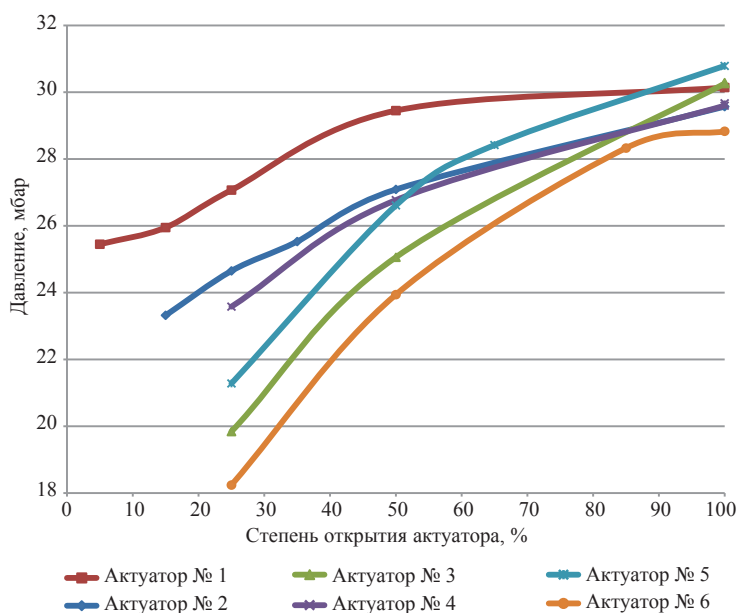


Рис. 3. Зависимость изменения давления воздуха в мокрой части колпака скоростной сушки от степени открытия актуаторов № 1–6

Fig. 3. The dependence of the change in air pressure in the wet end of a Yankee hood on the rate of opening of actuators no. 1–6

Приведенные ниже данные, для наглядности изображенные в виде диаграммы (рис. 4), свидетельствуют, что при открытии актуаторов на 100 % давление на всех клапанах примерно одинаковое ($\Delta P = 1,10$ мбар), на 50 % – разное (5,51 мбар), на 25 % – разное по всей ширине мокрой части колпака давление (8,83 мбар).

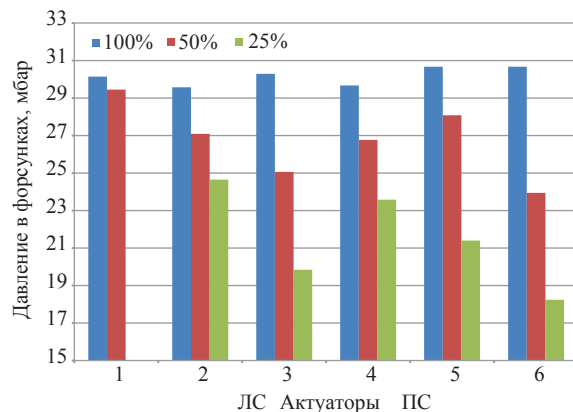


Рис. 4. Зависимость изменения давления воздуха в форсунках при изменении степени открытия актуаторов мокрой части колпака скоростной сушки от 25 до 100 % (ЛС – лицевая сторона; ПС – приводная сторона)

Fig. 4. The dependence of the change in air pressure in nozzles on the change in the rate of opening of actuators of the wet end of a Yankee hood from 25 to 100 % (ЛС – front side; ПС – drive side)

Обнаружено, что скорость воздуха при открытии клапана № 1 на 100 % ниже, чем при закрытии клапана № 6 на 50 %.

Для определения соотношения подсасываемого и выбиваемого из колпака воздуха во время работы оборудования проведены замеры температуры воздуха в 3 точках с лицевой и приводной сторон на всем протяжении колпака сушильной части: нижняя, центр, верхняя (табл. 3).

Таблица 3

Температуры выбиваемого воздуха

Позиция	Температура воздуха, °С	
	Мокрая часть	Сухая часть
<i>Нижняя точка</i>		
1 ЛС	83,2	32,5
2 ЛС	108,0	48,2
3 ЛС	137,8	35,2
4 ЛС	175,4	31,2
1 ПС	33,3	53,9
2 ПС	32,0	50,5
3 ПС	32,5	48,4
4 ПС	42,4	48,8
<i>Центр</i>		
1 ЛС	49,6	115,2
1 ПС	63,1	49,2
<i>Верхняя точка</i>		
1 ЛС	55,5	50,9
1 ПС	260,0	143,3

Повышенные значения температуры выбиваемого из колпака воздуха является индикатором потерь тепла. В соответствии с общемировой практикой энергоэффективного функционирования колпаков скоростной сушки [14] эта температура должна быть не более 150 °С.

Таким образом, на лицевой стороне колпака происходит выдувание горячего воздуха, а на приводной – подсасывание холодного. Температура воздуха на входе бумажного полотна в колпак скоростной сушки с лицевой стороны (до 140 °С) выше, чем с приводной стороны (30...40 °С). Инфильтрация особенно заметна с приводной стороны, а эксфильтрация – с лицевой стороны на мокрой части воздушного сушителя. Следовательно, подтверждено прямое влияние регулирования колпаков скоростной сушки на показатели энергетической эффективности процесса сушки.

Выводы

1. В сушильную часть бумажное полотно поступает с равномерной по ширине сухостью (43,3 %), что подтверждает решающее влияние сушильной части на его итоговый профиль влажности.

2. Оптимизация и перераспределение потоков воздуха, исключая эффекты инфильтрации холодного и эксфильтрации горячего воздуха, способствуют выравниванию профиля влажности бумажного полотна, что снижает расход газа и электропотребление вентиляторов, подающих свежий воздух.

3. Проведенные расчеты показывают, что для обеспечения производства 100 т бумаги в сутки в сравнении с действующим потреблением газа требуется меньше на 62 м³/ч (17 %), а электроэнергии на привод вентиляторов – на 6,8 кВт·ч (4 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бельский А.П., Лотвинов М.Д. Вентиляция бумагоделательных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 216 с. [Bel'skiy A.P., Lotvinov M.D. *Ventilation of Paper Machines*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 216 p.].
2. Бойков Л.М. Совершенствование процессов контактно-конвективной сушки картона и бумаги: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2001. 422 с. [Boykov L.M. *Improving the Processes of Contact-Convective Drying of Cardboard and Paper*: Dr. Eng. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2001. 422 p.].
3. Бойков Л.М. Повышение эффективности сушки путем модернизации пароконденсатных систем бумагоделательных, картоноделательных машин и гофроагрегатов. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 511 с. [Boykov L.M. *Improving the Drying Efficiency of Paper and Board Machines, and Corrugators*. Saint Petersburg, SPbSTUPP Publ., 2015. 534 p.].
4. Бойков Л.М., Прохоров Д.А., Ионин Е.Н. Модернизация систем вентиляции на предприятиях ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015. № 10. С. 60–64. [Boykov L.M., Prokhorov D.A., Ionin E.N. Upgrade of Ventilation Systems at the Pulp and Paper Mills. *Tsellyulosa. Bumaga, Karton* [Pulp. Paper. Board], 2015, no. 10, pp. 60–64].
5. Лакомкин В.Ю., Бельский А.П. Тепломассообменное оборудование предприятий (сушильные установки). СПб.: СПбГТУРП, 2006. 100 с. [Lakomkin V.Yu., Bel'skiy A.P. *Heat and Mass Exchangers of Mills (Drying Systems)*. Saint Petersburg, SPbSTUPP Publ., 2006. 100 p.].
6. Свидетельство № 2016615260 Российская Федерация. Программа расчета кинетики сушки кровельного картона в периоде прогрева: № 2016612521/69: заявл. 22.03.2016, опубл. 19.05.2016, Реестр программ для ЭВМ / Д.А. Прохоров. [Prokhorov D.A. *Program for Calculating the Drying Kinetics of the Roofing Paperboard in Warm-up Phase*. Certificate RF, no. 2016615260, 2016].
7. Свидетельство № 2017615668 Российская Федерация. Программа расчета рекуперативных воздухоподогревателей № 2017612493: заявл. 24.03.2017, опубл. 19.05.2017, Реестр программ для ЭВМ / Д.А. Прохоров, Е.Н. Ионин, Т.А. Антоненко, В.Н. Белоусов. [Prokhorov D.A., Ionin E.N., Antonenko T.A., Belousov V.N. *Program for Calculating Recuperative Airheaters*. Certificate RF, no. 2017615668, 2017].
8. Смолин А.С., Пяткова И.А. Перспективные направления развития тисью продукции // Технология и оборудование в производстве санитарно-гигиенических материалов. СПб.: МНПК, 2010. С. 20–22. [Smolin A.S., Pyatkova I.A. Promising Directions for Tissue Production Development. *Technology and Equipment in the Production of Tissue Materials*. Saint Petersburg, MNPK Publ., 2010, pp. 20–22].
9. Berardi R., Scherb T. Tissue Goes High-Speed. *Twogether*, 2012, no. 33, pp. 30–31.
10. Blechschmidt J. *Taschenbuch der Papiertechnik*. München, Carl Hanser Verlag, 2013. 650 S.
11. Boykov L.M., Prokhorov D.A., Ionin E.N., Lukianov S.A. Modernization of Steam and Condensate Systems of Drying Plants of Paper and Cardboard-Making Machines. *Materials of the 102nd International Scientific-Practical Conference "The Technical Progress of Humanity in the Context of the Continued Expansion of the Material Needs of Society"*. London, 2015, pp. 77–84.
12. Engelking P.D. *Thermodynamik*. Friedrichshafen, Germany, 2016. 134 p.

13. *Fisher Tissue Databank 2018*. Fisher International, 2019. 78 p.
14. Fleschhut E. *Development of a Technical Design Tool for Tissue Machines*. Bachelor Thesis. Ravensburg, 2018. 72 p.
15. Greenleaf C. *Where Will the Tissue Market Be in 2025?* Fisher International, Inc., 2017. Available at: https://www.fisheri.com/images/features/insights/Fisher_Analysis_Tissue_by_2025.pdf (accessed 15.07.19).
16. Kilby E. *CEPI Annual Statistics 2016*. 2017. 95 p.
17. Miller T., Kramer C., Fisher A. *Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in U.S. Pulp and Paper Manufacturing*. U.S. Department of Energy, 2015. 94 p.
18. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Ed. by D.W. Green, R.H. Perry. New York, McGraw-Hill, 2008. 2700 p.
19. Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connell J.P. *The Estimation of Physical Properties*. Ch. 1. *Properties of Gases and Liquids*. New York, McGraw-Hill, 2001. 721 p.
20. Sarli A. *Energy Optimization Package for Yankee Hoods*. Ravensburg, Voith Paper Air Systems, 2012. 4 p.
21. *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*. Ed. by J.M.P.Q. Deleao, A.G. Barbosa de Lima. Basel, Switzerland, Springer, 2014. 204 p. DOI: [10.1007/978-3-319-04054-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04054-7)
22. Vogt M., Blum O., Hutter A., Jung H., Meyer B. *Branchenleitfaden für die Papierindustrie*. Duisburg, Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier, 2008. 180 p.

PERFORMANCE ASSESSMENT OF THE DRYING SECTION OF MACHINES FOR THE PRODUCTION OF TISSUE PAPER GRADES

D.A. Prokhorov, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-4119>

A.S. Smolin, Doctor of Engineering, Prof.

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: daniel.prokhorov@gmail.com, gturp.tbik@mail.ru

The paper presents the method for assessment the performance of high-speed Yankee hoods in the production of tissue paper grades and the results of its use in working machine. The following parameters are found applying this method: paper web dryness, air pressure in the wet and dry ends of high-speed convective dryers and temperature of the air spilled out of the hoods. The methodology is based on the measurement of these characteristics during the operation of working equipment with further adjustment of the separate system units. Thermal imaging was carried out during the experiment. It has been found that blowing hot air on the front side of the hood and sucking in the cold air on the drive side leads to uneven moisture profile (measured on the paper machine roll) across the paper web width, a decrease in energy efficiency and the machine capacity. Performance indicator may be, for instance, the spilled air temperature, which on the studied machine is significantly different from the standard value and is 175 °C. The rationality of regular monitoring of air characteristics when changing processing modes is proved. The relevance of the cascade system is substantiated, where not only a direct cascade from the dry end to the wet end is possible, but also there is an opportunity to adjust the humidity of exhaust air by addition/reduction of part of it to/from the dry end. The direct effect of adjusting the humidity of exhaust air in the drying section on reduction of energy costs, as well as the effect of make-up air on the amount of infiltration and the air balance of the system are confirmed. A set

of measures implemented within the framework of this methodology makes it possible to achieve energy saving in existing industries. The prospective saving potential of gas is 62 m³/h or 17 % of the current consumption and actual electricity consumption is 6.8 kWh or 4 % for the studied machine.

For citation: Prokhorov D.A., Smolin A.S. Performance Assessment of the Drying Section of Machines for the Production of Tissue Paper Grades. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 159–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-159-168

Keywords: paper machine, tissue paper grades, tissue, drying section, Yankee hood, energy consumption, cross-direction moisture profile, machine productivity.

Поступила 15.07.19 / Received on July 15, 2019



УДК 574.36

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-169-176

**ORGANIC CARBON STOCKS IN THE FOREST SOILS
OF NORTHERN MONGOLIA****M. Tungalag¹, PhD in Biology;** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9727-9084>**S. Gerelbaatar¹, PhD in Biology, Assoc. Prof.;**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9561-5256>**A.I. Lobanov², Candidate of Biology;** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>¹National University of Mongolia, Ikh Surguuliin gudamj -3, P.O. Box -46A/523, Ulaanbaatar, 210646, Mongolia; e-mail: matungalag@yahoo.com, gerelbaatar@seas.num.edu.mn²Scientific Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, P.O. Box 709, Abakan, Republic of Khakassia, 655019, Russian Federation; e-mail: anatolylobanov@ksc.krasn.ru

Soil organic carbon (SOC) stock and its variation on the regional and large spatial scales are critical for estimating the global SOC inventory and predicting further changes. This study was aimed at estimation of the SOC stock in the boreal forests of Northern Mongolia. The study was carried out in the forested areas of the Bulgan, Selenge and Tuv provinces using a completely randomized design. A total of 900 soil samples from 60 sampling points were collected for the laboratory analyses. At each point, a soil profile with a depth of more than 30 cm was laid out, and then soil samples were taken from three soil layers: 0–5, 5–15, and 15–30 cm of each profile. Therefore, the results of the assessment show a high difference of the SOC stock not only between the provinces, but also within each province. The higher SOC stocks were observed in the Selenge (123.5 ± 14.85 t/ha), and lowest in the Tuv (51.23 ± 7.8 t/ha) provinces. The estimated SOC stock in the studied regions was 93.77 t/ha on average. We found relatively less SOC stock in the boreal forests of Mongolia compared with the Asian part of Russia including Siberia and the Russian Far East. Such a less SOC stock may be caused by geographical distribution, where the Mongolian forests border the Central Asian dry steppe and frequent water deficit. However, we found that the accumulation of SOC stocks in the boreal forests of Mongolia is largely dependent on the mountain slopes and aspects combined with the distribution of precipitation across the country. Higher amount of SOC stocks were found in north-facing aspects and lower positions with low slopes of the mountains in lower altitude. Consequently, moisture supply basically determines the pattern of the SOC stock distribution in the northern boreal forests of Mongolia.

For citation: Tungalag M., Gerelbaatar S., Lobanov A.I. Organic Carbon Stocks in the Forest Soils of Northern Mongolia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 169–176. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-169-176

Keywords: forest soil, organic carbon, SOC stock, aspect, Northern Mongolia.

Introduction

The mass of soil organic carbon (SOC) is not only the largest carbon stock in terrestrial ecosystem, but also the determinant factor of the concentration of atmospheric CO₂ [16, 23] and is greater than the combined biomass of carbon (C)

contained in the atmosphere and living biomass [9, 19]. Boreal forests cover about 22 % of terrestrial ecosystem [8] and accounts for 9 % of the vegetation carbon stock [7]. Therefore, most of C is accumulated in the soil, which is caused by limited low microbial decomposition rates in wetlands and permafrost soils due to the low availability of oxygen and low temperatures [17, 24, 28]. Zhu et al. [32] pointed out that the amount of C released as a consequence will strongly depend on simultaneous changes in topography, hydrology, vegetation, fire regimes, nutrient availability and SOC lability. However, in relation to rapidly rising temperatures, boreal forests are susceptible to insect invasions [6, 18], moisture stress [27, 30], frequent forest fires [25, 26], which all have the potential to alter C cycling. In Russia, the Regional Evaluation of Carbon Budget of Forests (RECBF) system developed by the Zamolodchikov et al. [3], and a significant part of regional and national assessments for Russian forests [1, 2, 10] with the respect to data generalization is an extrapolation of a limited number of field studies to larger areas, which is inconsistent with the IPCC approach. Mongolia has relatively limited forest resources, which is distributed along the transitional zone between the Siberian boreal forest and the Central Asian dry steppe [11, 20]. Forest cover represents roughly 7–8 % of the territory; the most recent National Forest Inventory [22] reported that boreal forest cover is nearly 9.1 mln ha. This transitional zone is characterized by a highly continental climate with a prolonged dry period. In addition, forests in Mongolia mainly grow on mountain slopes from 700 to 2500 m a.s.l. To assess the contribution of Mongolian forest ecosystems to mitigating the effects of global warming, there is a potential need for research related to the assessment of the forest SOC stocks. The research problems are to estimate the SOC stock in the boreal forests of Northern Mongolia, and to assess the influence of mountain slope aspect on the SOC stock.

Materials and methods

Soil samples were collected from the forested areas of the Bulgan, Selenge and Tuv provinces using completely randomized design. According to forest-vegetation zoning, the study area belongs to the South Baikal forest vegetation zone. SOC at 0–30 cm was surveyed at the center point of each sample plot of National Forest Inventory of Mongolia. At each point, the soil profile above 30 cm depth was made and then divided into three soil layers of 0–5, 5–15, and 15–30 cm, respectively. A total of 900 samples taken from 60 sample plots were used for laboratory analyses. The ratio of gravel area to the area of soil profile was recorded for each soil layer, and a volumetric sample and also a sample for analyzing C concentration were taken in accordance with Ugawa et al. [29]. The volumetric samples were oven dried at 105 °C for 24 h and then weighed. Soil particles in the sample were washed out through a sieve (2-mm) using water. The remaining gravels and plant roots were oven dried at 105 °C for 24 h and weighed.

Bulk density was calculated using equation:

$$\rho = \left(\frac{W_t + W_g + W_r}{V} \right) \cdot 100, \quad (1)$$

where ρ – bulk density, mg/m³; W_t – total weight of the volumetric sample, g; W_g – weight of gravels, g; W_r – weight of plant roots, g; V – spatial volume of the volumetric sample, cm³.

Loss on ignition (LOI) method [4, 14] was used to determine the SOC concentration based on sequential heating of samples in a muffle furnace. After oven-drying the soil sample to a constant weight for 24 hours at 105 °C, the organic matter was combusted to ash and carbon dioxide at a temperature of 500 and 550 °C. The LOI is then calculated using equation:

$$\text{LOI}_{550} = \left(\frac{\text{DW}_{105} - \text{DW}_{550}}{\text{DW}_{105}} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

where LOI_{550} – LOI at 550 °C, %; DW_{105} – dry weight of the sample before combustion, g; DW_{550} – dry weight of the sample after heating to 550 °C, g.

Results and discussion

Estimated values of the SOC stocks of the inventoried forests are gathered in Table 1. Results of the assessment indicated that there is a significant difference in the SOC stocks (P value > 0.002) in the forests of the provinces. The relatively higher accumulation of the SOC stocks was observed in the Selenge, and lower in the Tuv provinces.

Table 1

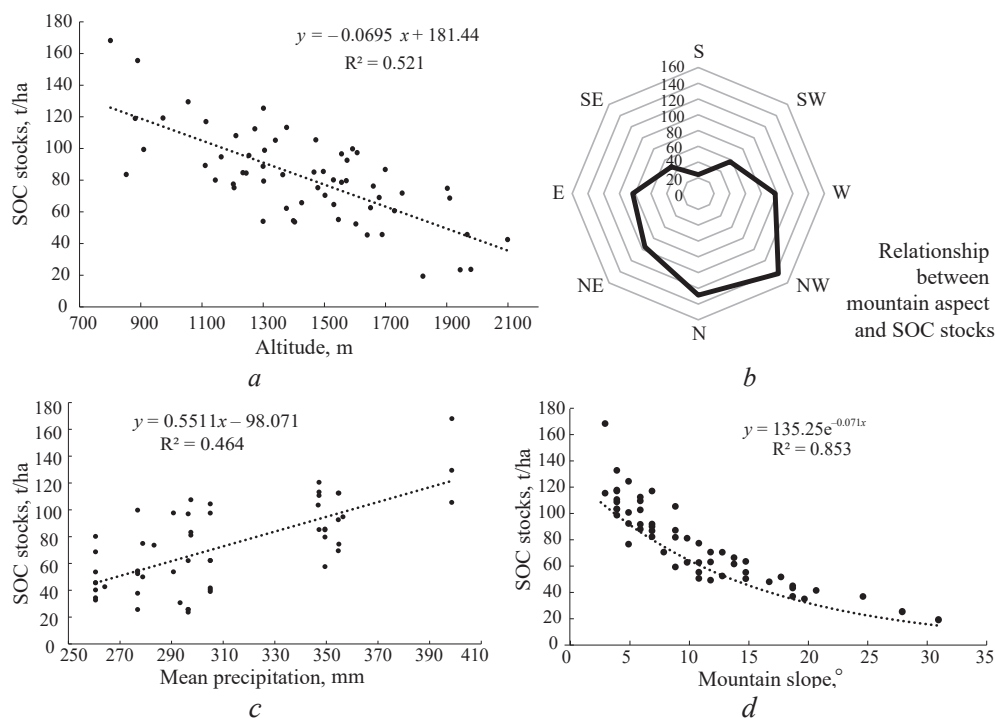
Statistical characteristics of the SOC stocks in the inventoried areas

Province	Number of plots	Mean temperature, °C	Average precipitation, mm	SOC stock, t/ha				P
				mean	min	max	SD	
Bulgan	21	0.2	333.3	91.50	17.20	129.50	9.01	0.001
Selege	23	1.1	273.8	12.50	23.70	168.20	14.85	0.000
Tuv	16	0.4	251.2	51.13	14.80	99.80	7.80	0.002

Hancock et al. [13] emphasized that plant biomass contributes significantly to the concentration of organic carbon in soil. In this regard, a well-developed river network and a slightly higher temperature in the mountains of Western Khentii, which are found in the territory of the Selenge province, can maintain a relatively higher productivity of forest vegetation. Mukhortova et al. [21], however, reported that about 81 % of the total SOC pool of Russian forests is distributed in the Asian part of Russia. Studies on the SOC stocks in temperate forests of the European and Asian parts of Russia reported that they averaged 162.1 t/ha and 154.7 t/ha [14], respectively. A number of researches have reported that various SOC stocks in the forests are the consequence of environmental factors such as air precipitation and temperature, altitude, mountain slope and aspect [8, 12, 15, 31]. Our study also confirmed this idea and found a rather strong relationship between the SOC stock and the above mentioned factors (see Fig.). Boreal forests in Mongolia are mainly distributed in mountainous area and grow basically on the north facing slopes. The effect of the mountain aspect and slope ($R^2 = 0.85$) on the SOC stock was clearly found in our study.

Our findings showed that increasing mountain slopes negatively affect the SOC stocks, and a relatively higher amount of the SOC stocks can be accumulated in the lower mountain slopes (Fig. *d*). In comparison, greater amount of the SOC stocks is distributed in the north-facing slopes of the mountains (Fig. *b*). The greatest SOC stocks were observed in the northwest and north mountain aspects (Fig. *b*). On the

one hand, mountain aspect can have a strong effect on the temperature and moisture regimes in connection with the angle of the sun rays [5]. Thus, humidity levels are relatively higher on the northern slope than on the southern slope and have a greater growth of woody plants and accumulation of organic matter [12]. The amount of precipitation in the study area becomes an important factor for accumulation of SOC ($R^2 = 0.46$) among other climate factors, and the highest SOC stocks were found in most humid areas (Fig. c). Simultaneously, there exists a negative correlation between the SOC stocks and altitude (Fig. a). Low temperatures often have a negative effect on the microbiological activity of the soil with increasing elevation from the point of view of decomposition of organic matter in forest soils.



Factors effecting the SOC stocks: *a* – altitude; *b* – mountain aspect; *c* – precipitation; *d* – mountain slope

Conclusion

The SOC stocks in the forests of Northern Mongolia are varied not only among provinces, but also at the province level. The estimated SOC stock in the studied regions was averaged 93.77 ± 6.4 t/ha. We found relatively less SOC stock in the boreal forests of Mongolia compared with the Asian part of Russia including Siberia and the Russian Far East. Such a less SOC stock may be caused by geographical distribution, where the Mongolian forests border the Central Asian dry steppe, and frequent water deficit.

However, the accumulation of the SOC stocks in the boreal forests of Mongolia is largely dependent on the mountain slopes and aspects in combination with the distribution of precipitation throughout the country. Higher amount of the SOC stocks were found in the north-facing aspects and lower positions with low slopes of

the mountains in lower altitude. Consequently, water sufficiency basically determines the pattern SOC stock distribution in the northern boreal forests of Mongolia.

REFERENCES

1. Бобкова К.С., Галенко Э.П., Тужилкина В.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А. Роль бореальных лесов Европейского Севера России в регулировании углеродного баланса северного полушария // Управленческие аспекты развития северных территорий России: материалы Всерос. науч. конф. (с междунар. участием). Сыктывкар: КРАГСиУ, 2015. Ч. 3. С. 36–41. [Bobkova K.S., Galenko E.P., Tuzhilkina V.V., Osipov A.F., Kuznetsov M.A. The Role of Boreal Forests of the European North of Russia in Carbon Balance Regulation of the Northern Hemisphere. *Management Aspects of Development of the Northern Territories of Russia. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Syktyvkar, KRASSA Publ., 2015, part 3, pp. 36–41].
2. Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12, № 4. С. 631–650. [Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and Swamps of Siberia in the Global Carbon Cycle. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2005, vol. 12, no. 4, pp. 631–650].
3. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопр. лесн. науки. 2018. Т. 1(1). С. 1–24. [Zamolodchikov D.G., Grabowsky V.I., Chestnykh O.V. Dynamics of Carbon Budget in Forests of Federal Districts of Russian Federation. *Voprosy lesnoy nauki* [Forest Science Issues], 2018, vol. 1(1), pp. 1–24.]. DOI: [10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24](https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24)
4. Ball D.F. Loss-on-Ignition as an Estimate of Organic Matter and Organic Carbon in Non-Calcareous Soils. *Journal of Soil Science*, 1964, vol. 15, iss. 1, pp. 84–92. DOI: [10.1111/j.1365-2389.1964.tb00247.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb00247.x)
5. Bayat A.T. *Carbon Stock in an Apennine Beach Forest*. MSC Thesis, Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, Netherlands, University of Twente, 2011. 54 p.
6. Berg E.E., Henry J.D., Fastie C.L., De Volder A.D., Matsuoka S.M. Spruce Beetle Outbreaks on the Kenai Peninsula, Alaska, and Kluane National Park and Reserve, Yukon Territory: Relationship to Summer Temperatures and Regional Differences in Disturbance Regimes. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 227, iss. 3, pp. 219–232. DOI: [10.1016/j.foreco.2006.02.038](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.038)
7. Carvalhais N., Forkel M., Khomik M., Bellarby J., Jung M., Migliavacca M. et al. Global Covariation of Carbon Turnover Times with Climate in Terrestrial Ecosystems. *Nature*, 2014, vol. 514, pp. 213–217. DOI: [10.1038/nature13731](https://doi.org/10.1038/nature13731)
8. Chapin F.S., Sturm M., Serreze M.C., McFadden J.P., Key J.R., Lloyd A.H. et al. Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming. *Science*, 2005, vol. 310, iss. 5748, pp. 657–660. DOI: [10.1126/science.1117368](https://doi.org/10.1126/science.1117368)
9. Ciais P., Sabine C. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung et al. Cambridge, Cambridge University Press, 2013, pp. 465–570.
10. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T. et al. An Estimate of the Terrestrial Carbon Budget of Russia Using Inventory-Based, Eddy Covariance and Inversion Method. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, iss. 12, pp. 5323–5340. DOI: [10.5194/bg-9-5323-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012)

11. Dulamsuren C., Hauk M., Leuschner C. Seedling Emergence and Establishment of *Pinus sylvestris* in the Mongolian Forest-Steppe Ecotone. *Plant Ecology*, 2013, vol. 214, iss. 1, pp. 139–152. DOI: [10.1007/s11258-012-0152-z](https://doi.org/10.1007/s11258-012-0152-z)
12. Feyissa A., Soromessa T., Argaw M. Forest Carbon Stocks and Variations along Altitudinal Gradients in Egdu Forest: Implications of Managing Forests for Climate Change Mitigation. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 40–46. DOI: [10.4314/star.v2i4.8](https://doi.org/10.4314/star.v2i4.8)
13. Hancock G.R., Murphy D., Evans K.G. Hillslope and Catchment Scale Soil Organic Carbon Concentration: An Assessment of the Role of Geomorphology and Soil Erosion in an Undisturbed Environment. *Geoderma*, 2010, vol. 155, iss. 1-2, pp. 36–45. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.11.021](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.021)
14. Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of Results. *Journal of Paleolimnology*, 2001, vol. 25, pp. 101–110. DOI: [10.1023/A:1008119611481](https://doi.org/10.1023/A:1008119611481)
15. Karjalainen T., Richards G. *Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forest and Devegetation of Other Vegetation Types. IPCC Report*. Ed. by J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti et al. Japan, IGES, 2003. 32 p.
16. Kirschbaum M.U.F. Will Changes in Soil Organic Carbon Act as a Positive or Negative Feedback on Global Warming? *Biogeochemistry*, 2000, vol. 48, iss. 1, pp. 21–51. DOI: [10.1023/A:1006238902976](https://doi.org/10.1023/A:1006238902976)
17. Köchy M., Hiederer R., Freibauer A. Global Distribution of Soil Organic Carbon – Part 1: Masses and Frequency Distributions of SOC Stocks for the Tropics, Permafrost Regions, Wetlands, and the World. *Soil*, 2015, vol. 1, iss. 1, pp. 351–365. DOI: [10.5194/soil-1-351-2015](https://doi.org/10.5194/soil-1-351-2015)
18. Kurz W.A., Dymond C.C., Stinson G., Rampley G.J., Neilson E.T., Carroll A.L. et al. Mountain Pine Beetle and Forest Carbon Feedback to Climate Change. *Nature*, 2008, vol. 452, pp. 987–990. DOI: [10.1038/nature06777](https://doi.org/10.1038/nature06777)
19. Lee X., Huang Y., Huang D., Hu L., Feng Z., Cheng J. et al. Variation of Soil Organic Carbon and Its Major Constraints in East Central Asia. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11(3), art. e0150709. DOI: [10.1371/journal.pone.0150709](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150709)
20. Mühlenberg M., Appelfelder H., Hoffmann H., Ayush E., Wilson K.J. Structure of the Montane Taiga Forests of West Khentii, Northern Mongolia. *Journal of Forest Science*, 2012, vol. 58, pp. 45–56. DOI: [10.17221/97/2010-JFS](https://doi.org/10.17221/97/2010-JFS)
21. Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F. Soil Contribution to Carbon Budget of Russian Forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, vol. 200, pp. 97–108. DOI: [10.1016/j.agrformet.2014.09.017](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.017)
22. *MPNFI Mongolian Multipurpose National Forest Inventory Report (2014–2016)*. Ulaanbaatar, Ministry of Nature and Environment, 2016. 126 p.
23. Myhre G., Shindell D. et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung et al. Cambridge, Cambridge University Press, 2013, pp. 659–740.
24. Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A. et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 2011, vol. 333, iss. 6045, pp. 988–993. DOI: [10.1126/science.1201609](https://doi.org/10.1126/science.1201609)
25. Rogers B.M., Soja A.J., Goulden M.L., Randerson J.T. Influence Of Tree Species on Continental Differences in Boreal Fires and Climate Feedbacks. *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, pp. 228–234. DOI: [10.1038/ngeo2352](https://doi.org/10.1038/ngeo2352)
26. Soja A.J., Shugart H.H., Sukhinin A., Conard S., Stackhouse Jr. P.W. Satellite-Derived Mean Fire Return Intervals as Indicators of Change in Siberia (1995–2002). *Miti-*

gation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, vol. 11, iss. 1, pp. 75–96. DOI: [10.1007/s11027-006-1009-3](https://doi.org/10.1007/s11027-006-1009-3)

27. Trahan M.W., Schubert B.A. Temperature-Induced Water Stress in High-Latitude Forests in Response to Natural and Anthropogenic Warming. *Global Change Biology*, 2016, vol. 22, iss. 2, pp. 782–791. DOI: [10.1111/gcb.13121](https://doi.org/10.1111/gcb.13121)

28. Trumbore S.E., Harden J.W. Accumulation and Turnover of Carbon in Soils of the BOREAS Northern Study Area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, vol. 102, iss. D24, pp. 28817–28830. DOI: [10.1029/97JD02231](https://doi.org/10.1029/97JD02231)

29. Ugawa S., Takahashi M., Morisada K., Takeuchi M., Matsuura Y., Yoshinaga S. et al. Carbon Stocks of Dead Wood, Litter, and Soil in the Forest Sector of Japan: General Description of the National Forest Soil Carbon Inventory. *Bull FFPRI*, 2012, vol. 11, pp. 207–221.

30. Walker X.J., Mack M.C., Johnstone J.F. Stable Carbon Isotope Analysis Reveals Widespread Drought Stress in Boreal Black Spruce Forests. *Global Change Biology*, 2015, vol. 21, iss. 8, pp. 3102–3113. DOI: [10.1111/gcb.12893](https://doi.org/10.1111/gcb.12893)

31. Yohannes H., Soromessa T., Argaw M. Carbon Stock Analysis along Slope and Slope Aspect Gradient in Gedo Forest: Implications for Climate Change Mitigation. *Journal of Earth Science and Climate Change*, 2015, vol. 6(9), art. 305. DOI: [10.4172/2157-7617.1000305](https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000305)

32. Zhu M., Feng Q., Zhang M., Liu W., Qin Y., Deo R.C. et al. Effects of Topography on Soil Organic Carbon Stocks in Grasslands of a Semiarid Alpine Region, Northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, vol. 19, pp. 1640–1650. DOI: [10.1007/s11368-018-2203-0](https://doi.org/10.1007/s11368-018-2203-0)

ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРНОЙ МОНГОЛИИ

М. Тунгалаг¹, канд. биол. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9727-9084>

С. Гэрэлбаатар¹, канд. биол. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9561-5256>

А.И. Лобанов², канд. биол. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>

¹Монгольский государственный университет, ул. Университетская, д. 3, г. Улан-Батор, Монголия, 14201; e-mail: gerelbaatar@seas.num.edu.mn

²Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии, а/я 709, г. Абакан, Республика Хакасия, Россия, 655019; e-mail: anatolylobanov@ksc.krasn.ru

Запасы органического углерода в почве и их изменение в региональном и большем пространственном масштабе имеют решающее значение для оценки их глобальной инвентаризации в почвах и прогнозирования дальнейших изменений. Цель работы – оценить запасы органического углерода в почвах бореальных лесов Северной Монголии. Исследование проводилось в лесах Булган, Сэлэнгэ и Тув аймаков с использованием полностью рандомизированного метода отбора пробных площадей. Для лабораторных анализов было отобрано 900 почвенных образцов на 60 пробных площадях. На каждой пробной площади заложен почвенный профиль глубиной 30 см с взятием образцов из трех слоев почвы: 0...5, 5...15 и 15...30 см. Результаты исследования показали значительное отличие в запасах органического углерода в почвах не только между аймаками, но и внутри каждого аймака. Более высокие показатели отмечены в лесных почвах Сэлэнгэ-аймака ($123,5 \pm 14,85$ т/га), самые низкие – в почвах Тув аймака ($51,13 \pm 7,8$ т/га). Обнаружено заметно меньше органического углерода в почвах бореальных лесов Монголии по сравнению с азиатской частью России, включая Сибирь и Дальний Восток, что может быть вызвано частым дефицитом воды и географическим расположением монгольских бореальных лесов, граничащих с засушливыми степями

Центральной Азии. Установлено, что накопление органического углерода в почвах бореальных лесов Монголии в значительной степени связано с их расположением на горных склонах и распределением осадков по территории. Более высокое количество органического углерода в почвах обнаружено на северных склонах, в более пониженных местах с малыми склонами и возвышенностью. Следовательно, влагообеспеченность в основном определяет характер распределения запасов органического углерода в почвах бореальных лесов Северной Монголии.

Для цитирования: Tungalag M., Gerelbaatar S., Lobanov A.I. Organic Carbon Stocks in the Forest Soils of Northern Mongolia // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 169–176. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-169-176

Ключевые слова: почва лесной зоны, органический углерод, запас углерода, экспозиция склона, Северная Монголия.

Поступила 24.09.19 / Received on September 24, 2019
